



Bundesamt
für Bevölkerungsschutz
und Katastrophenhilfe


HELMUT SCHMIDT
UNIVERSITÄT
Universität der Bundeswehr Hamburg


DLab
Electrical Power Systems

Einsatz erneuerbarer Energieanlagen und -speicher zur mobilen und stationären Notstromversorgung

Patrick Möbius, Johannes Schröder, Daniel Apenbrink,
Dennis Hamann, Robert Hankers und Detlef Schulz

Forschung für den
Bevölkerungsschutz

Band 35

Forschung für den
Bevölkerungsschutz

Band 35



Bundesamt
für Bevölkerungsschutz
und Katastrophenhilfe

Einsatz erneuerbarer Energieanlagen und -speicher zur mobilen und stationären Notstromversorgung

Forschung für den Bevölkerungsschutz

Verfasser: Patrick Möbius, M.Sc., Johannes Schröder, M.Sc.,
Daniel Apenbrink, M.Sc., Dennis Hamann, M.Sc.,
Robert Hankers, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Schulz



BBK. Gemeinsam handeln. Sicher leben.

Herausgeber

Bundesamt für Bevölkerungsschutz
und Katastrophenhilfe
Postfach 18 67, 53008 Bonn
Tel. +49 (0)228 99 550-0
Fax +49 (0)228 99 550-1620
www.bbk.bund.de

Verantwortlich für den Inhalt

Patrick Möbius, M.Sc., Johannes Schröder, M.Sc., Daniel Apenbrink, M.Sc.,
Dennis Hamann, M.Sc., Robert Hankers, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Schulz

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Professur für Elektrische Energiesysteme
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

Layout und Satz

A Vitamin Kreativagentur GmbH
12203 Berlin

Bildnachweis

AdobeStock M.Malinika

© 2024 Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
ISBN: 978-3-949117-19-0

Der vorliegende Band stellt die Meinung der Autorinnen und Autoren dar und gibt nicht grundsätzlich die Meinung des Herausgebers der Reihe wieder. Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist nur in den Grenzen des geltenden Urheberrechtsgesetzes erlaubt. Zitate sind bei vollständigem Quellen-

verweis jedoch ausdrücklich erwünscht. Dieses Werk darf ausschließlich kostenlos abgegeben werden. Weitere Exemplare dieses Buches oder anderer Publikationen des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe können Sie gerne beim Herausgeber der Reihe kostenfrei anfordern.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	15
Vorwort	21
Zusammenfassung	27
1 Einleitung	31
2 Begriffe	35
3 Technische Rahmenbedingungen	41
3.1 Stromausfallszenarien	43
3.1.1 <i>Ausfall aufgrund von Netzüberlastung</i>	43
3.1.2 <i>Physische Zerstörung als Ursache von Stromausfällen</i>	43
3.2 Anschluss von Notstromanlagen	45
3.2.1 <i>Allgemeine Vorgaben</i>	45
3.2.2 <i>Vorgaben für die mobile Notstromversorgung</i>	46
4 Analyse der Anwendungsszenarien	47
4.1 Anwendungsszenario 1: Mobile Notstromversorgung	49
4.2 Anwendungsszenario 2: Stationäre Notstromversorgung	50

5	Stand der Technik und Technologieanalyse	53
5.1	Batteriespeicher	55
5.1.1	<i>Batteriespeicher zur unterbrechungsfreien Stromversorgung</i>	55
5.1.2	<i>Batteriespeicher zur Integration fluktuierender Erzeuger</i>	57
5.2	Konventionelle Generatoren	60
6	Vorstellung grüner Alternativtechnologien zur Notstromversorgung	63
6.1	Biomasse	65
6.2	Brennstoffzelle	70
6.3	Photovoltaik	73
6.4	Wasserkraft	76
6.5	Windenergie	79
7	Methodik der Bewertung und Gewichtung der Anforderungsprofile	83
7.1	Energetische Anforderungen	85
7.1.1	<i>Leistungsbereitstellung</i>	85
7.1.2	<i>Regel- und Skalierbarkeit</i>	85
7.1.3	<i>Energieträger-Verfügbarkeit</i>	86
7.1.4	<i>Energiespeicherkapazität</i>	87
7.1.5	<i>Wirkungsgrad</i>	87
7.2	Technische Anforderungen	89
7.2.1	<i>Größe und Gewicht</i>	89
7.2.2	<i>Notwendige konstruktive Anlagenstruktur und notwendige Peripherie</i>	89
7.2.3	<i>Komplexität des Energiespeichers</i>	90
7.2.4	<i>Anlaufzeit</i>	90
7.2.5	<i>Robustheit</i>	91
7.3	Organisatorische Anforderungen	92
7.3.1	<i>Transport und Aufbau</i>	92
7.3.2	<i>Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb</i>	92
7.3.3	<i>Instandhaltungsaufwand</i>	93
7.3.4	<i>Personal- und Qualifikationsbedarf</i>	93

7.3.5	<i>Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen</i>	94
7.3.6	<i>Genehmigungsaufwand</i>	94
7.4	Sicherheitsanforderung	96
7.4.1	<i>IT-Bedarf</i>	96
7.4.2	<i>Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung</i>	96
7.4.3	<i>Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus</i>	97
7.5	Marktorientierte Anforderungen	98
7.5.1	<i>Investitionskosten</i>	98
7.5.2	<i>Operative Kosten</i>	99
7.6	Gewichtung der Kriterien bezogen auf die Anwendungsfälle	101
8	Bewertung der Technologien zur Notstromversorgung	103
8.1	Konventionelle Dieselgeneratoren	105
8.1.1	<i>Energetische Anforderungen</i>	105
8.1.2	<i>Technische Anforderungen</i>	107
8.1.3	<i>Organisatorische Anforderungen</i>	109
8.1.4	<i>Sicherheitsanforderungen</i>	111
8.1.5	<i>Marktorientierte Anforderungen</i>	112
8.2	Biomasse BHKW (Biomethan)	114
8.2.1	<i>Energetische Anforderungen</i>	114
8.2.2	<i>Technische Anforderungen</i>	116
8.2.3	<i>Organisatorische Anforderungen</i>	119
8.2.4	<i>Sicherheitsanforderungen</i>	121
8.2.5	<i>Marktorientierte Anforderungen</i>	123
8.3	Brennstoffzellen	125
8.3.1	<i>Energetische Anforderungen</i>	125
8.3.2	<i>Technische Anforderungen</i>	128
8.3.3	<i>Organisatorische Anforderungen</i>	130
8.3.4	<i>Sicherheitsanforderungen</i>	132
8.3.5	<i>Marktorientierte Anforderungen</i>	133
8.4	Photovoltaik	135
8.4.1	<i>Energetische Anforderungen</i>	135
8.4.2	<i>Technische Anforderungen</i>	137
8.4.3	<i>Organisatorische Anforderungen</i>	138
8.4.4	<i>Sicherheitsanforderungen</i>	140
8.4.5	<i>Marktorientierte Anforderungen</i>	141

8.5	Wasserkraft	143
8.5.1	<i>Energetische Anforderungen</i>	143
8.5.2	<i>Technische Anforderungen</i>	144
8.5.3	<i>Organisatorische Anforderungen</i>	146
8.5.4	<i>Sicherheitsanforderungen</i>	150
8.5.5	<i>Marktorientierte Anforderungen</i>	151
8.6	Windenergieanlagen	153
8.6.1	<i>Energetische Anforderungen</i>	154
8.6.2	<i>Technische Anforderungen</i>	156
8.6.3	<i>Organisatorische Anforderungen</i>	157
8.6.4	<i>Sicherheitsanforderungen</i>	159
8.6.5	<i>Marktorientierte Anforderungen</i>	160
8.7	Elektrische/Elektrochemische Energiespeicher	162
8.7.1	<i>Energetische Anforderungen</i>	162
8.7.2	<i>Technische Anforderungen</i>	164
8.7.3	<i>Organisatorische Anforderungen</i>	166
8.7.4	<i>Sicherheitsanforderung</i>	169
8.7.5	<i>Marktorientierte Anforderungen</i>	170
8.8	Gegenüberstellung der bewerteten Technologien	171
9	Anwendungsfallbezogene Zusammenfassung	177
9.1	Mobiles Anwendungsszenario	180
9.2	Stationäres Anwendungsszenario	183
10	Technologieübergreifende Ansätze zur Integration nachhaltiger Notstromsysteme	187
11	Literaturverzeichnis	193
12	Anhang	217
12.1	Experteninterview Manuel Geiger, Institut für Rettungsingenieurwesen und Gefahrenabwehr	218
12.2	Experteninterview E-Gruppe, THW Bergedorf	225
12.3	Experteninterview Carsten Büddig, Planungsbüro 2000	231

12.4	Experteninterview Sebastian Birk, Technischer Leiter Agaplesion Kliniken	233
12.5	Experteninterview Emanuel Graser, 42technology Ltd.	236
12.6	Experteninterview Robin Wenk, Karl Meyer Energiesysteme GmbH	237
	Bisherige Publikationen	240

Abbildungsverzeichnis





Abbildung 1	TN-S System (T-Terra (Erde), N-Neutralleiter, S-separated) (eigene Darstellung)	46
Abbildung 2	Einbindung einer Offline-USV (VFD) (eigene Darstellung)	56
Abbildung 4	Einbindung einer Online-USV (VFI) (eigene Darstellung)	56
Abbildung 3	Einbindung einer Interaktiven USV (VI) (eigene Darstellung)	56
Abbildung 5	Schema zur Einbindung eines Batteriespeichers in ein Notstromsystem, ENS – Einrichtung zur Netzüberwachung mit zugeordneten Schaltorganen, später abgelöst durch BiSi – Bidirektionale Sicherheitsschnittstelle) (eigene Darstellung)	58
Abbildung 6	Schema und Energieflussrichtung eines Dieselgenerators (eigene Darstellung)	60
Abbildung 7	Schema und Energieflussrichtung eines BHKW mit Druckgasflaschenbetankung (eigene Darstellung)	68
Abbildung 8	Schema und Energieflussrichtung eines Brennstoffzellensystems (eigene Darstellung)	72
Abbildung 9	Schema und Energieflussrichtung eines PV-Systems (eigene Darstellung)	75
Abbildung 10	Schema und Energieflussrichtung eines stationären Speicherkraftwerks mit Turbinengenerator (eigene Darstellung)	78
Abbildung 11	Schema und Energieflussrichtung eines mobilen Wasserkraftwerks mit Rotorgenerator (eigene Darstellung)	78

Abbildung 12	Schema und Energieflussrichtung eines Flugwindkraftwerks, Phase I: Energiegewinnung, Phase II: Einholen des Kites (eigene Darstellung)	82
Abbildung 13	Schema und Energieflussrichtung einer horizontalen WEA für den stationären Betrieb (eigene Darstellung)	82
Abbildung 14	Leistungskurve einer WEA mit 2,1 MW (Siemens Gamesa Renewable Energy 2021c)	153

Tabellenverzeichnis





Tabelle 1	Technologiebeispiele für Batteriespeichersysteme	59
Tabelle 2	Technologiebeispiele zur Notstromversorgung mit einem Dieselgenerator	62
Tabelle 3	Technologiebeispiele zur Verstromung von Biogas und Erdgas	68
Tabelle 4	Technologiebeispiele zur Stromerzeugung durch PEM-Brennstoffzellen	71
Tabelle 5	Technologiebeispiele für PV-Module unterschiedlicher Leistungsklassen	75
Tabelle 6	Technologiebeispiele für mobile Wasserkraftwerke	77
Tabelle 7	Technologiebeispiele für mobile und stationäre WEA	80
Tabelle 8	Gewichtung der Bewertungskriterien bezogen auf die Anwendungsszenarien	101
Tabelle 9	Bewertung der Technologien anhand der erarbeiteten Kriterien	174
Tabelle 10	Verrechnungsmatrix zur Erstellung der gewichteten Bewertungen für die Anwendungsszenarien	179
Tabelle 11	Gewichtete Bewertung der Technologien bezogen auf das mobile Anwendungsszenario	181
Tabelle 12	Gewichtete Bewertung der Technologien bezogen auf das stationäre Anwendungsszenario	184

Abkürzungsverzeichnis





AC	Wechselstrom
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BauGB	Baugesetzbuch
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BZ	Brennstoffzelle
C	Kohlenstoff
CCU	Carbon Capture and Usage
CNG	Compressed Natural Gas/komprimiertes Erdgas
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DC	Gleichstrom
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ENS	Einrichtung zur Netzüberwachung mit zugeordneten Schaltorganen
ETS	Emergency-Temporary-Shelter
EU	Europäische Union
FAME	Fettsäure-Methylester
FStrG	Bundesfernstraßengesetz
GW	Gigawatt

GWh	Gigawattstunde
H₂	Wasserstoff
H₂O	Wasser
HSU	Helmut-Schmidt-Universität
Hz	Hertz
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
iNEP	Projekt Integrierte Netzplanung
ISO	Internationale Organisation für Normung (engl. International Organization for Standardization)
IT	Informationstechnik
k. A.	keine Angabe
KFZ	Kraftfahrzeug
KRITIS	Kritische Infrastrukturen
kVA	Kilovoltampere
kVAh	Kilovoltamperestunde
kW	Kilowatt
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
kW_p	Kilowatt Peak
L	Leiter
Li-Ion	Lithium-Ionen
LKW	Lastkraftwagen
LNG	Liquified Natural Gas/Flüssigerdgas
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde

N	Neutralleiter
n. b.	nicht bewertet
Na-S	Natrium-Schwefel
NEA	Netzersatzanlage
NI	Normliter
Nm³	Normkubikmeter
O₂	Sauerstoff
PE	Schutzleiter
PEM	Polymer-Exchange-Membran/Polymerelektrolytmembran
ppm	parts per million
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PV	Photovoltaik
RCD	Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (Residual Current Device)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SEA	Stromerzeugungsaggregate
SOEC	Solid Oxide Electrolyzer Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
StVO	Straßenverkehrsordnung
TAR	Technische Anschlussregeln
THW	Technisches Hilfswerk
TRB	Technische Regeln zur Druckbehälterverordnung
TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit
TWh	Terawattstunde
U	Umdrehungen
USV	Unterbrechungsfreies Stromversorgungssystem
V	Volt

VBh	Vollbenutzungsstunden
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V.
VDN	Verband der Netzbetreiber e.V.
VFD	Voltage and Frequency Dependent on Mains Supply
VFI	Voltage and Frequency Independent from Mains Supply
VI	Voltage Independent from Mains Supply
VNB	Verteilnetzbetreiber
W	Watt
WEA	Windenergieanlage
Wh	Wattstunde
W_p	Watt Peak

Vorwort





Zukunftsfähige Lösungsansätze für den Bevölkerungsschutz

Das Risiko von Stromausfällen ist im Bevölkerungsschutz ein wichtiges Thema. Zentral ist dabei das Szenario eines langandauernden, großflächigen Stromausfalls (Blackout), wie es 2011 in einem Bericht des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag ausführlich beschrieben wurde und das in seinen Auswirkungen auf sämtliche Lebensbereiche katastrophale Folgen hätte. Aber auch kleinere Ausfälle, wie sie immer wieder vorkommen können und lokale Einsatzkräfte vor Herausforderungen stellen, sind von hoher Relevanz. In allen Fällen ist eine gute Krisenorganisation wichtig – und an den entscheidenden Stellen vor allem auch eine funktionierende Notstromversorgung. Hier ist in den letzten Jahren viel Vorarbeit geleistet worden und dies geschieht auch weiterhin.

Im Kontext von Klimaschutz und der voranschreitenden Transformation des Energiesystems kommt im Bevölkerungsschutz dabei vermehrt auch die Frage auf, ob eine Notstromversorgung nicht umweltfreundlicher und zukunftsorientierter gestaltet werden kann als mit dem konventionellen Dieselaggregat. Es wird die Hoffnung zum Ausdruck gebracht, dass eine Notstromversorgung auf Basis von Sonne, Wind o.a. keinen kohlenstoffbasierten Treibstoff und keine Treibstofflogistik benötige und daher vorteilhaft für den Einsatz in Katastrophengebieten sei. Auch die mitunter deutlich geringere Emission von Lärm und Abgasen wird für manche Anwendungsfälle in Katastrophen und Krisen als besonders positiv hervorgehoben (z.B. bei Betreuungsaufgaben).

Es sei gleich vorab gesagt, dass es noch einen längeren Weg zu gehen gilt, bis eine zuverlässige Einsatzfähigkeit von Notstromaggregaten (allein) auf Basis erneuerbarer Energien gewährleistet werden kann. Doch gilt es schon heute, mögliche Entwicklungspfade aufzuzeigen und die Bedarfe des Bevölkerungsschutzes in den Entwicklungsprozess hineinzutragen.

Als Grundlage für entsprechende Diskussionen und Entwicklungen sind Anforderungen zu definieren und darauf aufbauend die vorhandenen Technologien auf ihre Eignung hin zu untersuchen. Dieser Aufgabe haben wir uns im Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2021 gestellt und die vorliegende Studie in Auftrag gegeben. Sie untersucht die Eignung erneuerbarer Energieanlagen und -speicher für eine mobile und stationäre Notstromversorgung im Rahmen des Bevölkerungsschutzes.

Mit dem Team der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr in Hamburg haben wir sehr engagierte Kolleginnen und Kollegen gefunden, die eine Auswahl vorhandener Techniken systematisch gegenübergestellt, Unterschiede herausgearbeitet und zukünftige Lösungsansätze skizziert haben.

Das Ergebnis sehen wir als einen Beitrag für die zukünftige Diskussion des Themas, für weitere Forschung und die Entwicklung neuer Ideen an. Es ist auch ein Plädoyer dafür, bei aktuellen Entwicklungen im Energieversorgungssystem die Bedarfe des Bevölkerungsschutzes nicht außen vor zu lassen: Unsere Abhängigkeit von Strom ist so groß, dass wir bei größeren Ausfällen effektive Rückfallebenen brauchen. Hier gilt es zu Lösungen zu kommen, die auch in der Zukunft tragfähig, nachhaltig und vor allem auch klimafreundlich sind.

Ich wünsche eine gute und erkenntnisreiche Lektüre.

Dr. Wolfram Geier

Abteilungsleiter Risikomanagement, Internationale Angelegenheiten im Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe



Bewertung von Notstromlösungen für den Bevölkerungsschutz

Mit der vorliegenden Studie zum Projekt „Grüner Notstrom: Einsatz erneuerbarer Energieanlagen und -speicher zur mobilen und stationären Notstromversorgung“ werden die Ergebnisse im Untersuchungszeitraum Juli bis Oktober 2021 zusammengefasst.

Die vorliegende Studie soll im Vergleich zu unserer ersten BBK-Studie aus dem Jahr 2015 „Autarke Notstromversorgung der Bevölkerung unterhalb der KRITIS-Schwelle“ eine wesentlich breitere technische Analyse zum Einsatz von Notstromversorgungsanlagen bieten.

Anders als der aktuelle Projekttitel vermuten lässt, wurden nicht nur Notstromanlagen untersucht und klassifiziert, sondern auch die unterbrechungsfreie Stromversorgung, Ersatzstromversorgung und Netzersatzanlagen. Was die Unterschiede zwischen diesen Begrifflichkeiten sind, erfahren Sie bereits auf den ersten Seiten dieser Studie. Darüber hinaus werden die technischen Rahmenbedingungen, die Anwendungsszenarien sowie der Stand der Technik der Notstromversorgung erläutert.

Es folgt die Vorstellung grüner Alternativtechnologien zur Notstromversorgung, ein neues Untersuchungsgebiet, für das eine Methodik der Bewertung und eine Gewichtung der Anforderungsprofile erarbeitet wurden.

Die Bewertung von Technologien zur Notstromversorgung nimmt den Hauptteil der Studie ein, hierbei möchten wir so viel vorstrukturierte und faktenbasierte Informationen präsentieren, dass jeder potenzielle Anwender sich ein möglichst objektives Bild von realistischen Anwendungsmöglichkeiten machen kann.

Wir waren uns immer der Herausforderung bewusst, bedarfsgerechte Anwendungsszenarien für grüne Technologien zu entwickeln und hoffen sehr, dass die in diesem Zusammenhang geführten Interviews mit Praxisexperten dazu beitragen konnten, realistische Szenarien zu entwerfen.

Bei den Bearbeitern der Studie, Patrick Möbius, Johannes Schröder, Daniel Apenbrink, Dennis Hamann, und Robert Hankers bedanke ich mich für ihr großes Engagement, viele spannende Diskussionen und die zügige Fertigstellung.

Wir hoffen, dass die vorliegende Zusammenfassung des Stands der Technik sowie der technischen Möglichkeiten für eine klimafreundliche Notstromversorgung für alle Nutzer inspirierend und hilfreich ist.

Prof. Dr.-Ing. Detlef Schulz

Professor für Elektrische Energiesysteme, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg

Zusammenfassung





Zusammenfassung

Eine Notstromversorgung erfolgt heutzutage fast ausschließlich durch den Einsatz von Kolbenmaschinen und fossilen Energieträgern. Im Zuge des Klimawandels und zur Erfüllung der politisch-gesellschaftlichen Klimaschutzziele werden jedoch nachhaltige Technologien und deren umweltverträglicher Systemeinsatz immer wichtiger. Die Notstromversorgung ist ein inhärent redundantes Konzept, das den Ausfall eines vorgelagerten Systems kompensieren soll. Sie muss zuverlässig und auf Abruf Energie bereitstellen. Dadurch besteht ein Interessenkonflikt zwischen der geforderten Nachhaltigkeit, durch den Einsatz erneuerbarer Energien mit fluktuierender Erzeugung, und der notwendigen Versorgungssicherheit. Diese Studie untersucht deshalb den möglichen Einsatz erneuerbarer Energiesysteme im Verbund mit einer Speichereinheit für den Zweck der Notstromversorgung. Dabei werden die unterschiedlichen Technologien in zwei Anwendungsfällen anhand von diversen Kriterien bewertet und verglichen. Außerdem werden technologieübergreifende Ansätze für die ganzheitliche Integration dieser Systeme zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und zum Ausgleich von Funktionseinschränkungen vorgestellt. Das Ziel besteht darin, einen grundlegenden Überblick über die Plausibilität, Limitationen und Potentiale von alternativen Notstromtechnologien zu geben.



Summary

Emergency power supply today is almost exclusively provided by the use of piston engines and fossil fuels. However, in the context of climate change and in order to meet political and societal climate protection goals, sustainable technologies and their environmentally friendly system use are becoming increasingly important. The emergency power supply is an inherently redundant concept intended to compensate for the failure of an upstream system. It must be able to provide electrical energy reliably and on demand. This creates a conflict of interest between the required sustainability, through the use of renewable energies with fluctuating generation, and the necessary security of supply. Therefore, this study examines the possible use of renewable energy systems in conjunction with a storage unit for the purpose of emergency power supply. The different technologies are evaluated and compared in two use cases based on various criteria. In addition, cross-technology approaches for the holistic integration of these systems to improve economic efficiency and compensate for functional limitations are presented. The goal is to provide a basic overview of the plausibility, limitations, and potential of alternative emergency power technologies.

Einleitung

1



Elektrische Energie gewinnt sektoren- und prozessübergreifend in vielen Bereichen des modernen Lebens kontinuierlich an Bedeutung. Dadurch wächst auch die Abhängigkeit unserer Gesellschaft von einer zuverlässigen Stromversorgung. Durch eine zunehmende Automatisierung und die damit einhergehende Elektrifizierung werden die potentiellen Folgen eines flächendeckenden Stromausfalls immer gravierender. Der Ausfall von Kommunikationsnetzen, von öffentlicher Beleuchtung oder der Steuerung des Verkehrs durch defekte Ampeln sind nur einige Beispiele, die verdeutlichen, wie schnell der Ausfall der elektrischen Energieversorgung das Leben in Deutschland verändern würde. Die teils dramatischen Folgen eines Stromausfalls können begrenzt werden, wenn kritische Infrastrukturen (KRITIS) durch geeignete Notstromversorgung auch bei einem Stromausfall ihre Dienstleistungen erbringen können. KRITIS sind definiert als:

„[...] Organisationen oder Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden.“ (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2021).

Sofern in KRITIS Notstromversorgung vorhanden ist, werden klassischerweise Notstromaggregate auf Basis konventioneller Verbrennungsmotoren, genaue genommen Dieselmotoren, eingesetzt, um die Liegenschaften bei einem Netzausfall mit elektrischer Energie zu versorgen (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2019). Es gibt grundsätzlich den Willen, die elektrische Energieversorgung zunehmend aus regenerativen Quellen zu speisen. Dies zeigt sich unter anderem in einem langsam wachsenden Marktangebot für grüne Notstromversorgung. Dennoch setzen Planende und Betreibende von Notstromanlagen weiterhin auf etablierte Technik, da innovative Systeme entweder deutlich kostenintensiver sind, die Energiedichte zu gering ist oder ein zuverlässiger Betrieb noch nicht lange genug erprobt wurde.

Im Rahmen dieser Studie soll aufgezeigt werden, inwieweit eine Notstromversorgung mittels erneuerbarer Energien nach heutigem Stand (2021) geeignet ist, KRITIS beim Stromausfall weiter zu betreiben, und in welchen Punkten für die

zukünftige Entwicklung noch Verbesserungsbedarf besteht. Daher werden anhand zweier Anwendungsszenarien Technologien der folgenden Energieträger untersucht:

- Biomasse,
- Solarstrahlung,
- Wasserstoff,
- Windenergie und
- Wasserkraft.

Anwendungsszenario 1 soll dabei den mobilen Einsatz einer Notstromanlage und Anwendungsszenario 2 den stationären Einsatz für ein Krankenhaus umfassen. Anhand der Anwendungsszenarien werden die unterschiedlichen Technologien bewertet, um Chancen und Herausforderungen grüner Notstromversorgung, also der Notstromversorgung aus erneuerbaren Energien, aufzuzeigen. Das Ziel der Studie ist es, anhand von Bewertungskriterien eine vergleichende Einschätzung grüner Technologien vorzunehmen. Dabei sollen auch die aktuellen technischen Möglichkeiten dargestellt und die Marktlage verdeutlicht werden. Darüber hinaus werden Lösungsansätze zur besseren Integration der Anlagen präsentiert, um Vorteile gegenüber konventionellen Notstromsystemen aufzuzeigen.

In Kapitel 2 werden grundsätzliche Begriffe zum Thema Notstromversorgung definiert. Anschließend werden in Kapitel 3 die technischen Rahmenbedingungen einer Notstromversorgung beschrieben. Dabei wird einerseits auf die Gründe von Stromausfällen eingegangen und andererseits der Anschluss von Notstromanlagen vorgestellt. In Kapitel 4 werden die beiden Anwendungsszenarien beschrieben. Kapitel 5 liefert einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik von Notstromanlagen auf Basis konventioneller Generatoren. Anschließend werden in Kapitel 6 Alternativtechnologien zur grünen Notstromversorgung vorgestellt und in Kapitel 7 die Methodik der Bewertung sowie die Gewichtung der Anforderungsprofile der jeweiligen Anwendungsszenarien beschrieben. In Kapitel 8 werden die Bewertungen der Technologien zur Notstromversorgung durchgeführt und zusammengefasst. In Kapitel 9 wird die in Kapitel 8 erarbeitete Bewertung mit der in Kapitel 7 vorgestellten Gewichtung auf die jeweiligen Anwendungsszenarien bezogen. Kapitel 10 zeigt technologieübergreifende Lösungsansätze für die praktische Integration von alternativen Notstromanlagen.

Die vorliegende Studie wurde im Zeitraum vom 01.08.2021 bis 30.11.2021 bearbeitet. Die Informationen haben daher einen Stand von 2021; neuere Entwicklungen wurden nicht berücksichtigt.

Begriffe

2



Ein breites Angebot an autarken Stromversorgungsanlagen sowie Anlagen zur Umrüstung und Ergänzung von privaten Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen) zur inselnetzfähigen Stromversorgung hat zu unterschiedlichsten Definitionen im Bereich der Notstromversorgung geführt. Eine einheitliche, allgemeingültige und vollständige Definition der Begriffe in Normen des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE) existiert noch nicht. Deswegen werden im folgenden Abschnitt die wichtigsten Begriffe des Bereichs Notstromversorgung hinsichtlich ihrer Verwendung in dieser Studie definiert. Soweit dies möglich und sinnvoll ist, orientieren sich die Definitionen an denen der VDE-Normen und bereits publizierter Literatur des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK).

Ausfall des öffentlichen Netzes

Wird in dieser Studie von einem Ausfall des öffentlichen Netzes gesprochen, dann ist damit ein Stromausfall, also eine unbeabsichtigte Unterbrechung der öffentlichen Versorgung mit elektrischer Energie, gemeint (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2018a).

Notstromversorgung

Notstromversorgung ist definiert als die Versorgung mit elektrischer Energie im Notfall (Paschotta 2020). Diese erfolgt durch Notstromanlagen. Im medizinischen Bereich gelten besondere Anforderungen; dort spricht man von einer Sicherheitsstromversorgung (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2006). Notstromversorgung dient als allgemeiner Oberbegriff für die Bereiche unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) und Ersatzstromversorgung, welche zu unterscheiden sind (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2019).

Notstrom

Notstrom ist der von Notstromversorgungsanlagen erzeugte Strom, der im Rahmen der Notstromversorgung genutzt wird. Häufig wird er explizit für diesen Zweck erzeugt und in eigenen Leitungen oder separaten Sicherheits- oder Notstromkreisen geführt.

Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Unter dem Begriff USV wird eine Kombination von Stromrichtern, Schaltern und Energiespeichern (meist Batterien) verstanden, welche zum Schutz hochsensibler technischer Systeme beim Ausfall der Eingangsversorgung eine beständige Versorgung der Last sicherstellen soll (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2019, Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2020).

Ersatzstromversorgung

Mit der Ersatzstromversorgung ist die Niederspannungsversorgung von einer elektrischen Anlage oder Teilen davon bei einer Unterbrechung der üblichen Stromversorgung aus dem öffentlichen Netz gemeint (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2021a). Der Einsatz ist nicht auf die Notstromversorgung beschränkt. Die Ersatzstromversorgung erfolgt in der Regel nicht unterbrechungsfrei (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2019). Dabei sind einfache Stromerzeugungsaggregate von Netzersatzanlagen zu unterscheiden.

Ersatzstrom

Ersatzstrom ist der von Ersatzstromversorgungsanlagen erzeugte Strom, der im Rahmen der Ersatzstromversorgung genutzt wird. Häufig werden bestehende Netzstrukturen genutzt.

Stromerzeugungsaggregate

Stromaggregate oder auch Stromerzeugungsaggregate (SEA) (Lange 2021) sind Erzeugungseinheiten zur elektrischen Energieversorgung von vom öffentlichen Netz getrennten elektrischen Anlagen oder Teilen davon (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2018a). Sie liefern über Steckdosenverteiler elektrische Energie zum Betrieb einphasiger Verbraucher. Eine Einspeisung ins öffentliche Netz ist nicht vorgesehen (Lange 2021).

Notstromaggregate

Notstrom- oder auch Notstromerzeugungsaggregate sind Stromerzeugungsaggregate mit dem Einsatzzweck der elektrischen Energieversorgung von Anschlussnutzeranlagen oder Teilen davon bei Ausfall des öffentlichen Netzes (Stromausfall).

Netzersatzanlagen

Die Einsatzmöglichkeiten einer Netzersatzanlage (NEA) gehen über die eines einfachen Notstromaggregats hinaus (Paschotta 2020). NEA sind Erzeugungseinheiten, die dreiphasig an ein vorhandenes Strom- oder ein Inselnetz angeschlossen werden können (Lange 2021). Um mit einer NEA in einzelne Häuser (Objekte) einzuspeisen, benötigen diese einen passenden Netz-Notstromschalter sowie einen entsprechenden Einspeiseanschluss, z. B. eine CEE-Steckdose (Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment).

Unterschieden werden kann dabei zwischen vier Typen von Anschlusspunkten:

Mobile Notstromversorgung eines Objekts

Mobile Notstromversorgung eines Objekts unter Verwendung der vorhandenen Elektroinstallationen.

Stationäre Notstromversorgung eines Objekts

Stationäre Notstromversorgung eines Objekts unter Verwendung der vorhandenen Elektroinstallationen. Die Übernahme der Netzstromversorgung findet dabei in der Regel nicht unterbrechungsfrei statt. Eine Kombination von NEA und USV in stationären Notstromversorgungssystemen ist möglich.

Nutzung eines vorhandenen Microgrids

Nutzung eines vorhandenen Microgrids, welches im Regelbetrieb im Netzparallelbetrieb betrieben wird und im Notstromfall als Inselnetz mit eigener Steuerung eingesetzt wird.

Teilversorgung des öffentlichen Verteilnetzes im Inselnetzbetrieb

Für gewisse Arbeiten im Netz ist es erforderlich, Teilnetze vom übrigen Netz zu trennen. Um die betroffenen Anschlussnehmer trotzdem weiter versorgen zu können, kann der Netzbetreiber NEA einsetzen (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2018a). Auch in einem solchen geplanten Szenario spricht man von einer NEA.

Notstromnetz

Das Notstromnetz stellt einen Teil des gesamten Netzes einer Liegenschaft dar. Es ist ein eigens für den Notbetrieb ausgelegtes Netz. Da NEA in der Regel nur

begrenzt Leistung bereitstellen können, soll dieses Notstromnetz dafür sorgen, dass nur essentielle Verbraucher versorgt werden und eine Überlastung des Aggregats vermieden wird (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2019).

Netz-Notstromschalter

Der Netz-Notstromschalter ist eine Umschalteneinrichtung, welche eine Umschaltung vom Netz- auf den Notstrombetrieb ermöglicht. Dabei muss eine Stellung zwischen den Schaltzuständen für Netzbetrieb und NEA vorhanden sein, in der das zu versorgende Notstromnetz sowohl vom öffentlichen Netz als auch von der NEA getrennt ist (Bartels et al. 2004).

Einsatzphase

Die Einsatzphase ist die Zeitperiode, in der das Notstromversorgungssystem Notstrom bereitstellt oder unmittelbar für die Bereitstellung vorbereitet wird, z. B. durch den Transport an den Bedarfsort.

Bereitstellungsphase

Die Bereitstellungsphase ist die Zeitperiode, in der das Notstromversorgungssystem auf Abruf einsatzbereit ist, die Notstromversorgung jedoch nicht für den Zweck der Ersatzstromversorgung genutzt wird. Ausfallzeit, z. B. aufgrund von Wartungsmaßnahmen oder Störungen, zählt nicht dazu.

Volllaststunden

Die Kennzahl „Volllaststunden“ oder „Vollbenutzungsstunden“ (VBh) wird als Quotient aus der im Laufe eines Jahres tatsächlich erzeugten Energie und der Nennleistung des Kraftwerks ermittelt (Wirth 2021a).

Technische Rahmenbedingungen

3



Im folgenden Kapitel werden zunächst die Ursachen für Stromausfälle beschrieben und unter welchen Rahmenbedingungen entsprechende Notstromsysteme zum Einsatz kommen. In Normen sind technische Voraussetzungen definiert, um einen sicheren Betrieb des Notstromnetzes zu gewährleisten. Erschwert werden kann der Einsatz durch umweltbedingte Faktoren vor Ort, welche mitunter auch stromausfallverursachende Störungen hervorrufen (Bartels et al. 2004, Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. 2019).

Um die Eignung einer Technologie zum Einsatz in Notstromversorgungsanlagen bewerten zu können, müssen gewisse Annahmen zu den Einsatzrahmenbedingungen getroffen werden. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt die wahrscheinlichsten Ursachen und Auswirkungen eines Ausfalls des öffentlichen Netzes beschrieben.

Unterschieden werden kann zwischen der physischen Zerstörung und Beschädigung von Teilen des Stromversorgungssystems und einem Ausfall aufgrund einer Netzüberlastung. Bei vernetzten Systemen und bei Anlagen mit Informationstechnik (IT)-Schnittstellen können die folgenden Probleme auch durch Cyberangriffe verursacht werden.

3.1.1 Ausfall aufgrund von Netzüberlastung

Um das Netz stabil bei einer Netzfrequenz von 50 Hz zu halten, muss die Bilanz aus Stromverbrauch und -erzeugung zu jeder Zeit ausgeglichen sein. Reicht die Erzeugung nicht aus, weil beispielsweise Kraftwerke ausfallen oder es zu einem sprunghaften Anstieg der Last kommt, sinkt die Netzfrequenz ab. Kann ein weiteres Absinken nicht durch Zuschalten von schnell verfügbaren Kraftwerken verhindert werden, gibt es einen Fünfstufenplan zur Frequenzstabilisierung durch Lastabwurf. Eine Beschädigung oder gar Zerstörung der Stromversorgungsinfrastruktur ist dadurch nicht zu erwarten, ebenso wenig wie eine Zerstörung anderer Infrastrukturen wie Straßen, Brücken oder Gebäuden.

3.1.2 Physische Zerstörung als Ursache von Stromausfällen

Im Falle einer physischen Zerstörung kann weiter differenziert werden zwischen Naturkatastrophen, wie sie erst im Juli 2021 Teile von Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz getroffen haben, technischem Versagen aufgrund von Fehlfunktionen, Alterung und Verschleiß und vorsätzlichen Handlungen wie Sabotage oder Anschlägen. In einem solchen Fall sind die Auswirkungen meist weitreichender und eine Behebung des Stromausfalls dauert durchschnittlich wesentlich länger, da defekte oder zerstörte Bauteile erst wieder instandgesetzt werden müssen (Hieta et al. 2010).

Naturkatastrophen und extreme Wetterereignisse können physische Schäden am Stromversorgungssystem hervorrufen. Zu solchen Ereignissen zählen:

- Sturm,
- Gewitter,
- Hochwasser,
- Erdbeben,
- Schneefall,
- Kälte- und Hitzewellen,
- Hagelschlag,
- Dürreperioden,
- Waldbrände,
- Tektonik / Vulkanausbrüche und
- Magnetfeldschwankungen (bspw. Sonnenstürme).

Die Auswirkungen solcher Ereignisse auf die verschiedenen Elemente der Stromversorgung können sehr unterschiedlich ausfallen. Darüber hinaus können auch andere Teile der Infrastruktur eines Gebiets betroffen sein. Ein Hochwasser wie im Westen Deutschlands im Juli 2021 kann ganze Straßen blockieren, Brücken einreißen und Übertragungsleitungen zerstören. Dürreperioden können den Wasserstand von Flüssen verringern und damit Kraftwerke zwingen, ihre Leistung zu reduzieren. Entsprechend unterschiedlich fallen auch die Anforderungen an Notstromversorgungssysteme aus, um unter solchen Bedingungen eingesetzt werden zu können. In Abschnitt 4 werden Anwendungsszenarien formuliert, an denen die Technologien gemessen werden sollen.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass im Falle eines Ausfalls des öffentlichen Netzes die im Normalfall vorhandenen elektrischen Schutzeinrichtungen nicht wirksam sind (Bartels et al. 2004). Wie für alle anderen Erzeugungsanlagen gibt es für Notstromanlagen Richtlinien, die den Anschluss und den Betrieb von Anlagen am öffentlichen Netz regeln. Besonders zu nennen sind die Normenreihen VDE-AR-N 4100: „Technische Bedingungen für den Anschluss von Kundenanlagen an das Niederspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Niederspannung)“, die VDE-AR-N 4105: „Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“ sowie die VDN Richtlinie: „Notstromaggregate“. Diese Richtlinien sollen u. a. sicherstellen, dass bei der Nutzung der elektrischen Anlagen niemand zu Schaden kommt. Im Folgenden sollen einige, für die spätere Technologiebewertung relevante, technische Anforderungen erläutert werden.

3.2.1 Allgemeine Vorgaben

Über einen Netz-Notstromschalter kann das Notstromnetz vom öffentlichen Netz des Verteilnetzbetreibers (VNB-Netz) allpolig getrennt werden. Diese Trennung ist zwingend vorgeschrieben. Ein Parallelbetrieb von Notstromanlage und VNB-Netz ist nur für eine kurze Zeit der Synchronisierung (< 100 ms) und unter Einhaltung von Synchronisierungsbedingungen gestattet, um beispielsweise nach Spannungswiederkehr im VNB-Netz eine Unterbrechung der Spannungsversorgung der Kundenanlage zu vermeiden (Bartels et al. 2004). Daraus folgt, dass die Notstromanlage selbstständig die Last übernehmen kann oder über entsprechende Hilfseinrichtungen verfügen muss. Um einen vom öffentlichen Netz unabhängigen Schutz zu gewährleisten, werden Notstromnetze als TN-S-System, wie in Abbildung 1 dargestellt, mit Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD) betrieben (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2019).

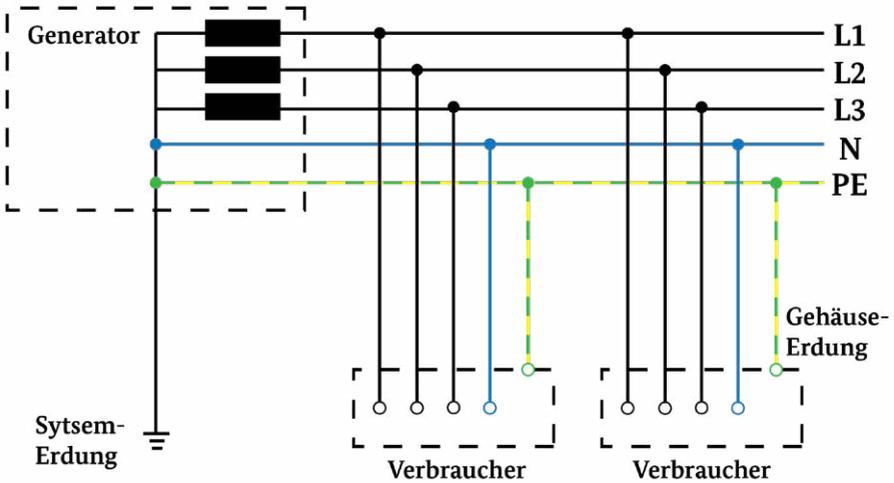


Abbildung 1: TN-S System (T-Terra (Erde), N-Neutralleiter, S-separated) (eigene Darstellung)

Das bedeutet, dass im gesamten System der Neutralleiter (N) und der Schutzleiter (PE) als getrennte Leiter verlegt sind (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2009). Für Krankenhäuser ist ein zentral angeordnetes RCD aufgrund ihrer weitläufigen Notstromkreise nicht empfehlenswert. Stattdessen sind mehrere RCD für das Notstromnetz einzusetzen (Bartels et al. 2004).

3.2.2 Vorgaben für die mobile Notstromversorgung

Um mobile Notstromanlagen als NEA einsetzen zu dürfen, benötigen diese einen geerdeten Sternpunkt, um ein definites Nullpotential für den sicheren Betrieb zu definieren. Die mobile Notstromanlage muss hierzu über einen herausgeführten Sternpunkt verfügen, welcher mit der Erdungsanlage des Notstromnetzes zu verbinden ist. Die Erdungsanlage und die Steckvorrichtung zum Anschluss sollten fester Bestandteil des Notstromnetzes sein (Bartels et al. 2004).

Analyse der Anwendungsszenarien

4



Unsere moderne Gesellschaft ist schon seit langem von einer stabilen Stromversorgung abhängig (Schulz et al. 2018) und der Bedarf an elektrischer Energie wird immer größer. Es ist bereits abzusehen, dass für die Erreichung der Klimaziele vor allem zwei Energieformen für unsere Energieversorgung entscheidend sein werden: Strom aus erneuerbaren Energien und grüner Wasserstoff (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2021a). Sowohl mit einer direkten Elektrifizierung, also der Substitution fossiler Energiequellen durch fossilfreien Strom, als auch mit einer indirekten Elektrifizierung, also fossilfreiem Strom nicht als direktes Substitut, sondern als Inputfaktor in industriellen Prozessen, wächst dadurch zukünftig die Bedeutung einer Stromversorgung in weiteren Bereichen der Gesellschaft an. Katastrophen, die, wie in Abschnitt 2 beschrieben, zu einem flächendeckenden oder lokalen Stromausfall führen, können aber nie vollends ausgeschlossen werden. Genau wie ein solcher Stromausfall unterschiedliche Ursachen haben kann, sind anschließend auch sehr verschiedene Notstromszenarien denkbar, welche unterschiedliche Anforderungen an die Notstromversorgung stellen. Im Folgenden sollen zwei konkrete Anwendungsszenarien beschrieben werden, für die in dieser Studie Technologien und ihre Eignung zum Einsatz als „grüne Notstromanlage“ untersucht und bewertet werden. Hierbei werden sowohl kommerziell verfügbare als auch sich in der Entwicklung befindende Lösungen betrachtet.

Bei einer mobilen Notstromversorgung handelt es sich um flexibel an unterschiedlichen Standorten einsetzbare Systeme, wie sie beispielweise vom Technischen Hilfswerk (THW) oder der Feuerwehr eingesetzt werden (Lange 2021) (Kapitel 12.1: Experteninterview). Da bei einer mobilen Notstromversorgung per Definition in den meisten Fällen ein Anfahrtsweg vorgesehen ist und damit eine gewisse Zeit zwischen Ausfall des öffentlichen Netzes und der Versorgung durch die Notstromanlage vergeht, kann auf die Betrachtung von USV in diesem Szenario verzichtet werden. Betrachtet wird stattdessen die Einsetzbarkeit der Technologien als NEA. Dies impliziert die Möglichkeit des dreiphasigen Anschlusses an ein vorhandenes Netz oder Notstromnetz und den anschließenden Betrieb. Damit übersteigen die Anforderungen die eines einfachen Notstromaggregats, das lediglich die Versorgung einphasiger Verbraucher über Schutzkontakt-Steckdosen ermöglicht.

Als Rahmenszenario zur Bewertung der Technologien für den Einsatz als NEA dient die Versorgung einer Not- und Behelfsunterkunft nach einem Hochwasser im Zuge eines Emergency-Temporary-Shelter-Moduls (ETS) des Europäischen Zivilschutzmechanismus. Nach einer solchen Katastrophe bleibt den Betroffenen oft weder Unterkunft noch ein Zuhause. Das ETS-Modul umfasst 200 Zelte für bis zu 1000 Personen, sanitäre Einrichtungen, Stromversorgung, Beleuchtungsanlagen sowie Trinkwasseraufbereitungsanlagen. Dabei sollte die NEA eine Leistung von 50 bis 75 kVA für 96 Stunden liefern können. Weitere Angaben zum Rahmenszenario werden an dieser Stelle nicht gemacht. Sollten Technologien spezielle Anforderungen haben, z. B. verfügbare Fläche, Anfahrtswege oder Gewässerzugang, wird im Zuge der Bewertung darauf hingewiesen und dies entsprechend einer allgemeinen Einsatzbereitschaft gewertet.

Bei der stationären Notstromversorgung handelt es sich um ein fest installiertes System, welches speziell zur Versorgung einer bestimmten Infrastruktur ausgelegt wird. Solche Systeme sind vor allem für KRITIS sinnvoll. Unter KRITIS werden Organisationen und Einrichtungen verstanden, deren Ausfall oder Beeinträchtigung besonders schwere Folgen für die öffentliche Sicherheit, die Versorgung der Bevölkerung oder andere dramatische Folgen haben können. Die Bundesregierung erklärte folgende Sektoren zu KRITIS (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2021):

- Energieversorgung,
- Informationstechnik und Telekommunikation,
- Transport und Verkehr,
- Gesundheit,
- Wasser,
- Ernährung,
- Finanz- und Versicherungswesen,
- Staat und Verwaltung sowie
- Medien und Kultur.

Als Rahmenszenario zur Bewertung der Technologien für den Einsatz als Notstromanlage dient die Versorgung eines Krankenhauses. Vor allem im Bereich der Gesundheit und im Speziellen von Krankenhäusern gibt es klare Vorgaben, wie eine effektive Notstromversorgung auszusehen hat. Für Krankenhäuser sind die Anforderungen besonders streng und liegen zudem in Form von VDE-Normen vor:

- DIN VDE 0100-560: Errichten von Niederspannungsanlagen, Teil 5-56: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Einrichtungen für Sicherheitszwecke,
- DIN VDE 0100-710: Errichten von Niederspannungsanlagen, Teil 7-710: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – Medizinisch genutzte Bereiche,
- DIN VDE 0558-507: Batteriegestützte zentrale Stromversorgungssysteme (BSV) für Sicherheitszwecke zur Versorgung medizinisch genutzter Bereiche und
- DIN VDE 0558-508: Zentrale Stromversorgungssysteme.

Die Eignung für eine ausschließliche oder ergänzende Notstromversorgung von Krankenhäusern lässt daher darauf schließen, dass die Lösung grundsätzlich auch in anderen KRITIS einsetzbar wäre. In diesem Anwendungsszenario liegt der Einsatz einer kombinierten Lösung aus USV und NEA nahe. Da die bedarfsbedingte Leistungsanforderung je nach Größe und Fähigkeitsspektrum des mit Notstrom zu versorgenden Krankenhauses sehr unterschiedlich ausfallen kann (Kapitel 12.1: Experteninterview), muss zur Durchführung einer Technologiebewertung ein Wert als Rahmenbedingung vorgegeben werden. Zur Bewertung wird ein fiktives Krankenhaus mit einem Notstrombedarf von 500 kVA angenommen (Blum und Sofic 2015). Eine Betriebssicherheit soll für 72 Stunden gewährleistet sein (Kapitel 12.4: Experteninterview). Auch hier werden keine weiteren Angaben zum Rahmenszenario gemacht. Sollten Technologien spezielle Anforderungen haben, z. B. verfügbare Fläche (Dachfläche) oder Gewässerzugang, wird im Zuge der Bewertung darauf hingewiesen und diese werden entsprechend einer allgemeinen Umsetzbarkeit gewertet.

Stand der Technik und Technologieanalyse

5



Im folgenden Abschnitt sollen die gängigen Technologien vorgestellt werden, welche in der Notstromversorgung eingesetzt werden. Diese dienen dann als Orientierung und Benchmark zur Bewertung ihrer klimafreundlichen Alternativen.

Eine Batterie ist zunächst ein Speicher für elektrische Energie. Batteriespeicher stellen einen eigenen Technologiebereich dar und bieten ein sehr breites Spektrum an Ausführungen und Einsatzmöglichkeiten. Im Bereich der Notstromversorgung sind vor allem zwei Einsatzmöglichkeiten von Bedeutung: erstens als Hauptbestandteil der meisten USV oder zweitens als Zwischenspeicher bei der Integration von fluktuierenden Energieerzeugern, wie PV- oder Windenergieanlagen, in ein Notstromversorgungssystem.

5.1.1 Batteriespeicher zur unterbrechungsfreien Stromversorgung

Definitionsgebend und die wichtigste Aufgabe einer USV ist die Aufrechterhaltung einer ununterbrochenen Netzversorgung der Last bei Ausfall der Netzeinspeisung (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2005, 2018b). Darüber hinaus kann eine USV, je nach Aufbau und Einbindung, vor folgenden Störungen schützen: Unterspannung, Überspannung, Frequenzabweichung und Oberschwingungen.

USV-Systeme gibt es in diversen Ausführungen, um den Anforderungen der zu versorgenden Lastarten gerecht zu werden. USV, die ein Batteriespeichersystem enthalten, gibt es als ein- oder dreiphasige Systeme sowie über einen weiten Leistungsbereich von weniger als 100 W bis zu einigen MW (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2018b).

Eine Klassifizierung findet nach der Codierung AAA-BB-CCC statt. Grundlage bildet die Leistungsklassifikation nach der Norm VDE 0558-530, wobei die Kennwerte wie folgt vergeben werden (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2018b):

- Vom Eingang abhängige Kennwerte **AAA**:
 - Offline-USV (**VFD** = Voltage and Frequency Dependent on Mains Supply), Schutz vor Netzausfall (Abbildung 2)
 - Interaktive USV (**VI** = Voltage Independent from Mains Supply), Schutz vor Netzausfall sowie dauerhaft anliegender Unterspannung oder Überspannung am Eingang (Abbildung 3)

- Online-USV (VFI = Voltage and Frequency Independent from Mains Supply) sind unabhängig von Schwankungen der (Netz-)Versorgungsspannung und -frequenz und schützen gegen nachteilige Auswirkungen derartiger Schwankungen (Abbildung 4)

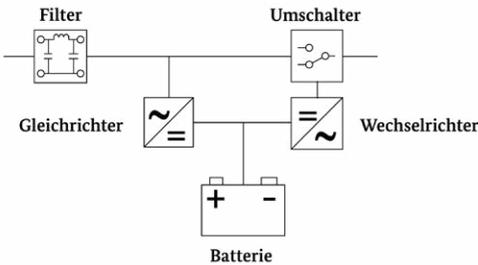


Abbildung 2: Einbindung einer Offline-USV (VFD) (eigene Darstellung)

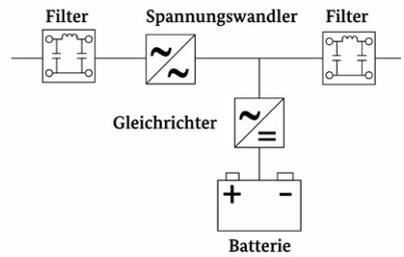


Abbildung 3: Einbindung einer Interaktiven USV (VI) (eigene Darstellung)

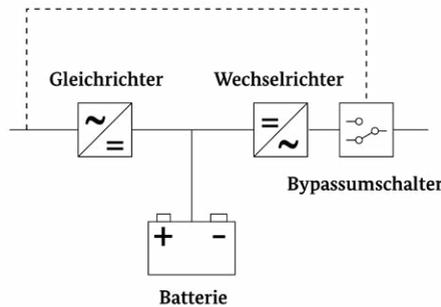


Abbildung 4: Einbindung einer Online-USV (VFI) (eigene Darstellung)

- Vom Kurvenverlauf der Spannung abhängige Kennwerte **BB** (1. Normalbetrieb, 2. Energiespeicherbetrieb):
 - Sinusförmiger Verlauf (**S** = Unter allen linearen Lastbedingungen und nichtlinearen Bezugslastbedingungen liegt eine Gesamt-Oberschwingungsverzerrung (Total Harmonic Distortion THD) von $THD \leq 8\%$ vor.)
 - Sinusförmig/nichtsinusförmig (**X** = Unter linearen Lastbedingungen werden die Spezifikationen von S erfüllt, nicht aber unter nichtlinearen Bemessungslastbedingungen.)
 - Nicht Sinusförmig (**Y** = Der Kurvenverlauf der Spannung ist nicht sinusförmig.)

- Von den dynamischen Ausgangseigenschaften CCC (1. Änderung der Betriebsart, 2. Anwendung eines linearen Lastsprunges, 3. Anwendung eines nichtlinearen Lastsprunges):
 - 1: Betriebsverhalten für empfindliche kritische Lasten
 - 2: Betriebsverhalten für die meisten kritischen Lasten zulässig
 - 3: Betriebsverhalten für die meisten allgemeinen IT-Lasten zulässig, z.B. Schaltnetzteile

Eine Online-USV mit einem sinusförmigen Spannungsverlauf bei allen Betriebsarten und dynamischen Ausgangseigenschaften der Klasse 1 würde daher mit VFI-SS-111 codiert.

5.1.2 Batteriespeicher zur Integration fluktuierender Erzeuger

Im Zuge der Energiewende wird immer häufiger auf die Erzeugung von Strom aus Windenergie und Solaranlagen gesetzt. Allerdings sind Wind und Sonne nicht immer dann verfügbar, wenn der Strom benötigt wird. Lösungsansätze zum Ausgleich von Schwankungen im Netz und zur Bereitstellung ausreichender elektrischer Leistung gibt es bereits (NEW 4.0 – Norddeutsche EnergieWende 2021). Doch dieses inhärente Problem der fluktuierenden Energieerzeugung von erneuerbaren Energien bekommt auf der Ebene der Notstromversorgung eine zusätzliche Restriktionsebene.

Einsparungspotentiale durch Lastflexibilisierung oder Sektorenkopplung von unterschiedlichen Energieversorgungsnetzen bieten nicht den ursprünglich verfügbaren Effekt, wenn das öffentliche Netz ausgefallen ist. Um die Stromproduktion und den Verbrauch auszugleichen und das Notstromnetz stabil zu versorgen, bedarf es passend dimensionierter Stromspeicher.

Erzeugt die erneuerbare Energieanlage mehr Strom als zur gleichen Zeit verbraucht wird, lädt der Speicher. Überwiegt der Strombedarf, kann, durch das Entladen des Speichers, zeitversetzt der vorher erzeugte Strom genutzt werden. Batterien arbeiten dabei als Gleichspannungsquellen (DC-Quelle). Um an ein Netz oder Wechselspannungsverbraucher angeschlossen zu werden, muss der Batteriespeicher an einen entsprechend dimensionierten Wechselrichter angeschlossen sein, wie in Abbildung 5 zu sehen ist.

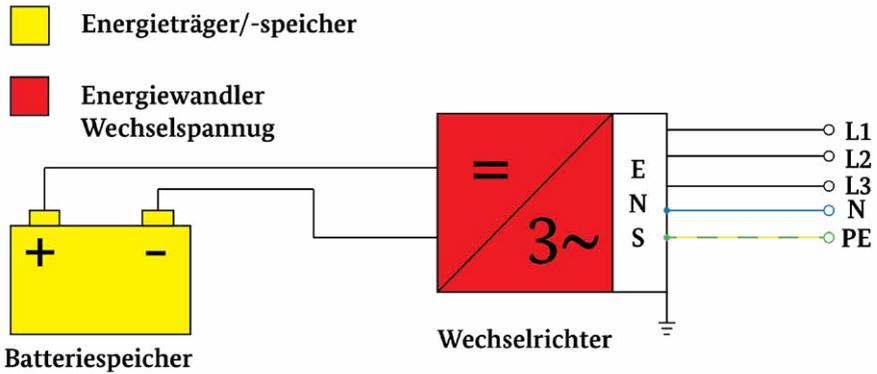


Abbildung 5: Schema zur Einbindung eines Batteriespeichers in ein Notstromsystem, ENS – Einrichtung zur Netzüberwachung mit zugeordneten Schaltorganen, später abgelöst durch BiSi – Bidirektionale Sicherheitsschnittstelle (eigene Darstellung)

Lithium-Ionen-Batterien haben sich als Speichertechnologie auf dem Markt durchgesetzt. Diese sind tiefenentladefest, zyklenfest und bieten dabei einen hohen Wirkungsgrad sowie eine hohe Energiedichte (Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen 2021).

Batteriespeichersysteme bestehen neben den eigentlichen Batteriezellen aus einem Batteriemanagementsystem, der Elektronik für das Monitoring und einem Wechselrichter. Beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien ist zu erwähnen, dass insbesondere durch den Einsatz von Materialien wie Lithium und Kobalt die Umweltverträglichkeit und damit der Einsatz als grüne Alternative teilweise in Frage gestellt werden kann. Es werden sowohl die Umweltauswirkungen als auch soziale Missstände bei der Gewinnung dieser Materialien teilweise kritisch bewertet. Durch strengere Produktionsgesetzgebung, verbessertes Recycling und die Forschung an Rohstoffalternativen soll die Batterietechnologie zukünftig umweltfreundlicher werden (Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen 2021).

Eine Parameterübersicht der unterschiedlichen Batterietechnologien kann in Fan et al. (2020) eingesehen werden, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Technologiebeispiele für Batteriespeichersysteme

Anbieter	Modell	Kapazität	Leistung	Packmaße	Gewicht
BYD	B-Box 13.8 Plus	13,8 kWh	12,8 kW	0,65 x 0,55 x 0,88 m	175 kg
TESVOLT	TPS Flex 10 ft TS HV 70/60	72 kWh	60 kW	3 x 2,44 x 2,9 m	2.976 kg
TESVOLT	TPS Flex 20 ft TS HV 280/120	288 kWh	120 kW	6,1 x 2,44 x 2,9 m	6.374 kg
TESVOLT	TPS 2 40ft HV	3.450 kWh	4 x 75 kW	6,1 x 2,44 x 2,9 m	6.374 kg
mtu	EnergyPack QS	550 kWh	400 kVA	3,3 x 2,2 x 2,9 m	8.900 kg
mtu	EnergyPack QM	1.000 kWh	800 kVA	6,06 x 2,44 x 2,9 m	19.000 kg
TESVOLT	TPS-E 20ft	1.920 kWh	-	6,06 x 2,44 x 2,9 m	-
mtu	EnergyPack QL	2.200 kWh	2.000 kVA	12,2 x 2,44 x 2,9 m	38.000 kg
TESVOLT	TPS-E 40 ft	3.450 kWh	-	12,12 x 2,44 x 2,9 m	-

Anbieter	Technologie	IT-Schnittstellen/ Kommunikation	Zyklen	Batteriewirkungsgrad (nach Effizienzleitfaden)
BYD	LiFePO4	CAN/RS485	3.650 (10 Jahre, 80%)	95,30%
TESVOLT	NMC prismatisch	Modbus TCP/IP	6.000-8.000	98% (Batterie) 98,8% (SMA STPS 60)
TESVOLT	NMC prismatisch	Modbus TCP/IP	6.000-8.000	98% (Batterie) 98,8% (SMA STPS 60)
TESVOLT	NMC prismatisch	Modbus TCP/IP	6.000-8.000	98% (Batterie) 98,8% (SMA STPS 60)
mtu	NMC	3G/4G, 100 MB/s CAT5	-	-
mtu	NMC	3G/4G, 100 MB/s CAT5	-	-
TESVOLT	NMC prismatisch	CAN 2.0, Modbus TCP/IP	6.000-8.000	98% (Batterie, DC/DC)
mtu	NMC	3G/4G, 100 MB/s CAT5	-	-
TESVOLT	NMC	CAN 2.0, Modbus TCP/IP	6.000-8.000	98% (Batterie, DC/DC)

Der Klassiker unter den Notstromaggregaten ist der Dieselgenerator. Abbildung 6 zeigt schematisch die Funktionsweise eines Dieselgenerators. Der Generator wird dabei durch einen Verbrennungsmotor mit Kraftstofftank betrieben, der abhängig von der Motorleistung Strom erzeugt. Ein Nachtanken im Betrieb ist möglich.

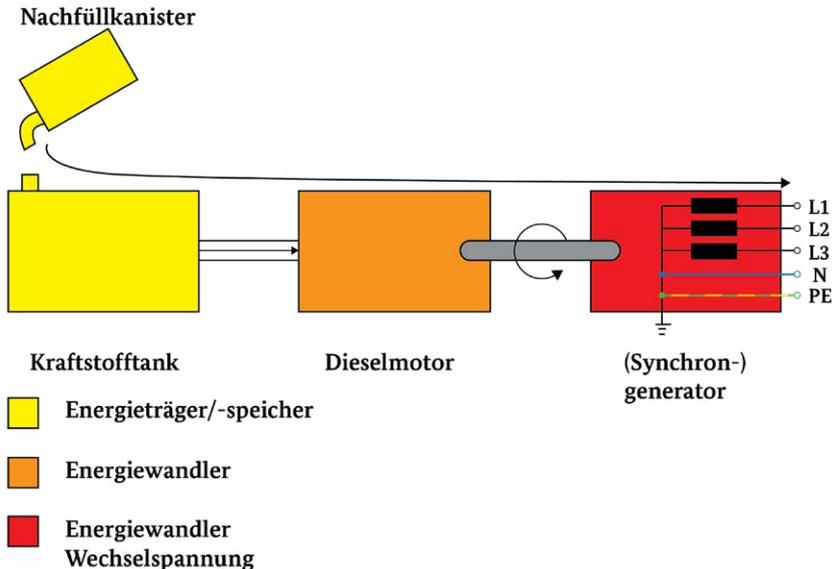


Abbildung 6: Schema und Energieflussrichtung eines Dieselgenerators (eigene Darstellung)

Den Dieselgenerator zeichnen seine robuste Bauart, eine einfache Bedienbarkeit und ein betriebssicherer, leicht verfügbarer Kraftstoff aus. Er ist weit verbreitet in KRITIS und als stationäres System in der Lage, innerhalb von 7 bis 12 Sekunden die Notstromversorgung aufzunehmen (Schulz et al. 2018).

Man unterscheidet zwischen schnell und langsam laufenden Generatoren (3.000 bzw. 1.500 U/min). Die schnelllaufenden Typen weisen grundsätzlich eine kürzere Lebensdauer auf, sind aufgrund der Materialeinsparungen aber auch kostengünstiger (MITTRONIK GmbH 2021). Dieselgeneratoren existieren in nahezu allen

Leistungsklassen und sind sowohl als dreiphasige als auch als einphasige Systeme verfügbar. Einphasiges Einspeisen in ein Hausnetz ist grundsätzlich möglich. Allerdings muss bei der Installation des Notstromnetzes darauf geachtet werden, den Neutralleiter nicht zu überlasten. Dreiphasige Drehstromverbraucher wie Waschmaschinen oder Industrienähmaschinen können damit nicht betrieben werden (MITTRONIK GmbH 2021).

Neben dem Einsatz von Dieselgeneratoren ist auch der Einsatz von Generatoren mit Benzinmotor möglich. Diese sind leiser, leichter, günstiger und starten auch bei sehr geringen Temperaturen, wodurch sie vor allem für mobile Lösungen interessant sein können. Allerdings ist ein Einsatz von Generatoren mit Benzinmotor aufgrund der Explosionsgefahr des Kraftstoffs nur außerhalb von Gebäuden möglich. Damit sind diese ungeeignet für die stationäre Notstromversorgung. Zusätzlich gelten Dieselgeneratoren als betriebssicherer und sparsamer (MITTRONIK GmbH 2021).

Beispielhaft wurden in Tabelle 2 Dieselgeneratoren und deren Parameter in den geforderten Leistungsklassen, gem. Kapitel 4, aufgeführt.

Tabelle 2: Technologiebeispiele zur Notstromversorgung mit einem Dieselgenerator

Anbieter	Modell	Dauerleistung	Preis	Packmaße	Gewicht	Kraftstoffverbrauch	Tankvolumen
HO-MA	H50-2A-IV	40 kW/50 kVA	-	230 x 105 x 145 cm	1.296 kg	10,2 l/h (80% Last)	300 l
GEKO	BL60000 ED-S/ KEDARSS	60 kVA	15.156,79 €	198 x 92,4 x 120 cm	1.050 kg	7,6; 10,8; 14,6 l/h (50; 75; 100% Last)	90 l
Pramac	GSW 80P	62,4 kW/78 kVA	-	228,5 x 92 x 146,5 cm	1.141 kg (trocken)	13,5 l/h (75% Last)	209 l
Hartner	HART 80P	64 kW/80 kVA	-	230 x 105 x 155 cm	1.325 kg (trocken)	14 l/h (75% Last)	120 l
HO-MA	H100-2A-IV	79 kW/100 kVA	-	275 x 110 x 176 cm	1.660 kg	16,2 l/h (80% Last)	288 l
DWK	Mietaggregat 500 kVA	400 kW/500 kVA	-	610 x 247 x 288 cm	vollgetankt: 13.380 kg leer: 11.320 kg	100 l/h (100% Last)	min. 2.130 l Zusatztanks bis 11.500 l
ENDRESS	ESE 510 VV / AS	404,7 kW/505,9 kVA	87.084,20 €	395,1 x 143,8 x 208,5 cm	4.100 kg	70,4 l/h (75% Last)	636 l
POLYMA	H 0250 W 65 SA05-5	218 kW	-	835 x 255 x 330 cm	9.900 kg	55 l/h (100% Last)	800 l
TESVOLT	TPS-E 40 ft	3.450 kWh	-	12,12 x 2,44 x 2,9 m	-	NMC	CAN 2.0, Modbus TCP/IP

Vorstellung grüner Alternativtechnologien zur Notstromversorgung

6



Im folgenden Kapitel werden mögliche Alternativtechnologien zur Notstromversorgung aus regenerativen Quellen vorgestellt. Dabei werden die Technologien Biomasse, Wasserstoff-Brennstoffzelle, Photovoltaik, Wasserkraft und Windenergie in ihren Grundzügen erläutert und mögliche Anlagen zur elektrischen Energieversorgung vorgestellt.

Der energietechnisch genutzte Begriff der „Biomasse“ umschreibt sowohl pflanzliche als auch tierische Erzeugnisse, welche zur Gewinnung von elektrischer Energie, Heizenergie oder sogenannten Biokraftstoffen genutzt werden können. Beispielhaft lassen sich Reste aus der Land- und Forstwirtschaft und den damit verbundenen Wirtschaftszweigen nennen (Konstantin 2017). Auch Feldfrüchte wie Energiemais werden speziell zur Weiterverwertung als Biomasse angebaut (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen 2012). Grundsätzlich liegt energietechnisch relevante Biomasse in gasförmiger, flüssiger und fester Form vor und kann mit Hilfe von Umwandlungsprozessen in andere Energieformen gewandelt werden (Kaltschmitt et al. 2009). Dabei wird zwischen

- thermo-chemischen,
- physikalisch-chemischen und
- bio-chemischen

Umwandlungen unterschieden (Konstantin 2017).

Mit einer thermo-chemischen Umwandlung kann Biomasse entweder durch eine direkte vollständige Verbrennung in thermische Energie oder durch die Zuführung von Wärme in feste, flüssige oder gasförmige Energieträger gewandelt werden. Zur thermo-chemischen Umwandlung zählen eine einfache Aufheizung, Pyrolyse, Biomassevergasung oder die Oxidation. Bei einer Verbrennung kann entweder die Wärmeenergie direkt genutzt oder mit Hilfe eines Dampfkraftwerkes in elektrische Energie gewandelt werden (Kaltschmitt et al. 2009).

Bei physikalisch-chemischen Umwandlungsprozessen wird die Extraktion von Ölpflanzen durch mechanisches Pressen erzielt. Die gewonnenen Pflanzenöle und -fette können anschließend als Brennstoff in Verbrennungsmotoren genutzt werden, müssen allerdings durch eine Umesterung an die Eigenschaften von konventionellen Dieselmotoren angepasst werden (Kaltschmitt et al. 2009).

Die bio-chemische Umwandlung von Biomasse erfolgt mit Hilfe von Mikroorganismen zu verschiedenen Sekundärenergieträgern. Dabei wird zwischen der Vergärung unter Sauerstoffabschluss, der Kompostierung mit Luftsauerstoffzufuhr und der Alkoholgärung mittels Hefe oder Bakterien unterschieden. Endprodukte sind

Biogas oder Bioethanol, die sich in Gaskraftwerken oder Blockheizkraftwerken (BHKW) einsetzen lassen. Die Beschaffenheit von Biogas ist je nach Ausgangsstoff und Produktionsanlage unterschiedlich, wobei die Bestandteile Methan, Kohlenstoffdioxid, Stickstoff, Sauerstoff, Schwefelwasserstoff, Wasserstoff und Ammoniak immer enthalten sind. Der Methangehalt liegt häufig bei einem Wert von ca. 60 %. Bevor das Biogas in Kraftwerken eingesetzt wird, muss dieses aufbereitet werden, da sonst Bauteile der Kraftwerke beispielsweise durch Korrosion beschädigt werden können (Kaltschmitt et al. 2009).

Generatoren auf Basis von Biokraftstoffen haben den großen Vorteil, dass die Leistungsdichte mit der von Generatoren mit konventionellem Verbrennungsantrieb vergleichbar ist. Der Anbau von Nutzpflanzen speziell für die Produktion von Biokraftstoffen steht hingegen in der Kritik, da die Nutzflächen auch zur Produktion von Nahrungsmitteln verwendet werden könnten. Darüber hinaus werden häufig Regenwälder zur Erschließung neuer Anbauflächen gerodet. Auch die Lagerung von Biokraftstoffen ist anspruchsvoller, da Alterungsprozesse oder der enzymatische Abbau insbesondere von Rapsölen zu Verunreinigungen führen können.

Bei Kraftstoffen auf Basis von Biomasse handelt es sich vor allem um Produkte, die fossile Energieträger ersetzen können. Einige, wie beispielsweise Biogas und Biodiesel, sind dazu geeignet, fossile Brennstoffe zu ersetzen. Andere lassen sich in Brennstoffzellen umsetzen, um Strom zu erzeugen. Die wohl bekanntesten auf Basis von Biomasse hergestellten Energieträger sind Biodiesel, Bioethanol und Biogas.

Biodiesel ist chemisch gesehen Fettsäuremethylester und kommt in der Verwendung fossilem Diesel gleich. Unter anderem kann konventioneller Diesel nach DIN EN 590 mit bis zu 7 % Biodiesel versetzt werden. Biodiesel stellt allerdings die Herausforderung, dass dieser in Dieselmotoren nur als 100 % biogener Kraftstoff genutzt werden kann, wenn diese ein gegenüber Biodiesel beständiges Kraftstoffsystem aufweisen und für den Biodieselsbetrieb zugelassen sind. Bei einer Nutzung von Biodiesel in Motorsystemen, die vorher mit fossilem Diesel betrieben wurden, kann es zudem aufgrund der lösungsmittelähnlichen Eigenschaften des Biodiesels dazu kommen, dass sich gebildete Rückstände lösen und den Kraftstofffilter verstopfen. Zudem kann sich Biodiesel im Motoröl anreichern, weshalb vom Hersteller beim Betrieb mit Biodiesel in der Regel verkürzte Ölwechselintervalle vorgegeben werden (Kaltschmitt et al. 2009). Es bestehen bereits Verfahren, die Eigenschaften von Biodiesel denen von fossilem Diesel anzupassen. Diese beschränken sich jedoch bisher ausschließlich auf den Labormaßstab (Knauer 2017). Aufgrund der Vergleichbarkeit von fossilen Diesel- oder Biodiesel-Generatoren wird Biodiesel bei der Technologiebewertung nicht separat betrachtet.

Bioethanol wird ebenfalls als Brennstoff verwendet und zu 5 % Super und zu 10 % Super E10 beigemischt. Für den Einsatz von reinem Bioethanol sind auf Benzin ausgelegte Ottomotoren allerdings ungeeignet, da diese unterschiedliche Luft-Kraftstoffverhältnisse benötigen und nicht alle in Benzinmotoren genutzten Materialien gegenüber Bioethanol beständig sind. Zudem weist Bioethanol einen höheren Dampfdruck als Benzin auf, weshalb die Temperatur der angesaugten Luft zum Starten von Vergasermotoren nicht unter 10 °C liegen darf (Kaltschmitt et al. 2009). Aufgrund der auftretenden Schwierigkeiten bei der Nutzung von Bioethanol wird dieses bei der Technologiebewertung nicht betrachtet.

Biogas lässt sich aus der Fermentation von unterschiedlichen landwirtschaftlichen Roh- und Reststoffen gewinnen und kann in Gas-Otto-Motoren oder Selbstzündmotoren in mechanische Energie umgewandelt werden, wodurch ein Stromgenerator angetrieben wird, siehe Abbildung 7. Dieses Prinzip wird beispielsweise häufig in Biogasanlagen genutzt, um aus dem produzierten Gas elektrische Energie zu gewinnen. Bei der Nutzung von Verbrennungsmotoren lässt sich zudem die Abwärme in Wärmenetzen nutzen. Diese Nutzung von mechanischer Energie und Abwärme wird als Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und die entsprechenden Anlagen, die diese KWK nutzen, als BHKW bezeichnet. Damit Biogas in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden kann, muss dieses allerdings häufig aufbereitet werden, um Bestandteile zu entfernen, welche die Funktion des Motors beeinträchtigen oder diesen beschädigen (Kaltschmitt et al. 2009). Hierbei ist auch ein Aufkonzentrieren des im Biogas enthaltenen Methans möglich, wodurch sich Biomethan herstellen lässt (VERBIO Vereinigte BioEnergie AG 2021). Biomethan entspricht den Anforderungen an Erdgas und kann dieses in der Nutzung ersetzen (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2021). So lässt sich Biomethan ins Erdgasnetz einspeisen und in für Erdgas vorgesehenen Motoren nutzen (CNG-Club e.V. 2021). Dabei gibt es bereits eine große Anzahl an Anlagen, die Erdgas nutzen, um Strom bereitzustellen. Auch bei diesen Anlagen handelt es sich meistens um BHKWs, die ebenfalls als KWK-Anlagen die auftretende Abwärme nutzen.

Aufgrund des häufigen Einsatzes von Gas-Verbrennungsmotoren werden diese in der Technologiebewertung unter dem Punkt Biomasse bewertet. Hierbei werden vor allem BHKWs betrachtet, die für die KWK ausgelegt sind. Aufgrund der Substituierbarkeit von Erdgas und Biomethan und der Möglichkeit, Biomethan mit hoher Energiedichte gasförmig unter hohem Druck als Bio-CNG (Compressed Natural Gas) oder tiefkalt und flüssig als Bio-LNG (Liquified Natural Gas) zu lagern, wird dieser Kraftstoff hier bewertet. In Tabelle 3 werden Technologiebeispiele für die Verstromung von Erd- und Biogas zusammengefasst.

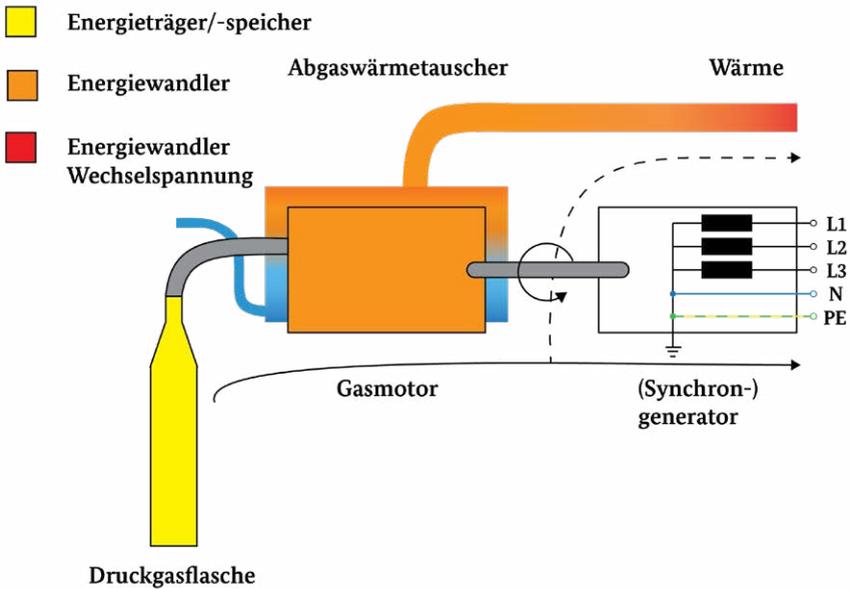


Abbildung 7: Schema und Energieflussrichtung eines BHKW mit Druckgasflaschenbetankung (eigene Darstellung)

Tabelle 3: Technologiebeispiele zur Verstromung von Biogas und Erdgas

Anbieter	Modell	Dauerleistung	Packmaße	Gewicht	Elektrischer Wirkungsgrad	Kraftstoff
GIESE Energie- und Regeltechnik	Energator-BHKW Typ GB49-90	49 kW	305 x 118 x 152 cm	2.100 kg	29,6%	Erdgas
42technology	Smartblock 50	50 kW	229 x 96 x 171 cm	2.020 kg	36,4%	Erdgas
SOKRATHERM GmbH	GG 50	50 kW	220 x 90 x 183 cm	1.950 kg	34,5%	Erdgas
2G Energy AG	g-box 50plus	50 kW	-	-	34,5%	Erdgas
Buderus/Bosch Thermotechnik GmbH	Micro 50	50 kW	260 x 178 x 173 cm	-	34,3%	-
SOKRATHERM GmbH	FG 50	51 kW	250 x 90 x 180 cm	2.460 kg	32,1%	Klärgas/ Biogas
Buderus/Bosch Thermotechnik GmbH	Flexi 80	70 kW	365 x 110 x 190 cm	-	34,7%	-

Anbieter	Modell	Dauerleistung	Packmaße	Gewicht	Elektrischer Wirkungsgrad	Kraftstoff
SOKRATHERM GmbH	GG 70	71 kW	250 x 90 x 183 cm	2.460 kg	35,3%	Erdgas
SOKRATHERM GmbH	FG 73	75 kW	290 x 90 x 200 cm	3.080 kg	35,5%	Klärgas/ Biogas
2G Energy AG	Agenitor 404 bt 80-1	75 kW	-	-	37,0%	Biogas
42technology	Smartblock 75	75 kW/84 kVA	264 x 96 x 171 cm	2.320 kg gesamt 2.600 kg	35,8%	Erdgas
SOKRATHERM GmbH	FG 95	95 kW	290 x 90 x 200 cm	3.080 kg	36,8%	Klärgas/ Biogas
SOKRATHERM GmbH	GG 100	100 kW	290 x 90 x 200 cm	3.220 kg	34,7%	Erdgas
COMUNA-metall Vorrichtung- und Maschinenbau GmbH	5450-03	100 kW	273 x 117 x 135 cm	3.300 kg	34,2%	Erdgas/ Propan/ Klärgas/ Biogas
2G Energy AG	Agenitor 404 bt 80-1	100 kW	-	-	38,4%	Erdgas
2G Energy AG	Agenitor 412 ct80-0	450 kW	-	-	41,1%	Biogas
SOKRATHERM GmbH	FG 530	528 kW	370 x 150 x 260 cm	7.290 kg	39,1%	Klärgas/ Biogas
Buderus/Bosch Thermotechnik GmbH	Flexi530	528 kW	518 x 216 x 272 cm	-	39,3%	-
SOKRATHERM GmbH	GG 530	532 kW	370 x 150 x 260 cm	7.290 kg	40,6%	Erdgas
2G Energy AG	Avus 500plus ct80-1	550 kW	-	-	42,6%	Erdgas

Wasserstoff gilt als ein wichtiger Bestandteil zur Erreichung der Klimaziele der Bundesrepublik Deutschland und der Europäischen Union (EU) und rückte in den letzten Jahren deutlich stärker in den Fokus. Die Herstellung von Wasserstoff kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Die gängigsten Herstellungsarten sind Elektrolyse, Dampfreformierung und Methanpyrolyse. Diese werden im Folgenden erläutert (Joest et al. 2009).

Bei der Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyseverfahren wird in einer Anlage Wasser (chemisch: H_2O) in seine Bestandteile Wasserstoff (chemisch: H_2) und Sauerstoff (chemisch: O_2) zerlegt. Die Alkali-Elektrolyse ist dabei die etablierteste Form der Wasserstoffherstellung, gefolgt von der Polymer-Exchange-Membran (PEM)-Elektrolyse, welche sich derzeit am Markt etabliert. Die Hochtemperatur-elektrolyse mittels Solid Oxide Electrolyzer Cell (SOEC) befindet sich derzeit noch in der Entwicklung, birgt jedoch großes Potential durch ihren hohen Wirkungsgrad. Je nach seiner Herkunft wird Wasserstoff mit bestimmten Farbcodes beschrieben. Wasserstoff aus regenerativen Quellen wird als grüner Wasserstoff, solcher aus der Herstellung aus fossilen Quellen als grauer Wasserstoff bezeichnet. Wird die Elektrolyse mittels elektrischer Energie aus Kernkraftwerken betrieben, spricht man von pinkem Wasserstoff (Töpler und Lehmann 2017). Türkiser Wasserstoff entsteht durch ein thermisches Verfahren, bei dem Erdgas mittels Methanpyrolyse in Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten wird. Blauer Wasserstoff resultiert aus der Dampfreduzierung von Erdgas. Das Erdgas wird dabei in Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid (CO_2) gespalten (EWE Aktiengesellschaft 2021).

Die weltweit dominierende Herstellungsmethode für Wasserstoff ist die Dampfreformierung. Bei diesem Verfahren wird Erd- oder Biogas mit Hilfe von Hitze in Wasserstoff und CO_2 umgewandelt. Je Tonne Wasserstoff entstehen dabei zehn Tonnen CO_2 , die entweder in die Atmosphäre entlassen oder durch die Verfahren Carbon Capture and Storage (CCS) bzw. Carbon Capture and Usage (CCU) abgetrennt werden können. Durch die Abscheidung des CO_2 wird die Produktion als treibhausgasneutral bilanziert und es wird von blauem Wasserstoff gesprochen. Wird das CO_2 nicht abgetrennt, zählt dies ebenfalls als Herstellung von grauem Wasserstoff (Hebling et al. 2019).

Bei der Methanpyrolyse wird Erdgas mittels thermischer Spaltung zu sogenanntem türkisen Wasserstoff zerlegt. Der Spaltungsprozess verläuft ohne die Zugabe von Sauerstoff und hat lediglich festen Kohlenstoff (C) als Nebenprodukt zur Folge. Der feste Kohlenstoff kann anschließend in Industrieprozessen weiterverarbeitet werden (Hebling et al. 2019).

Ähnlich wie bei der Erzeugung von Wasserstoff gibt es auch bei der Stromerzeugung mit Wasserstoff-Brennstoffzellen verschiedene Technologien, die je nach Leistungsklasse oder Anwendungsfall bevorzugt eingesetzt werden. Derzeit am häufigsten verbreitet ist die Polymer-Exchange-Membran (PEM)-Brennstoffzelle, welche in Abbildung 8 dargestellt ist. Sie zeichnet sich durch eine vergleichsweise niedrige Betriebstemperatur von ca. 80 °C sowie ein flexibles Verhalten mit schnellen Lastwechseln, guten Kaltstartfähigkeiten und einer kompakten Bauform aus. Neben stationären Anwendungen ist die PEM-Brennstoffzelle insbesondere auch für die Nutzung in mobilen Anwendungen gut geeignet. In Tabelle 4 sind Technologiebeispiele zur Stromerzeugung durch PEM-Brennstoffzellen dargestellt. Die Technologie der Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) arbeitet wie bei der Wasserstoffherzeugung ebenfalls mit hohen Temperaturen, was einer schnellen Kaltstartfähigkeit widerspricht. Grundsätzlich sind SOFC für den Einsatz in stationären Anwendungen vorzuziehen. Bei einer zusätzlichen Nutzung der Abwärme lässt sich der Gesamtwirkungsgrad weiter erhöhen (Sharaf und Orhan 2014).

Tabelle 4: Technologiebeispiele zur Stromerzeugung durch PEM-Brennstoffzellen

Anbieter	Modell	Technologie	Ausgangsleistung	Maße	Gewicht	Nennspannung
EFOY	Jupiter 2.5	PEM	2,5 kW	53,6 x 48,3 x 31,1 cm	27 kg	48 VDC
Nedstack	FCS 7-XXL	PEM	6,8 kW	36,4 x 19,6 x 28,8 cm	27 kg	48 VDC
Ballard	FCGen-H2PM	PEM	9 kW	60,0 x 60,0 x 220 cm	97 kg	48 VDC
Proton Motor	PM Module S8	PEM	8,4 kW	78,5 x 46,5 x 30,8 cm	79 kg	56 - 110 VDC
Ballard	ClearGen	PEM	1.000 kW	2,4 x 2,9 x 9,0 m	40.000 kg	380 - 480 VAC
Fuji Electric Group	HyCogeneration	PEM	100 kW	3,4 x 5,9 x 2,2 m	15.000 kg	400 VAC
Hydrogenics Gorp	FuelCell MW Power Plant	PEM	1.000 kW	2,4 x 2,9 x 12 m	320.000 kg	380 - 480 VAC

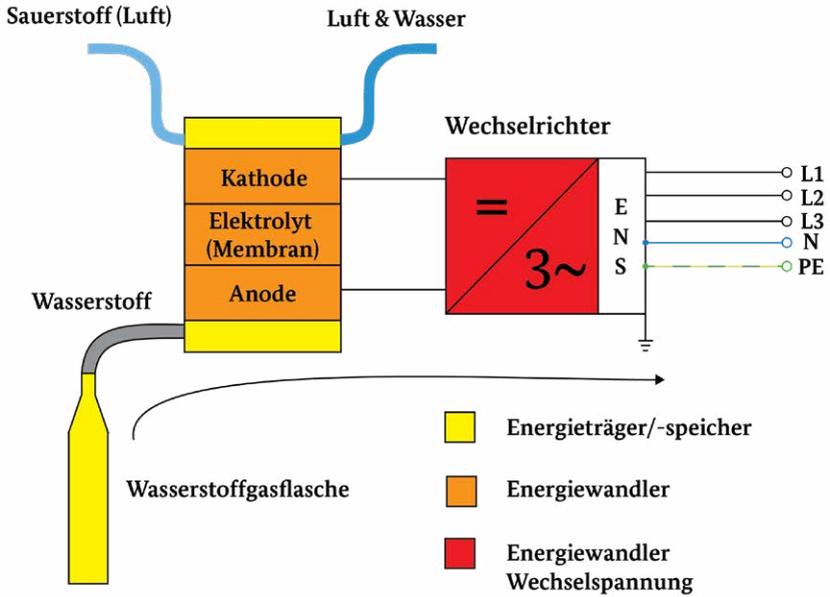


Abbildung 8: Schema und Energieflussrichtung eines Brennstoffzellensystems (eigene Darstellung)

Als Photovoltaik (PV) wird die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie mittels Solarzellen bezeichnet. Die Umwandlung kann dabei aus direkter und indirekter Strahlung erfolgen. PV-Zellen bestehen aus Halbleitern, welche die durch elektromagnetische Strahlung zugeführte Energie in freie Ladungsträger, also elektrische Energie wandeln. Die Leistung von PV-Modulen wird üblicherweise in Kilowatt Peak (kW_p) angegeben, wodurch eine Vergleichbarkeit der Module ermöglicht werden soll. Dabei wird die Stromproduktion in Laborversuchen unter definierten Vorgaben gemessen. Da die einzelnen PV-Zellen nur eine geringe Spannung erzeugen, werden diese in Reihe zu Modulen zusammengeschaltet. Die Module können anschließend parallel verschaltet werden, sodass eine frei skalierbare Anlage je nach Leistungsbedarf aufgebaut werden kann.

Am Markt haben sich derzeit zwei unterschiedliche Grundarten von PV-Zellen etabliert: kristalline Zellen und Dünnschichtmodule. Zu den kristallinen Zellen zählen monokristalline und polykristalline Zellen. Monokristalline Zellen zeichnen sich durch eine periodische Anordnung der Kristalle in nur eine Richtung aus. Ihre Herstellung ist anspruchsvoller und dadurch kostenintensiver. Polykristalline Zellen werden hingegen zunächst in Blöcke gegossen, was eine zufällige Größe und Orientierung der Kristallstrukturen und häufigere Defekte zur Folge hat. Anschließend werden die Blöcke in dünne Scheiben gesägt. Die günstigeren Herstellungskosten von polykristallinen PV-Zellen werden mit einem etwas geringeren Modulwirkungsgrad von 12 bis 16 % erkauft, gegenüber den monokristallinen Zellen mit einem Modulwirkungsgrad von 14 bis 20 %. Die Leistungsdichte liegt bei einer monokristallinen Zelle bei ca. $210 \text{ W}_p/\text{m}^2$ und bei polykristallinen Zellen bei ca. $160 \text{ W}_p/\text{m}^2$ (Mertens 2020). Dünnschichtzellen haben gegenüber den kristallinen Zellen geringere Herstellungskosten und wurden unter anderem aus einem Mangel an kristallinem Silizium entwickelt. Amorphe Siliziumzellen sind dabei die günstigsten Zellen, haben jedoch den geringsten Modulwirkungsgrad von 7 bis 9 %. Ebenfalls günstig in der Herstellung, aber mit besserem Wirkungsgrad, sind Kupfer-Indium-Selen Zellen. Ihr Modulwirkungsgrad liegt zwischen 10 und 13 %. Cadmiumtellurid-Zellen zeichnen sich ebenfalls durch einen günstigen Herstellungsprozess aus. Durch ihren darüber hinaus hohen Modulwirkungsgrad von 11 bis 14 % machen sie den kristallinen Zellen die größte Konkurrenz. Aktuelle Forschungsergebnisse haben einen Wirkungsgrad von 18,7 % im Labormaßstab gezeigt (Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen 2021).

Die Leistungsdichte der Dünnschichtmodule beträgt für amorphe Siliziumzellen ca. $63 \text{ W}_p/\text{m}^2$, für Kupfer-Indium-Selen-Zellen ca. $70 \text{ W}_p/\text{m}^2$ und für Cadmiumtellurid Zellen ca. $142 \text{ W}_p/\text{m}^2$ (Konstantin 2017, Pavlovic 2020).

Die Lebensdauer von kristallinen PV-Zellen wird in der Regel auf ca. 30 Jahre geschätzt, wobei viele Hersteller eine Leistungsgarantie von 80 % nach 25 Jahren abgeben. Die Lebensdauer von Dünnschichtmodulen liegt nach einigen Angaben bei ca. 20 bis 25 Jahren, wobei der höchste Wirkungsgradverlust von ca. 25 % bereits in den ersten Jahren auftritt. Diese Alterung wird häufig in die Nennleistung mit einberechnet (Greenhouse Media GmbH 2021).

Energieerzeugung auf Basis von Sonnenlicht gehört zu den sogenannten fluktuierenden Stromerzeugungsarten, da die Erzeugung mindestens von Jahres- und Uhrzeit und zusätzlich von der Sonnenstrahlung, also dem Wettergeschehen abhängig ist. Auch hierbei muss für die Zeit von unzureichender Strahlung eine Überbrückungsmöglichkeit in Form von Energiespeichern oder anderen Energieerzeugungsarten zur Verfügung stehen. Je nach örtlichen Gegebenheiten lassen sich stationäre PV-Anlagen auf Dächern installieren. Mobile Anlagen benötigen je nach Leistungsbedarf eine entsprechende Aufstellfläche sowie Personal und Zeit, um die Anlage aufzubauen. Eine mobile Anlage mit $3,2 \text{ kW}_p$ lässt sich nach Herstellerangaben mit zwei Personen in nur 10 Minuten aufbauen (PV4Life GmbH 2017).

Eine Kombination aus Energiespeicher und Photovoltaiksystem kann durch die Energieeinspeisung die Versorgungszeit prinzipiell verlängern oder bei gegebenen Voraussetzungen die benötigte Energiespeicherkapazität verringern. Dabei müssen die Nutzungszeiträume hinreichend lang sein, um sicherzustellen, dass auch bei fluktuierender Verfügbarkeit der Solarenergie mindestens in Teilzeiträumen eingespeist werden kann. Hierbei wird stets eine konservative Betrachtung gewählt, da das Gesamtsystem (siehe Abbildung 9) auch unter den schlechtesten Bedingungen die Mindestanforderungen erfüllen muss. Technologiebeispiele für PV-Module sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Technologiebeispiele für PV-Module unterschiedlicher Leistungsklassen

Anbieter	Modell	Nennleistung	Zellentyp	Maße (verstaüt)	Wirkungsgrad	Gewicht
LG	MONO X* Plus-SW 1	370 W _p	Monokristallin half cut	1.776 x 1.052 x 40 mm	19,80%	19,4 kg
LG	MONO X* Plus-SW 2	455 W _p	Monokristallin half cut	2.115 x 1.052 x 40 mm	20,40%	22,3 kg
LG	LG390N1C-E6	390W _p	Mono-kristallin / N-Typ	1.768 x 1.042 x 40 mm	21,20%	18,5 kg
targray	DANN-144-BF23-400W	400 W _p	Monocrystalline	2.008 x 1.008 x 40 mm	19,77%	23,3 kg
Trinasolar	Vertex BIFACIAL DUAL GLASS	712 W _p	Mono-crystalline BIFACIAL	2.384 x 1.303 x 35 mm	21,40%	38,7 kg
SunPower	Maxeon 3	430 W _p	Monocrystalline	1.812 x 1.046 x 40 mm	22,70%	21,2 kg

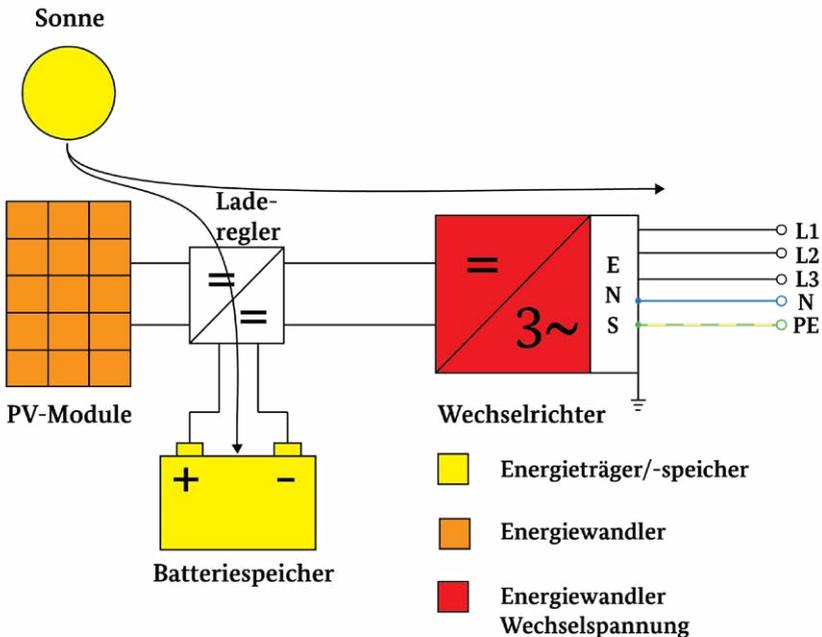


Abbildung 9: Schema und Energieflussrichtung eines PV-Systems (eigene Darstellung)

Wasserkraft ist die Nutzung kinetischer Energie, die durch den schnellen Fall oder Fluss von Wasser entsteht, um elektrische Energie mit Hilfe von Turbinen zu erzeugen. Seit Jahrhunderten ist die Nutzung von Wasserkraft bereits etabliert und gilt in der heutigen Zeit als Alternative zur fossilen Energieerzeugung. Dennoch stellen die meist massiven Bauwerke einen schweren Eingriff in natürliche und zivile Lebensräume dar.

Grundsätzlich werden Wasserkraftwerke in die vier Kategorien Speicher-, Pumpspeicher-, Laufwasser- und Gezeitenkraftwerke unterteilt. Hauptbestandteil eines Speicherkraftwerks (siehe Abbildung 10) ist eine Stauanlage, die einen Fluss entweder natürlich oder künstlich durch einen Staudamm bzw. eine Staumauer zu einem Speichersee aufstaut. Das somit gespeicherte Wasser kann je nach Bedarf durch Druckleitungen den zur Energieerzeugung genutzten Turbinen zugeführt werden. Die entstandenen Stauseen werden darüber hinaus wasserwirtschaftlich zur Trinkwasserversorgung oder zum Schutz vor Hochwasser eingesetzt. Pumpspeicherkraftwerke werden vorrangig zur Speicherung überschüssiger elektrische Energie eingesetzt. Wasser wird mit Hilfe von Pumpen in ein in größerer Höhe liegendes Reservoir gepumpt und dort zwischengespeichert. Wird zusätzliche elektrische Energie benötigt, kann analog zum Speicherkraftwerk das Wasser wieder abgelassen und die gespeicherte Energie in elektrische Energie gewandelt werden. Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke sind unabhängig von kurz- und mittelfristigen Wettergeschehnissen und werden deshalb vorrangig zur flexiblen Versorgung von Spitzenlasten eingesetzt.

Laufwasserkraftwerke nutzen die Fließgeschwindigkeit von Flusswasser, welches durch eine Turbine geleitet wird und so mittels eines Generators elektrische Energie erzeugt. Häufig werden zusätzliche Wehranlagen errichtet, um die Fallhöhe des Wassers zu erhöhen und eine konstante Fließgeschwindigkeit durch die Turbine zu gewährleisten. Häufig werden Flusskraftwerke parallel zu Schleusenanlagen errichtet, um Wasserwege schiffbar zu machen. Gezeitenkraftwerke nutzen die natürliche Bewegung des Wasserspiegels durch Ebbe und Flut und haben eine ähnliche Funktionsweise wie Laufwasserkraftwerke. Sie werden hauptsächlich in Küstennähe in Meeresarmen und Meerengen verbaut und müssen dementsprechend einen erhöhten Korrosionsschutz aufweisen (Steinhart et al. 2019).

Der Bau von Wasserkraftwerken erfordert jahrelange hydrologische Untersuchungen zur Erkundung des Abflussverhaltens. Darüber hinaus müssen in Wasserrechtsverfahren, ökologischen Vorprüfungen und naturfachlichen Planungen die umfangreichen Eingriffe in die Umwelt betrachtet und mit Hilfe geeigneter Maßnahmen abgemildert oder ausgeglichen werden. Insbesondere deshalb lohnt sich neben dem Neubau die Modernisierung oder Reaktivierung von Wasserkraftwerken. Eine Studie zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Erzeugung elektrischer Energie aus Wasserkraft hat ergeben, dass bis zum Jahr 2050 durch geringere Niederschlagsmengen und höhere Verdunstung mit einer Mindererzeugung von bis zu 4 % gerechnet werden muss (Bundesverband Deutscher Wasserkraftwerke e.V. 2021, Wolf-Schumann und Dumont 2012).

Mobile Wasserkraftwerke sind derzeit kaum am Markt zu finden. Das Unternehmen Smart Hydro Power hat eine mobile Turbine entwickelt, die dezentral in Flüssen eingesetzt werden und eine elektrische Leistung von bis zu 5 kW erzeugen kann (Smart Hydro Power GmbH 2021). Das jeweilige Prinzip ist in Abbildung 10 und Abbildung 11 gezeigt, für mobile Wasserkraftwerke sind in der Tabelle 6 Beispiele zusammengefasst.

Tabelle 6: Technologiebeispiele für mobile Wasserkraftwerke

Anbieter	Modell	Nennleistung	Packmaße	Gewicht	Anwendungsbereich	Nennfließgeschwindigkeit
Smart Hydro Power	Monofloat	5 kW	3,1 x 1,6 x 2,0 m	380 kg	Fluss	2,8 m/s
Smart Hydro Power	Free Stream	5 kW	2,6 x 1,1 x 1,1 m	300 kg	Kanal	3,1 m/s

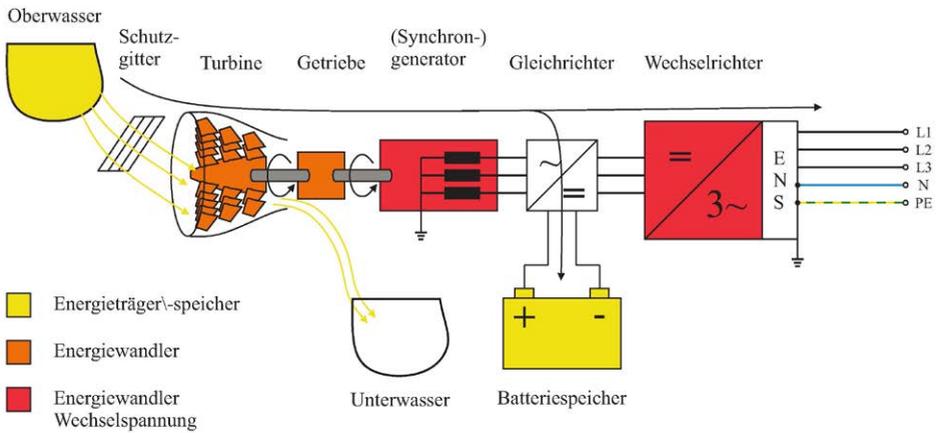


Abbildung 10: Schema und Energieflussrichtung eines stationären Speicherkraftwerks mit Turbinengenerator

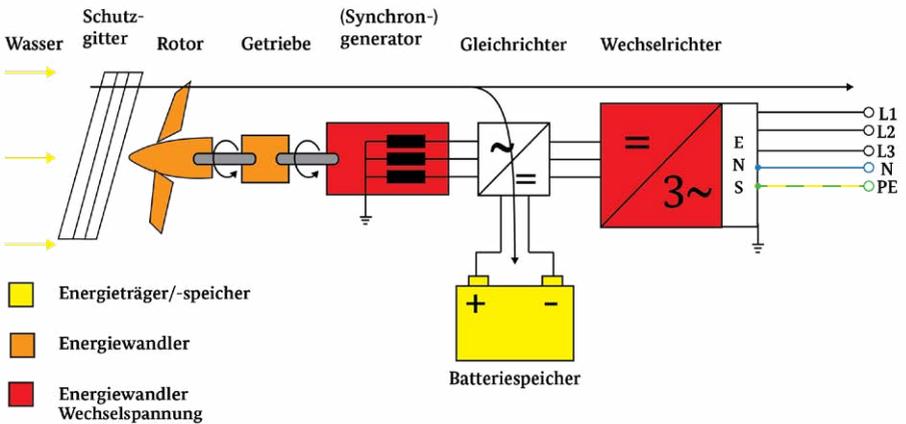


Abbildung 11: Schema und Energieflussrichtung eines mobilen Wasserkraftwerks mit Rotorgenerator (eigene Darstellung)

Windenergie stellt die heute wichtigste Energiequelle zur Erzeugung elektrischer Energie dar (Statistisches Bundesamt 2021). Mit Hilfe von großtechnischen Anlagen lässt sich die kinetische Energie des Windes zunächst in mechanische und anschließend in elektrische Energie wandeln. In Europa erfolgte bis zum Jahr 2017 die Installation von Windenergieanlagen (WEA) mit einer Leistung von insgesamt 169 GW, was einen Anteil an der weltweit installierten Windenergieleistung von 31 % ausmacht (Enevoldsen et al. 2019). Das Potential ist dabei längst nicht ausgeschöpft. Würden die aktuell ausgewiesenen Flächen in Deutschland von 0,9 % auf 2 % erhöht, könnte so eine jährliche Stromproduktion von 212 TWh durch Windkraftanlagen erreicht werden (Borrmann et al. 2020). Der Gesamtenergieverbrauch für das Jahr 2019 lag bei 2514 TWh, der elektrische Energiebedarf bei 501 TWh (Umweltbundesamt 2021). Die derzeit vorrangig aufgestellte Art von WEA sind Auftriebsläufer mit horizontal angeordneter Rotationsachse. Durch den dynamischen Auftrieb der drei Rotorblätter wird die Windenergie zunächst in mechanische Rotationsenergie gewandelt und anschließend in einem Generator in elektrische Energie umgesetzt (siehe Abbildung 13). Die Erhöhung der Erzeugungsleistung erfolgte in den letzten Jahren einerseits durch die Verbesserung des Wirkungsgrades, andererseits durch immer größere Rotordurchmesser und größere Nabenhöhen. Konventionelle Onshore-Anlagen haben derzeit eine nominale Leistung von bis zu 6,2 MW und einen Rotordurchmesser von 170 m (Siemens Gamesa Renewable Energy 2021a). Neue Systeme von GE und Vestas haben Nominalleistungen von 12 bzw. 9,5 MW mit Durchmessern von bis zu 220 bzw. 164 m (ENTEKA Plus GmbH 2021). Die prinzipielle Funktionsweise ist in Abbildung 13 dargestellt. Auch wenn mit dem Bau von horizontalen WEA ein hoher Genehmigungsaufwand einhergeht, bilden sie in diesem Bereich die beste Möglichkeit für einen Einsatz zur stationären Notstromversorgung.

Tabelle 7: Technologiebeispiele für mobile und stationäre WEA

Anbieter	Modell	Nennleistung	Packmaße	Gewicht	Höhenbereich	Windbereich	Nennwindgeschwindigkeit
Enerkite	EK200	100 kW	20-Fuß-Container	12,5 t	80 - 300 m	2,5 - 20 m/s	7 m/s
SkySails	SKS PN-14	200 kW	30-Fuß-Container	-	200 - 400 m	3 - 25 m/s	-
Kitepower	Falcon	100 kW	20-Fuß-Container	15 t	70 - 400 m	2 - 25 m/s	7 m/s
Siemens Gamesa	SG 2.1-114	2.100 kW	stationär	-	68 - 153 m	2,5 - 25 m/s	7,5 m/s
Enercon	E-44	900 kW	stationär	-	44 - 55 m	3 - 34 m/s	16,5 m/s
Vestas	V66-1.75	1.750 kW	stationär	-	60 - 78 m	3 - 25 m/s	15 m/s

Grundsätzlich ist die Erzeugung von elektrischer Energie aus Windkraft sehr kostengünstig, da lediglich Kosten für den Aufbau, den Betrieb und die Entsorgung anfallen, jedoch keinerlei Kosten für Brennstoffe benötigt werden. Die Produktion ist allerdings wetterabhängig und so müssen Betriebsstunden mit wenig oder gar keinem Wind durch Speicherung überschüssiger Energie oder andere Erzeugungsquellen gestützt werden. Es gibt Bestrebungen, Anlagen für den mobilen Einsatz zu entwickeln, allerdings ist die zu erzeugende Leistung durch die Anlagengröße und die entsprechende Verankerung im Boden begrenzt, weswegen solche Anlagen in der Bewertung nicht berücksichtigt werden (Uprise Energy 2021).

Eine weitere Art sind WEA mit vertikaler Rotationsachse. Diese Anlagen zeichnen sich durch einen vergleichsweise einfachen und robusten Aufbau aus, sind unempfindlich gegen wechselnde Windgeschwindigkeiten und -richtungen, sie werden jedoch wegen ihres im Vergleich zu Horizontalachsausführungen geringeren Wirkungsgrades selten für eine großtechnische Stromerzeugung eingesetzt. Aufgrund des schlechten Wirkungsgrades und der daraus resultierenden geringeren Energieerzeugung sind vertikale WEA für die beschriebenen Anwendungsszenarien als mobile und stationäre Anlage ungeeignet und werden in der Bewertung nicht weiter berücksichtigt (Kern et al. 2019).

Die Nutzung von Windenergie insbesondere aus großen Höhen kann mit sogenannten Flugwindkraftwerken erfolgen. Dabei wird ein Fluggerät wie beispielsweise ein Flugdrache oder ein Segelflugzeug an einer Seilwinde zum Steigen gebracht. Die elektrische Energie wird dabei am Boden durch einen Generator erzeugt, welcher mechanisch mit der rotierenden Seilwinde verbunden ist (siehe Abbildung 12).

Nach Erreichen der maximalen Höhe wird das Flugobjekt in einen Flugzustand mit geringem Luftwiderstand gebracht und wieder eingeholt. Dann wird der Vorgang wiederholt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Strom mit Hilfe von Propellern direkt in der Luft zu erzeugen und diesen über Leitungen an die Bodenstation zu übertragen. Flugwindkraftwerke sind noch in der Entwicklungsphase, bieten jedoch ein hohes Potential sowohl für stationäre als auch für mobile Anlagen zur regenerativen Stromerzeugung in unterschiedlichen Leistungsbereichen (Bormann 2021). Da Flugwindenergieanlagen ein vergleichsweise kleines Transportvolumen aufweisen, werden diese für die Bewertung des mobilen Anwendungsszenarios herangezogen. Technologiebeispiele für mobile und stationäre Anlagen werden in Tabelle 7 gegeben.

Auch die elektrische Energieerzeugung aus Windenergie gehört zu den sogenannten fluktuierenden Energieerzeugungsarten. Zwar ist diese nicht von der Tageszeit, jedoch von den vorherrschenden Wettergeschehnissen abhängig. Eine zuverlässige Erzeugung elektrischer Energie im Nennbereich ist mittels klassischer horizontaler WEA ab einer Windgeschwindigkeit von ca. 7 m/s möglich (Siemens Gamesa Renewable Energy 2021b). Die Tatsache, dass die durchschnittliche Windgeschwindigkeit beispielsweise in der Region Bremen und Niedersachsen bei 4,5 m/s liegt, verdeutlicht die Wahrscheinlichkeit, dass eine WEA keine zuverlässige Quelle bildet, um ausreichende elektrische Leistung im Notstromfall zur Verfügung zu stellen (Helmholtz-Zentrum hereon GmbH 2021). Daraus wird deutlich, dass Energieerzeugung aus Windkraft letztendlich keine zuverlässige Notstromversorgung bietet, da auch in Deutschland mehrtägige Phasen mangelnder Windkraft vorherrschen können. Insbesondere für stationäre Anlagen bedeutet dies, dass ein entsprechender Speicher berücksichtigt werden und dieser die Energieversorgung allein sicherstellen muss.

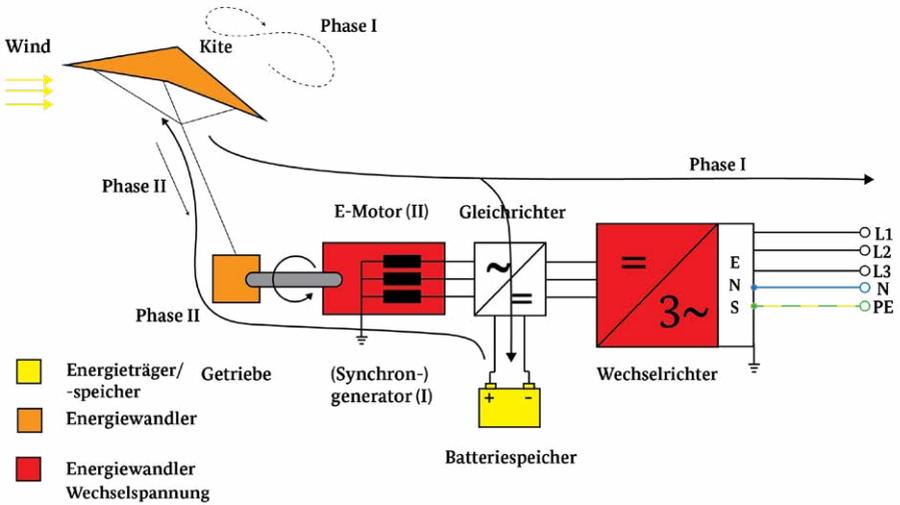


Abbildung 12: Schema und Energieflussrichtung eines Flugwindkraftwerks, Phase I: Energiegewinnung, Phase II: Einholen des Kites (eigene Darstellung)

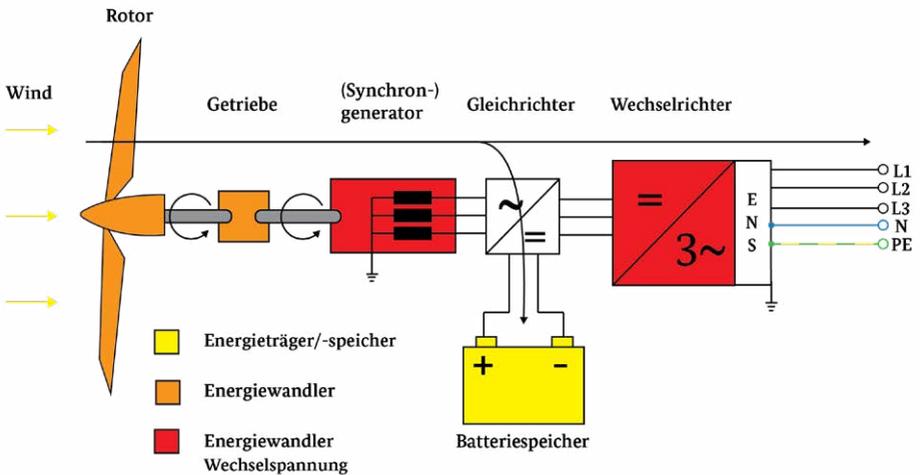


Abbildung 13: Schema und Energieflussrichtung einer horizontalen WEA für den stationären Betrieb (eigene Darstellung)

Methodik der Bewertung und Gewichtung der Anforderungsprofile

7



Im Folgenden werden die Bewertungskriterien als Grundlage für einen späteren strukturierten Vergleich dargestellt. Es werden insgesamt 21 Kriterien in den fünf Themenbereichen energetische, technische, organisatorische, sicherheits- und marktorientierte Anforderungen unterschieden. Durch die hier dargestellten Beschreibungen und Definitionen der ausgewählten Kriterien soll die Notwendigkeit für eine ganzheitliche Bewertung verdeutlicht und die eindeutige Abgrenzung untereinander sichergestellt werden. Neben der zu bewertenden Definition wird somit auch auf die Relevanz des Kriteriums, gegebene Rahmenbedingungen und den jeweiligen Bewertungsmaßstab eingegangen. Die Kriterien werden im letzten Teilabschnitt 7.6, bezogen auf den jeweiligen Anwendungsfall gem. 4.1 und 4.2, auf der Grundlage ihrer Systemrelevanz und Auswirkung gewichtet gegenübergestellt (Breiing und Knosala 1997). Es gibt drei Arten von Kriterien. Qualitative Kriterien bewerten, ob eine gewisse Funktion oder Eigenschaft gegeben ist. Quantitative Kriterien bewerten eine bestimmte Eigenschaft durch eine oder mehrere fest definierte Kennzahlen, welche einen direkten Vergleich zwischen verschiedenen Technologien möglich machen. Weiche Kriterien bewerten Eigenschaften der Technologien, welche für den Einsatz als Notstromsystem relevant sind, sich aber aufgrund der sehr inhomogenen Ansätze der Technologien nicht auf eine einzelne Eigenschaft oder Kennzahl reduzieren lassen.

Hier werden die Kriterien der energetischen Anforderungen beschrieben. Dazu zählen die Leistungsbereitstellung, die Energiekapazität, der Wirkungsgrad und die Energieträger-Verfügbarkeit der jeweiligen Notstromversorgungen. Es werden grundlegende energetische Definitionen herangezogen und inhaltliche Bewertungsbereiche definiert. Kriterien, die über die energetischen Parameter hinausgehen, werden in den folgenden Kapiteln weiterführend eingeordnet (Crastan 2018).

7.1.1 Leistungsbereitstellung

Die Leistungsbereitstellung definiert, wie viel Energie ein System pro Zeiteinheit maximal bereitstellen kann. Relevant für die Bemessung und den Vergleich ist die abgegebene Scheinleistung, welche sich über einen Leistungsfaktor von der Wirkleistung, d. h. der dann real umsetzbaren Energie, unterscheidet (Crastan und Westermann 2018). Die geforderten Leistungen des mobilen und des stationären Anwendungsfalles sind 75 bzw. 500 kW.

Die Betrachtung dieses Kriteriums ist inhärenter Teil der definierten Einsatzszenarien. Wenn ein einzelnes Modul den Leistungsanforderungen nicht genügt, muss ein entsprechendes Verbundsystem betrachtet werden.

Relevante Rahmenbedingungen sind u. a. die Inselnetzfähigkeit und die Komplexität der technischen Anbindung.

Sobald die geforderte Leistungsgrenze für den jeweiligen Fall überschritten ist, ist das Kriterium erfüllt. Das Unterschreiten, auch bei modular skalierten Systemen, ist gemäß den Vorgaben ein Ausschlusskriterium.

Sowohl für mobile als auch für stationäre Anlagen sind die erbrachten Leistungen solange mit der höchsten Priorität zu gewichten, wie die Mindestanforderung nicht erreicht ist.

7.1.2 Regel- und Skalierbarkeit

Regelbarkeit beschreibt die Eigenschaft des Systems, die Leistungsabgabe, entsprechend der Bedarfssituation, zwischen dem Maximalwert und einer systemspezi-

fischen technischen Leistungsuntergrenze anzupassen. Unter Skalierbarkeit wird der Aufwand bewertet, ein System modular oder durch Alternativsysteme sowohl in der Leistungs- als auch in der Energiespeicherdimension zu erweitern.

Obwohl die Einschränkungen der Regel- und Skalierbarkeit technische Hintergründe haben, ist die direkte Auswirkung ein energetisches Kriterium. Einschränkungen können zum Beispiel materialabhängige kritische Wärmeausdehnungsparameter sein, welche bei ihrer Überschreitung Materialschäden verursachen können. Auch technisch minimale Volumenströme bei der Ressourcenversorgung können einschränkende Rahmenbedingungen sein.

Eine schnelle Regelung und einfache Skalierung erweitern die Anwendungsgebiete, bilden die Grundlage der Netzsynchrosation und machen den Einsatz flexibler (Steinbuch und Rupprecht 1982).

Während die zu versorgenden Verbraucher und die damit benötigte Leistung im stationären Anwendungsfall vordefiniert sind, sind diese für mobile Notstromversorgungssysteme häufig undefiniert. Deshalb profitieren mobile Anwendungen bei einer schnelleren Regelung zusätzlich durch flexiblere Lastzuschaltung und bessere, ggf. modulare, Erweiterungsmöglichkeiten.

7.1.3 Energieträger-Verfügbarkeit

Mit diesem Kriterium wird bewertet, ob die grundlegende Energieressource der jeweiligen Technologie universell, mit geringem Aufwand oder nur stark eingeschränkt verfügbar ist. Windgeschwindigkeiten, Sonneneinstrahlungsintensitäten und die Verfügbarkeit von Gewässern mit hinreichender Strömungsgeschwindigkeit werden auf diese Weise mit der Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von Diesel, Wasserstoff und Biomethan verglichen. Betrachtet werden dabei somit nur Speichertechnologien, die sich in der Energieumwandlungskette vor dem elektrischen Erzeuger befinden.

Eine starke Abhängigkeit von zum Beispiel Wetterbedingungen oder Temperatureinflüssen wird negativ bewertet. Dabei wird zwischen einem verringerten Wirkungsgrad bzw. einer verringerten Leistungsabgabe und dem Ausfall differenziert.

Einfach zugängliche und breit verfügbare Energieträger werden als positiv gewertet.

Da die Energieerzeugung von der primären Ressource abhängt, ist die zuverlässige Verfügbarkeit von besonderer Bedeutung. Bei stationären Anwendungen kann die Verfügbarkeit in der Regel mit hinreichender Sicherheit abgeschätzt werden. Bei mobilen Anwendungen muss diese Unsicherheit zusätzlich in der Gewichtung berücksichtigt werden.

7.1.4 Energiespeicherkapazität

Hier werden die volumetrische und die gravimetrische Energiedichte des geeigneten Energiespeichers bewertet.

Das Kriterium der Energiespeicherkapazität bewertet zum einen die Möglichkeit des Verbundsystems, die zur Leistungsbereitstellung notwendige Energiemenge vorzuhalten, sowie zum anderen die volumetrische und gravimetrische Energiedichte des jeweiligen Energieträgers. Für den mobilen Anwendungsfall müssen 75 kW für 96 Stunden, also 7,2 MWh, und für den stationären Fall 500 kW für 72 Stunden, also 36 MWh, vorgehalten werden. Wenn Primärenergieträger am Einsatzort vorhanden sind, kann die benötigte Speicherkapazität kleiner ausfallen.

Weitere relevante Rahmenbedingungen sind die physikalische Form und ggf. der Aggregatzustand, in dem die Energie gespeichert wird. Diese haben starke Implikationen für diverse technische, sicherheitsrelevante und organisatorische Rahmenbedingungen und werden deshalb auch an diesen Stellen entsprechend berücksichtigt. Die Energiekapazität ist maßgeblich für die Dimensionierung des Energiespeichers und damit auch der Größe des Gesamtsystems (Steinbuch und Rupprecht 1982).

Die Fähigkeit der bewerteten Technologie, die benötigte Energie speichern zu können, bildet die Grundvoraussetzung, die volumetrischen und die gravimetrischen Energiedichten die Bewertungsskala. Hohe Energiedichten werden positiv gewertet.

Bei begrenzten Transportkapazitäten im mobilen Anwendungsfall erlangt das Kriterium eine besondere Bedeutung.

7.1.5 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis der nutzbaren Energie zur Gesamtenergie des Energieträgers vor der Energieumwandlung und dem Speichervorgang. Für die Betrachtung von Stromerzeugern ist der elektrische Wirkungsgrad von Bedeutung und wird daher in diesem Kriterium mitbewertet. Meist aus wirtschaftlicher Sicht betrachtet, spielt er für die Bewertung von Notstromsystemen allerdings nur eine untergeordnete Rolle (Kapitel 12.2: Experteninterview). Jedoch werden bei langen Bereitstellungsphasen Effekte wie Diffusion oder Selbstentladung relevant. Prinzipiell können also sowohl einsatzabhängige Verluste, die bei Energiewandlungs- und Speichervorgängen auftreten, als auch die zeitabhängigen Verluste, die aufgrund von Selbstentladung, Dissipation oder auch der Degeneration auftreten, berücksichtigt werden.

Die Abschätzungen für Wirkungsgrade können ohne konkretes Anwendungsszenario nur kategorisiert und pauschalisiert dargestellt werden, weil variierende Rahmenbedingungen signifikante Änderungen bewirken können. Zum Beispiel bewirken die Versorgungszeiten im Einsatz, das Alter des Systems und die Bereitstellungszeiträume in Kombination mit unterschiedlichen Speicherarten substantiell unterschiedliche Ergebnisse.

Im Fall einer Netzintegration, in der auch in Bereitstellungsphasen Entlade- und Ladephasen durchgeführt werden, unterliegen Wirkungsgrade erneut maßgeblich anderen Rahmenbedingungen.

Niedrige Selbstentladungen und hohe Nutzenergiewerte werden positiv bewertet. Die Gewichtung ist für alle Anwendungsfälle unterdurchschnittlich anzusetzen.

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen untersucht, welche die jeweiligen Technologien an die Technik stellen. Hierbei wird insbesondere auf die Größe und das Gewicht der Anlage, die konstruktive Anlagenstruktur und notwendige Peripherie, die Komplexität des Energiespeichers, die Anlaufzeit und die Robustheit der verbauten Technik eingegangen.

7.2.1 Größe und Gewicht

Das Kriterium Größe und Gewicht definiert die Masse sowie den Raum- und Flächenbedarf eines Notstromsystems. Dazu zählen alle Komponenten, die für die Bereitstellung einer definierten Leistung benötigt werden, u. a. also der Energiewandler, der Speicher und eine Kontroll-/Steuereinheit.

Dieses Kriterium umfasst unter anderem den Transportbedarf und die nötige Fläche, die für das Aufstellen einer Anlage erforderlich ist. Eine in diesem Kriterium nicht bewertete Rahmenbedingung ist die Energiedichte. Sie stellt eine funktionale Größe dar, die Leistungsanforderungen und technische Anforderungen verknüpft und mit der Größe des Energiespeichers korreliert. Die Energiedichte wird in dem Abschnitt Komplexität des Energiespeichers betrachtet.

Eine geringe Masse sowie ein geringer Raum- und Flächenbedarf werden positiv bewertet.

Das Kriterium erlangt einzelfallabhängig besondere Bedeutung, wenn Größe und Gewicht begrenzende Faktoren z. B. für den Transport von mobilen Anlagen oder für den Unterbringungsort von stationären Anlagen sind. Während die Rahmenbedingungen bei stationären Anlagen häufig relativiert werden können, stellt diese Anforderung für mobile Anwendungen ein Ausschlusskriterium dar, wenn der Einsatz nicht mehr möglich ist, weil beispielsweise das maximale Ladegewicht von Schwerlasttransportern überschritten wird.

7.2.2 Notwendige konstruktive Anlagenstruktur und notwendige Peripherie

Dieses Kriterium bewertet die für den Aufbau und Betrieb einer Anlage benötigten strukturellen Maßnahmen und Infrastrukturanbindungen. Beeinflusst wird durch

das Kriterium unter anderem der zusätzliche Aufwand, der vor dem Aufbau der eigentlichen Anlage betrieben werden muss, um die nötigen Strukturen zu schaffen.

Technologien ohne oder mit nur geringen Anforderungen an die Infrastruktur werden positiv bewertet.

Diese Anforderung kann einzelfallabhängig eine besondere Bedeutung erlangen, wenn der Aufbau der nötigen Infrastruktur nur mit sehr großem Aufwand möglich ist. Bei mobilen Anwendungen muss davon ausgegangen werden, dass keine Infrastruktur vorhanden ist, was die Bedeutung dieses Kriteriums hervorhebt. Bei stationären Anwendungen lässt sich das nötige Maß an Infrastruktur hingegen prinzipiell schaffen, wodurch die Gewichtung geringer ausfällt.

7.2.3 Komplexität des Energiespeichers

Dieses Kriterium bewertet die Komplexität des Energiespeichers anhand der Eigenschaften des Energieträgers, des technischen Aufbaus und Betriebs des Speichers sowie des Vorgangs der Nachbetankung. Die Komplexität beeinflusst zudem die Störanfälligkeit des Energieträgers und die notwendigen Sicherheitsstandards, die beim Bau und Betrieb zu beachten sind. Zusätzlich werden dadurch die Kosten und damit die marktorientierten Anforderungen beeinflusst.

Einfach aufgebaute und betreibbare Speicher sowie eine technisch einfache Nachbetankung werden als positiv bewertet.

Die Bedeutung dieses Kriteriums ist abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall. Bei mobilen Anwendungen muss der Energiespeicher sicher transportierbar sein und darf dabei die Möglichkeiten des Transportmittels nicht übersteigen. Im Vergleich zur mobilen Anwendung ist die Komplexität des Energiespeichers bei stationären Anwendungen aufgrund des nicht vorhandenen Transportbedarfs sowie besserer Möglichkeiten für Aufbau und Automatisierung von geringer Bedeutung.

7.2.4 Anlaufzeit

Das Kriterium Anlaufzeit bewertet die Länge der Zeitspanne zwischen dem initialen Einschalten der Anlage und der Bereitstellung der maximalen Leistung. Hierbei wird der Zeitraum, in dem Verbraucher von der Energieversorgung getrennt sind, beeinflusst. Es ist zu beachten, dass bei besonderen Anforderungen auch der Einsatz von USV-Systemen in Betracht kommt, welche eine unverzügliche Energieversorgung ermöglichen. Bei einem solchen Einsatz von Zwischenspeichern beeinflusst dieses Kriterium zusätzlich die zu speichernde Energiemenge und damit auch die Größe des Akkumulators.

Die Anlaufzeit erlangt abhängig von den angeschlossenen Verbrauchern und den regulatorischen Vorgaben eine hohe Bedeutung. Da bei jeder Notstromversorgung zusätzlich Batterien bereitgestellt werden können, die eine sofortige Abgabe von Leistung ermöglichen, liegt hier kein Ausschlusskriterium vor. Im stationären Anwendungsfall wird eine Anlaufzeit von höchstens 15 Sekunden vorausgesetzt (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2012). Bei mobilen Anwendungen besteht darüber hinaus die Besonderheit, dass die Notstromsysteme erst nach Eintreten des Notstromfalls angefordert und dann erst nach dem Transport angeschlossen werden. Da die Anlaufzeit im Vergleich zur Transport- und Aufbauzeit technologieabhängig äußerst gering ist, wird dieses Kriterium für den mobilen Anwendungsfall sehr schwach gewichtet.

7.2.5 Robustheit

Die Robustheit bewertet die Resistenz einer Anlage gegenüber systembedingten Störungen, wie z. B. Bauteilversagen und Störungen von außen. Dazu zählen Wiedereinflüsse, die zum Leistungsabfall oder Ausfall der Anlage führen können.

Durch dieses Kriterium wird die Wahrscheinlichkeit abgeschätzt, dass es zu einer Störung oder zum Ausfall der Anlage kommt und dass eine vollständige Versorgung der angeschlossenen Verbraucher nicht mehr gegeben ist. Da die Notstromversorgung in der Regel kritische Verbraucher versorgt, ist die zuverlässige Bereitstellung von elementarer Bedeutung. Eine weitere relevante Rahmenbedingung für die Robustheit, die nicht bewertet werden kann, ist die Zuverlässigkeit von Komponenten, welche vorgeschaltet sind und die Verteilung der Leistung auf die Verbraucher gewährleisten. Hierunter fallen z. B. Transformatoren, Wechselrichter und das Notstromnetz selbst.

Redundanzen, Unempfindlichkeit gegenüber Störungen und die erprobte Zuverlässigkeit werden positiv bewertet.

Die Bedeutung dieser Anforderung ist abhängig von der Relevanz der Verbraucher und den äußeren Einflüssen, unter denen eine Anlage funktionsfähig sein muss. Mobile Anlagen müssen an verschiedenen Standorten einsatzfähig sein und dabei unterschiedlichen Einflüssen, besonders den externen, trotzen können. Deshalb wird das Kriterium Robustheit für diese Anwendung mit hoher Priorität eingestuft. Stationäre Anlagen können hingegen baulich gegen Ausfälle z. B. durch Verschleiß und Einflüsse von außen geschützt werden, weshalb dieses Kriterium für stationäre Anwendungen mit geringerer Priorität gewichtet wird.

In diesem Kapitel wird untersucht, welche Anforderungen unterschiedliche Technologien an die Organisation im Hinblick auf Aufbau, Transport, Wartung und Beschaffung stellen. Betrachtet werden die Punkte Transport und Aufbau einer Anlage, Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb, der Wartungsaufwand, der Personalbedarf und die nötige Qualifikation des Personals, der Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsmitteln sowie der Genehmigungsaufwand der jeweiligen Anlage.

7.3.1 Transport und Aufbau

Das Kriterium Transport und Aufbau bewertet den organisatorischen Aufwand, der für den Transport einer Anlage notwendig ist. Als Bewertungsmaßstab dienen hierbei Anzahl und Art der nötigen Transportmittel und die mittlere Zeitspanne, die zwischen Beginn der Planung und Inbetriebnahme der Anlage vergeht. Dieses Kriterium beeinflusst dabei unter anderem die Mobilität einer Anlage, wovon wiederum die Zeitspanne abhängt, die vergeht, bis eine Anlage einschaltbereit ist. Somit ist dieses Kriterium eng mit dem Kriterium Größe und Gewicht verknüpft. Als zusätzliche Rahmenbedingung, die jedoch nicht bewertet wird, ist der Einfluss von Umwelt und Umgebungseinflüssen auf den Transport zu betrachten.

Das Benötigen einer geringen Anzahl von einfachen Transportmitteln und einer kurzen Zeitspanne bis zur Einsatzfähigkeit werden als positiv bewertet.

Die Bedeutung dieses Kriteriums ist abhängig von der Erreichbarkeit des jeweiligen Aufstellungsortes der Anlage. Während bei mobilen Anwendungen Transport und Aufbau von hoher Bedeutung sind, ist dieses Kriterium für stationäre Zwecke nicht relevant.

7.3.2 Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb

Das Kriterium Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb bewertet den Organisationsaufwand, der für die Beschaffung und Logistik von Betriebsmitteln nötig ist. Als Bewertungsmaßstab dienen hierbei die Beschaffbarkeit der Betriebsmittel und die Anforderungen an die benötigten Transportmittel.

Dieses Kriterium beeinflusst, wie groß der Aufwand ist, um die Notstromversorgung bei längeren Einsatzfällen aufrechtzuerhalten. Hierbei können die betrachteten Technologien unterschiedlich autark sein, sodass gegebenenfalls keine Betriebsmittel zur Aufrechterhaltung des laufenden Betriebs nötig sind. Eine Rahmenbedingung, die in diesem Kriterium nicht bewertet wird, stellen auftretende Abfallstoffe dar, die gegebenenfalls aufwendig entsorgt werden müssen.

Eine einfache und schnell mögliche Beschaffung von Betriebsmitteln sowie geringe Anforderungen an die benötigten Transportmittel werden als positiv bewertet.

Die Bedeutung dieser Anforderung ist abhängig von der Erreichbarkeit des Aufstellungsortes. Bei mobilen Anlagen ist es dabei besonders wichtig, dass diese ohne großen Aufwand versorgt werden können. Bei stationären Anlagen relativiert sich dies zum Teil aufgrund besserer Planungs- und Bevorratungsmöglichkeiten.

7.3.3 Instandhaltungsaufwand

Die Anforderung bewertet den Aufwand für die Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen und den Umfang des Instandhaltungsbedarfs. Dazu zählt alles, was für den Funktionserhalt notwendig ist, ggf. also auch Reinigungsmaßnahmen.

Durch dieses Kriterium werden der Umfang der nötigen Arbeiten sowie der Zeitraum, den die Notstromversorgung während der Instandhaltung nicht zur Verfügung steht, beeinflusst. Für die Planung von Instandhaltungsarbeiten ist als Rahmenbedingung zu beachten, ob diese vom Anlagenhersteller übernommen werden oder vom Betreibenden selbst zu organisieren sind.

Ein geringer und nicht umfangreicher Wartungsaufwand wird als positiv bewertet.

Das Kriterium Instandhaltung hat aufgrund relativ guter Planbarkeit eine mittlere Bedeutung. Für stationäre Anwendungen wird die Bedeutung dabei etwas höher gewichtet als für mobile Anwendungen, da die Betriebsbereitschaft während Instandhaltungsmaßnahmen häufig eingeschränkt ist.

7.3.4 Personal- und Qualifikationsbedarf

Dieses Kriterium definiert die Anzahl und die nötige Qualifikation des für den Betrieb und die Instandhaltung der Anlage benötigten Personals, wobei für die Qualifikation zwischen Laien, elektrisch unterwiesenen Personen und Fachkräften unterschieden wird. Unter Betrieb sind hierbei Inbetriebnahme und laufender Betrieb der Anlage zu verstehen. Durch diese Anforderung wird die Verfügbarkeit von geeignetem Personal beeinflusst. Zudem stellt dieses Kriterium einen Kostentreiber dar.

Ein geringer Personalbedarf und eine geringe Qualifikation werden als positiv bewertet.

Die Bedeutung dieser Anforderung ist besonders vom Anwendungsfall (und von den Möglichkeiten des Betreibenden) abhängig. Für die mobile Anwendung sind Aufbau und Inbetriebnahme vor Ort durchzuführen, was nur mit geeignetem Personal möglich ist und woraus sich eine hohe Bedeutung dieses Kriteriums ergibt. Bei stationären Anwendungen besteht häufig die Möglichkeit, Anlagen zu automatisieren, wodurch sich die Bedeutung des Kriteriums verringert.

7.3.5 Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen

Dieses Kriterium definiert die Verfügbarkeit und Nachbestellbarkeit von Ersatzteilen und Betriebsstoffen. Hierbei wird unter anderem auch betrachtet, ob der Bezug von diesen auch aus Deutschland oder nur aus dem Ausland möglich ist. Ein Transport dieser wird dabei nicht betrachtet. Durch diese Anforderung wird die Ausfallzeit einer Anlage nach technischen Defekten beeinflusst. Eine Abhängigkeit von ausländischen Herstellern kann zudem den Bezug von Betriebsmitteln in Krisenzeiten erschweren.

Die einfache Beschaffbarkeit und die Verfügbarkeit von Betriebsmitteln bei deutschen Herstellern werden als positiv bewertet.

Bei einem Ausfall der Anlage ist es oft nötig, Ersatzteile und Betriebsstoffe zu beschaffen, um die Funktionsfähigkeit wiederherstellen zu können, weshalb dieses Kriterium eine besondere Bedeutung hat.

7.3.6 Genehmigungsaufwand

Das Kriterium zur Genehmigung definiert den Aufwand für die behördliche Genehmigung der Anschaffung einer Anlage und deren Betrieb. Es wird bewertet, ob es sich um ein Standardverfahren oder um ein neues Genehmigungsverfahren handelt und welche Verfahren und Gesetze beachtet werden müssen, oder ob es bereits internationale oder EU-weite Zulassungen gibt. Durch dieses Kriterium wird dabei besonders der Planungszeitraum der Anschaffung einer Anlage beeinflusst. Zusätzlich bedeutet die Genehmigung einer Anlage eine zusätzliche Unsicherheit für den Abschluss des Projektes.

Ein geringer Genehmigungsaufwand wird als positiv bewertet. Die Notwendigkeit einer Genehmigung für den individuellen Einsatzfall ist ggf. negativ zu bewerten. Für neue Technologie, für die ein entsprechender rechtlicher Rahmen erst geschaffen werden muss, ist dieses Kriterium abzuwerten.

Diese Anforderung erlangt ihre Bedeutung aus der Zeitspanne, in der eine Anlage fertigzustellen ist. Da ein hoher Genehmigungsaufwand auch mit Unsicherheiten behaftet ist, ist dieser für beide, d. h. mobile und stationäre Szenarien als wichtig einzustufen. Im mobilen Anwendungsfall ist der Genehmigungsaufwand höher zu werten, da durch wechselnde Einsatzgebiete einsatzbezogene Genehmigungen notwendig werden könnten.

Hier werden die Sicherheitsstandards unterschiedlicher Technologien bewertet. Dabei wird betrachtet, inwieweit einzelne Technologien gegenüber bestimmten Angriffen Dritter geschützt sind und in welchem Maße ein kritisches Ereignis in einer Anlage die Umgebung gefährdet. Als Schutz gegen Angriffe von außen werden hierbei der IT-Bedarf und die Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus betrachtet.

7.4.1 IT-Bedarf

Der IT-Bedarf bewertet die Notwendigkeit von IT-Systemen für unterschiedliche Technologien. Hierbei werden drei Szenarien unterschieden: Keine offene IT nötig, nicht vernetzte IT nötig und Fernzugriff nötig. Durch den IT-Bedarf wird die Möglichkeit von Dritten beeinflusst, unbefugt auf die Anlage zuzugreifen. Zudem ist IT eine mögliche Fehlerquelle, die zu einer Störung der Anlage führen kann.

Technologien mit einem geringen IT-Bedarf werden positiv bewertet.

Dieses Kriterium erlangt einzelfallabhängig besondere Bedeutung, wenn besondere IT-Sicherheitsstandards notwendig sind. Dies gilt für beide Anwendungsfälle gleichermaßen.

7.4.2 Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung

Unter dieser Anforderung wird der Schaden betrachtet, der bei einem kritischen Ereignis in der Umgebung der Anlage auftreten kann. Durch die Anlagensicherheit und das Gefährdungspotential wird dabei maßgeblich die Sicherheit des umliegenden Raumes beeinflusst, welche zu jedem Zeitpunkt sicherzustellen ist. Hierfür müssen die Menge an Energie und Gefahrstoffen der jeweiligen Anlage bekannt sein, weshalb als Rahmenbedingung auch die Größe der Anlage von entscheidender Bedeutung ist. Hier ist das abzusichernde Ausmaß des schlimmsten Unglückes zu bewerten.

Für die Bewertung werden geringe Auswirkungen auf die Umgebung als positiv bewertet.

Diese Anforderung erhält durch die Notwendigkeit, die Sicherheit der Umgebung zu gewährleisten, eine besondere Bedeutung. Bei mobilen Anlagen gilt dies nicht nur für den Aufstellungsort, sondern auch für den Transportweg. Zudem lassen sich bei stationären Anlagen sicherheitstechnische Aspekte wie z. B. eine redundante Ausführung einzelner Komponenten einfacher umsetzen.

7.4.3 Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus

Dieses Kriterium bewertet den nötigen Aufwand Dritter, die Funktionsfähigkeit der Anlage zu stören. Somit wird durch die Anforderung die Wahrscheinlichkeit beeinflusst, dass ein Sabotageakt oder Vandalismus gelingt.

Ein hoher nötiger Aufwand für einen Zugriff von außen wird als positiv bewertet.

Dieses Kriterium erhält einzelfallabhängig große Bedeutung durch die Notwendigkeit, kritische Verbraucher zu versorgen und durch die Motivation Dritter, bestimmte Bereiche zu sabotieren. Stationäre Anlagen lassen sich dabei im Gegensatz zu mobilen Anwendungen durch bauliche Maßnahmen gegen den Zugriff durch Dritte schützen.

Die fünfte Anforderungskategorie fokussiert die ökonomisch relevanten Aspekte der Investition und des Betriebes. Technische Vorgaben und organisatorische Anforderungen stellen Rahmenbedingungen dar, fließen jedoch nicht in die Bewertung mit ein.

7.5.1 Investitionskosten

Als erste marktorientierte Anforderung sind die Investitionskosten als wesentliches Charakterisierungs- und Entscheidungsmerkmal aufgeführt. Obwohl die Relevanz der Investitionskosten zwischen den Endnutzenden variiert, sind ökonomische Betrachtungen eine wesentliche Grundlage und somit ein wichtiges Anschaffungskriterium.

Dabei sind, aufgrund der generalisierten Betrachtung und der damit fehlenden individuellen Finanzierungssituation, die Kapital- und Opportunitätskosten nicht in den Investitionskosten berücksichtigt. Es werden die reinen Anschaffungskosten, die anfallenden Kaufnebenkosten und initialen Inbetriebnahmekosten der notwendigen Systeme und Komponenten in die Wertung dieses Kriteriums einbezogen. Betrachtete Systeme sind u. a. Energieerzeuger, Energiespeicher, Transformatoren, Regler, Speicher- und Lademanagementsysteme und ggf. Systeme zur Netzintegration. Die Nebenkosten umfassen u. a. die Installationskosten, notwendige Konstruktions-/Infrastrukturkosten und Transportkosten (Schneider 1974).

Relevant ist dieses Kriterium für einen ökonomischen Vergleich unter Einbeziehung haushälterischer Vorgaben.

Besonders im Rahmen der Nebenkosten ergeben sich sowohl für unterschiedliche Leistungsklassen als auch für unterschiedliche Einsatzorte zum Teil stark abweichende Größenordnungen. Abhängig von der vorhandenen Infrastruktur und dem örtlichen Netzausbau sind allgemein nicht zu beschreibende Mehrkosten einzubeziehen.

Generell werden niedrige Investitionskosten als positiv gewertet. Die Gewichtung wird vor allem vom Budget bestimmt und kann bei einer Überschreitung als Ausschlusskriterium angesehen werden.

Für jeden betrachteten Anwendungsfall sind Investitionskosten planbar und einsetzunabhängig. Aufgrund der geringen Nutzungszeiten und der damit niedrigeren operativen Kosten machen die initialen Investitionskosten den Großteil des gesamten Finanzbedarfs aus. Sie stellen die wesentliche Anschaffungshürde dar und gehen insgesamt maßgeblich in die Gewichtung ein.

7.5.2 Operative Kosten

Die operativen Kosten ergänzen die marktorientierten Anforderungen als zweites wesentliches Charakterisierungs- und Entscheidungsmerkmal.

Dieser Kostenpunkt umfasst alle laufenden Kosten in der Bereitstellungs- und Einsatzphase der jeweiligen Technologie. Dazu zählen beispielsweise notwendige Personal-, Betriebsstoff-, Logistik-, Wartungs- und Reinigungskosten. Alle Kosten werden für die Bereitstellung der Notstromversorgung berücksichtigt. Betriebszeiten, die sich aus technischen Anforderungen oder aufgrund von Wartungszwecken ergeben, sind als Bereitstellungskosten eingeordnet. Die Kosten für den Einsatzfall werden nicht berücksichtigt. Für den längsten geplanten Betriebsfall von 96 Stunden und die Technologie mit den höchsten variablen Kosten entstehen mit einem Dieselpreis von 1,20 Euro pro Liter Kosten in Höhe von ca. 2000 Euro. Außerdem ist die Kostenabwägung im Einsatzfall aufgrund des oft dringlichen Bedarfs an elektrischer Energie und der einhergehenden hohen Opportunitätskosten zu vernachlässigen (Schneider 1974). Bestätigt wird dies durch die geringen durchschnittlichen Jahresnutzungszeiten von 30 Stunden (gem. Kapitel 12.4: Experteninterview) und die daraus resultierenden noch geringeren verbrauchsabhängigen Kosten.

Sollte das System in der Bereitstellungsphase netzintegriert oder netzintegrierbar sein und entweder Systemdienstleistungen erfüllen oder eine Einspeisevergütung erhalten, so werden die dadurch entstandenen Einnahmen gegen die auftretenden periodischen Kosten verrechnet.

Die Bereitstellungskosten machen oft einen hohen Anteil der Gesamtkosten (wirtschaftswissenschaftlich spricht man von Life-cycle-costs) aus und sind deshalb wichtig für die ökonomisch ganzheitliche Betrachtung der Technologie bzw. des Systems. Die Zusammensetzung dieses Kostenpunktes variiert stark zwischen den Systemen und muss deshalb vergleichbar zusammengefasst werden.

Geringe operative Kosten oder sogar Überschüsse sind positiv zu bewerten. Zu hohe operative Kosten können bei einer großen Anzahl an Systemen budgetabhängig zum Ausschlusskriterium werden.

Operationskosten variieren zwischen den Anwendungsfällen vor allem im Einsatzfall, da hier die abstrakt unkalkulierbaren Mehrkosten des Transportes und des Aufbaus stark einzelfallabhängig sind. Da dieser Kostenpunkt jedoch nicht berücksichtigt wird, ist die Gewichtung für alle Anwendungen gleichzusetzen. Aufgrund der außergewöhnlich kurzen durchschnittlichen Nutzungszeiträume sind die verbrauchsabhängigen Kosten für den stationären Fall zu vernachlässigen. Mobile Anwendungen werden häufiger im Rahmen von Rettungsdiensten genutzt. Die verbrauchsunabhängigen operativen Kosten unterscheiden sich nicht. Aufgrund der verhältnismäßig geringen absoluten jährlichen Kosten sind diese in jedem Anwendungsfall gering zu gewichten.

In diesem Kapitel werden die vorab beschriebenen Kriterien in Tabelle 8 zusammengefasst und bezogen auf die in Abschnitt 4 ausgeführten Anwendungsszenarien gewichtet. Durch diese Gewichtung wird eine qualitative Differenzierung zwischen den einzelnen Kriterien, bezogen auf ihre Relevanz und Signifikanz für das jeweilige Anwendungsszenario, geschaffen. Tabelle 8 dient der Übersichtlichkeit und dem direkten Vergleich zwischen den Anwendungsszenarien. Die Wertung „+++“ beschreibt ein überaus wichtiges Kriterium, die Wertung „o“ eine durchschnittliche Kategorie und „---“ einen zu vernachlässigenden Aspekt für den jeweiligen Anwendungsfall.

Tabelle 8: Gewichtung der Bewertungskriterien bezogen auf die Anwendungsszenarien

	Mobile Notstromversorgung	Stationäre Notstromversorgung
Energetische Anforderungen		
Leistungsbereitstellung	+++	+++
Regel- und Skalierbarkeit	+++	++
Energieträger-Verfügbarkeit	+++	++
Energiespeicherkapazität	++	o
Wirkungsgrad	--	--
Technische Anforderungen		
Größe und Gewicht	+++	o
Notwendige konstruktive Anlagenstruktur	++	-
Komplexität des Energiespeichers	++	o
Anlaufzeit	--	++
Robustheit	++	-
Organisatorische Anforderungen		
Transport und Aufbau	++	---
Versorgung im laufenden Betrieb	++	o
Instandhaltungsaufwand	o	+
Personal- und Qualifikationsbedarf	++	o
Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen	++	++
Genehmigungsaufwand	++	+
Sicherheitsanforderungen		
IT-Bedarf	+	+
Anlagensicherheit und Gefährdungsbe- trachtung	++	+
Resistenz gegenüber Sabotage und Van- dalismus	++	+
Marktorientierte Anforderungen		
Investitionskosten	++	++
Operative Kosten	-	--

Bewertung der Technologien zur Notstromversorgung

8



Im Folgenden werden sowohl die konventionellen Dieselgeneratoren als auch die fünf alternativen Technologien Biomasse, Brennstoffzellen, Photovoltaik, Wasserkraft und Windenergie, jeweils mit Speicher- und Kontrolleinheit sowie dem elektrochemischen Energiespeicher, bewertet. Dies geschieht anhand der in Kapitel 7 definierten Kriterien, bezogen auf die zwei Anwendungsfälle aus Kapitel 4.1 und 4.2. Abschließend werden die einzelnen Ergebnisse anwendungsfallbezogen gegenübergestellt und verglichen.

Als erste Technologie werden konventionelle Dieselgeneratoren bewertet. Dieselgeneratoren gelten gem. Kapitel 5.2 als Standardtechnologie zur Notstromversorgung. Sie haben sich durch ihre Zuverlässigkeit etabliert und ein breites Marktangebot bietet eine gute Grundlage, um diese Technologie als Benchmark zum Vergleich mit den „grünen Alternativtechnologien“ heranzuziehen. Gemessen wird die Technologie an dem in Kapitel 7 erläuterten Kriterienkatalog.

8.1.1 Energetische Anforderungen

- Leistungsbereitstellung

Dieselgeneratoren sind die aktuell am weitesten verbreitete Technologieform im Bereich der Notstromanlagen. Entsprechend bietet der Markt ein breites Angebot an Anlagen in Leistungsbereichen von wenigen kW bis zu mehreren MW, siehe Tabelle 2. Das THW Bergedorf verfügt beispielsweise über kleinere Anlagen mit 20 kVA bis hin zu größeren Anlagen auf 20-Fuß-Anhängern mit 200 kVA. Die nächste Generation der mobilen Notstromanlagen soll bereits über 630 kVA verfügen (Kapitel 12.2: Experteninterview). Damit ist das Kriterium der Leistungsbereitstellung für Dieselgeneratoren für beide Anwendungsszenarien erfüllt.

- Regel- und Skalierbarkeit

Grundsätzlich bietet der Markt für fast alle Leistungsbedürfnisse bis zu mehreren MW schlüsselfertige Anlagen. Darüber hinaus bieten viele ersatzstromfähige Anlagen die Möglichkeit, über eine gemeinsame Sammelschiene parallel in einen Netzanschlusspunkt einzuspeisen und damit die Gesamtversorgungsleistung zu erhöhen. Auch Lastsprünge bis zu 100 kW können durchfahren werden. Zu beachten ist allerdings, dass eine gewisse Mindestlast abhängig von der Nennleistung des Dieselgenerators angeschlossen sein muss (Kapitel 12.2: Experteninterview). Insgesamt bieten Dieselgeneratoren daher eine einfache Regel- und Skalierbarkeit.

- Energieträger-Verfügbarkeit

Als Energieträger für Dieselgeneratoren dient der Kraftstoff Diesel, in manchen Fällen auch Heizöl oder Biodiesel. Dieser kann grundsätzlich in Behältern bevorratet werden. Zu beachten ist allerdings, dass der Kraftstoff mit der Zeit Wasser aus seiner Umgebungsluft aufnimmt. Dieser Effekt wird durch den Biodiesel, welcher aufgrund der europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2009/28/EG beigemischt werden muss, nochmal verstärkt. Das dadurch gezogene Wasser kann sich dann am Boden des Kraftstofftanks absetzen, was zu Problemen wie Korrosion, Wachstum von Mikroorganismen, Schlamm- und Filterverstopfung oder Gefrierschäden bei tiefen Temperaturen führen kann (OMV Refining & Marketing GmbH 2017).

Bei geeigneter Lagerung (siehe Kapitel 7.2.3: Komplexität des Energiespeichers) kann mit einer Haltbarkeit von drei bis sechs Monaten kalkuliert werden, bei einer relativen Unabhängigkeit von Umwelteinflüssen (Kemter 2021) (Kapitel 12.1 und 12.2: Experteninterviews).

Bei Dieselgeneratoren ist eine grundsätzliche Planbarkeit und Zuverlässigkeit durch mögliche Kraftstoffbevorratung gegeben. Dieser ist bei geeigneter Lagerung für drei bis sechs Monate ohne zusätzliche Einschränkungen haltbar.

- Energiespeicherkapazität

Als Energiespeicher dient den Dieselgeneratoren ein Kraftstofftank. Dieser reicht typischerweise für eine Versorgungsdauer von 12 bis 24 h bei einer Leistungsabgabe von ca. 75 % der maximalen Dauerleistung, siehe Tabelle 2. Bei Bedarf darüber hinaus kann entweder vor dem Einsatz ein entsprechend größerer Tank für die Anlagen vorgesehen werden oder aber der bestehende Tank muss während des Einsatzes nachbetankt werden. Dies ist mit handelsüblichen Kraftstoffen, erhältlich an jeder Tankstelle, möglich.

Der Kraftstoffverbrauch wird in den meisten Datenblättern in Liter pro Stunde bei einer Auslastung von 75 % der Dauerleistung angegeben. Durch Linearisierung kann der spezifische Verbrauch pro 1 kVAh bestimmt werden, worüber dann wiederum bei gegebenen Anforderungen (Leistung und Versorgungsdauer) ein entsprechend benötigtes Tankvolumen abgeschätzt werden kann. Der spezifische Verbrauch von Dieselgeneratoren liegt bei 0,2 bis 0,25 l/kVAh, wobei tendenziell die größeren Anlagen einen etwas besseren Wirkungsgrad aufweisen. Der Kehrwert, das Energievolumen, liegt also bei 4 bis 5 kVAh/l, bzw. 3,2 bis 4 kWh/l bei einem Leistungsfaktor von 0,8.

Zur 96-stündigen Versorgung einer 75-kVA-Last wird somit ein Tankvolumen von 1800 Litern benötigt. Zur Versorgung eines Krankenhauses mit einer Last von ca. 500 kVA über einen Zeitraum von 72 Stunden ergibt sich ein Tankvolumen von 7200 Litern.

Zusammengefasst liegt der spezifische Verbrauch von Notstrom-Dieselmotoren bei 0,2 bis 0,25 l/kVAh. Dies entspricht einem Energievolumen von 3,2 bis 4 kWh/l.

- Wirkungsgrad

Verluste, die während der Bereitstellungsphase zu erwarten sind, beschränken sich auf den aufgrund der Haltbarkeit des Dieselmotors notwendigen regelmäßigen Austausch des Kraftstoffs (OMV Refining & Marketing GmbH 2017). Operative Wirkungsgrade von Dieselmotoren variieren betriebsbedingt zwischen 40 % und 55 % (Diesel 1893). Aufgrund des geringen Verhältnisses von Einsatz- und Bereitstellungszeit ergeben sich die Gesamtverluste hauptsächlich aus der Haltbarkeit des Kraftstoffs.

8.1.2 Technische Anforderungen

- Größe und Gewicht

Für den mobilen Einsatz vorgesehene Notstromanlagen bis 75 kVA passen in der Regel auf einen 10-Fuß-Containeranhänger und wiegen dabei deutlich unter 1,5 t (siehe Tabelle 2). Damit sind grundsätzlich die Rahmenbedingungen für den Transport mit einem LKW bis 7,5 t erfüllt, sogar der Transport mit einem Kleintransporter bis 3,5 t wäre technisch möglich.

Ein entsprechender Tank wiegt ohne den Kraftstoff ca. 800 kg und nimmt ca. 11 m³ Raum ein (Tank und Apparate Barth GmbH 2017).

Für den stationären Einsatz in Krankenhäusern vorgesehene Anlagen bis 500 kVA benötigen mindestens den Platz eines 20-Fuß-Containers, damit wäre eine normale Standardraumhöhe von 2,4 m nicht ausreichend. Mobile Notstrom-Dieselmotoren sind mit Kleintransportern bzw. LKW einsatzfertig transportierbar.

- Notwendige konstruktive Anlagenstruktur und notwendige Peripherie

Mobile Notstromanlagen mit Dieselmotoren sind in der Regel fest auf einem LKW-Anhänger verbaut. Es gilt grundsätzlich: Wo der LKW mit dem Anhänger hinfahren kann, kann auch das Notstromsystem eingesetzt werden (Kapitel 12.2:

Experteninterview). Bei extremen Schräglagen des Anhängers kann durch Auf-fahrkeile eine stabile Position hergestellt werden, aber auch hydraulische Systeme zum Ausrichten des Anhängers sind denkbar, in den meisten Fällen jedoch nicht notwendig.

Bei dem Aufstellort für eine stationäre Notstromversorgungsanlage mit Diesel-generator sollte darauf geachtet werden, dass eine geeignete Abgasentlüftung gewährleistet werden kann. Darüber hinaus ergeben sich keine weiteren technischen Anforderungen an den Aufstellort. Es gelten die allgemeinen Hinweise zum Aufstellort für Notstromsysteme, wie beispielsweise, dass Anlagen vor Hochwas-sern und anderen Umwelteinflüssen geschützt und für Unbefugte unzugänglich aufgestellt werden sollen (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophen-hilfe 2019). Notstrom-Dieselaggregate erfordern keine besondere Peripherie über den Platzbedarf hinaus.

- Komplexität des Energiespeichers

Aus den in Kapitel 7.1.3 beschriebenen Ursachen ergeben sich Anforderungen an den Energiespeicher (den Kraftstofftank). Grundsätzliche Maßnahme, um der übermäßigen Bindung von Wasser im Kraftstoff vorzubeugen, ist die Wahl von geeigneten Tankmaterialien (z. B. Stahlblech). Zusätzlich sollte der Tank möglichst vollgefüllt und gegen die Atmosphäre abgeschlossen sein (OMV Refining & Marke-ting GmbH 2017). Das setzt vor allem einen geeigneten Nachfüllstutzen voraus. Neben allgemein sinnvollen Maßnahmen zur kraftstoffgeeigneten Lagerung existieren auch ganz konkrete Vorschriften, welche im Detail vor allem durch die Lagermenge und den Lagerort bestimmt werden. Für Dieseldieselkraftstoff gelten die jeweiligen Anforderungen des Baurechts für die Lagerung von Heizölen (Flamm-punkt > 55 °C) (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. 2011). Zusätzlich sind je nach Einsatzgebiet Umweltvorschriften zu beachten. Aus diesem Grund sind alle Kraftstofftanks des THW mit Auffangwannen versehen (Kapitel 12.2: Exper-teninterview). Es empfiehlt sich, unabhängig von Lagerort und Lagermenge einen korrosionsgeschützten, bruchsicheren Stahlblechtank mit Auffangwanne zur Be-vorratung zu nutzen.

- Anlaufzeit

Die Anlaufzeit, bis der Dieselmotor gestartet ist und der Synchrongenerator den Notstrom bereitstellen kann, liegt bei mobilen Notstromanlagen im Minutenbe-reich und damit deutlich unter der Zeit, die es braucht, die Anschlussverbindung zwischen Notstromanlage und zu versorgendem Notstromnetz herzustellen (weni-ger als 15 Minuten) (Kapitel 12.2: Experteninterview).

Für stationäre Notstromsysteme in Krankenhäusern ist eine Anlaufzeit unter 15 Sekunden gefordert. Für besonders kritische lebenserhaltende Geräte ist zusätzlich eine USV vorgesehen (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informations-technik e.V. 2012). Es werden alle gängigen Vorgaben und Normen bezüglich der Anlaufzeit erfüllt.

- Robustheit

Dieselgeneratoren gelten als sehr zuverlässig (Schulz et al. 2018). Bei regelmäßiger Wartung und Austausch von Verschleißteilen ist kein Ausfall der Anlage zu erwarten. Redundanzen sind in der Regel nur in der Form von zusätzlichen Gesamtsystemen, aber nicht von Systemkomponenten, vorgesehen (Kapitel 12.2: Experteninterview). Der Stromumwandlungsprozess von Dieselgeneratoren wird nicht durch Wetterereignisse beeinflusst. Auch mobile Diesel-Notstromsysteme befinden sich in der Regel nicht komplett den Umwelteinflüssen ausgesetzt. Die gängigen Systeme verfügen über ein Wetter- und Schallschutzgehäuse mit diversen Bedien- und Wartungsklappen zum Schutz vor Witterungseinflüssen, Diebstahl und zur Senkung der Geräuschemission (HO-MA Elektro Aggregate Service GmbH 2021a). Dieselgeneratoren haben sich als sehr robust und zuverlässig erwiesen (Kapitel 12.2: Experteninterview).

8.1.3 Organisatorische Anforderungen

- Transport und Aufbau

Der Transport eines mobilen Notstromdieselgenerators gestaltet sich denkbar einfach. Die Anlagen befinden sich einsatzbereit und transportfertig montiert auf der Anlagengröße entsprechenden LKW-Anhängern. Ein Fahrzeug pro Notstromanlage ist ausreichend. Die Zeit zum Aufbau und zur Inbetriebnahme ist maßgeblich von der Komplexität des Anschlusspunktes (Zugänglichkeit, Entfernung) abhängig und nicht von der Notstromanlage selbst. Ca. 15 Minuten nach Ankunft ist eine Bereitstellung der Notstromversorgung möglich (Kapitel 12.2: Experteninterview). Eine schnelle Einsatzbereitschaft zeichnet den Dieselgenerator aus.

- Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb

Im laufenden Betrieb kann der Personalbedarf zur Betreuung der mobilen Anlage auf eine Person, je nach Anwendungsfall sogar auf Rufbereitschaft, reduziert werden. Notwendige Betriebsmittel können bei längeren Einsätzen der Nachschub an Dieselkraftstoff sein. Dabei handelt es sich um einen gängigen Kraftstoff, der an allen Tankstellen verfügbar ist. Aufgrund der üblichen Tankgrößen für eine Versorgungsdauer von 12 bis 24 Stunden kann der Nachschub in der Regel ohne

Versorgungsunterbrechungen sichergestellt werden, da auch ein Nachtanken im laufenden Betrieb möglich ist (Kapitel 12.1 und 12.2: Experteninterviews).

Krankenhäuser bevorraten üblicherweise Kraftstoff für eine Versorgungsdauer von 24 h. Darüber hinaus bestehen oft Verträge mit Zulieferern (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2012) (Kapitel 12.1: Experteninterview).

Die Versorgung im laufenden Betrieb ist unproblematisch und ohne Versorgungsunterbrechung möglich.

- Instandhaltungsaufwand

Um die Einsatzbereitschaft der Notstromanlage im Notstromfall gewährleisten zu können, ist eine regelmäßige Wartung erforderlich. Andernfalls drohen Konsequenzen wie die Bildung von Kondensaten, welche das Öl verunreinigen und unbrauchbar machen, die Regler verkleben und Schläuche schneller porös werden lassen (HO-MA Elektro Aggregate Service GmbH 2023b). Zu den Wartungsmaßnahmen zählen unter anderem: Zündkerzen austauschen, Ölstand prüfen, Reinigen, Luftfilter kontrollieren (Hansen 2021). Grundsätzlich existieren für alle Notstromdieselgeneratoren Handbücher zur Bedienung und Wartung sowie Wartungsunternehmen, welche diese Aufgabe übernehmen (HO-MA Elektro Aggregate Service GmbH 2021b, Hansen 2021, SDMO Industries 2021).

- Personal- und Qualifikationsbedarf

Zur Bedienung und vor allem zum Zuschalten des Generators auf das Notstromnetz ist grundsätzlich eine Elektrofachkraft erforderlich. Die vorbereitenden Anschlussmaßnahmen können allerdings auch von für diese Aufgaben elektrisch unterwiesenen Personen durchgeführt werden. Typischerweise besteht eine E-Gruppe des THW aus fünf bis sechs Personen. Zum Anschluss der Anlage reichen auch zwei bis drei Personen aus. Neben der grundsätzlichen Qualifikation als Elektrofachkraft ist für den Einsatz von mobilen Notstromdieselgeneratoren im öffentlichen Bereich eine mehrtägige Schulung notwendig. Diese gilt dann allerdings unabhängig vom speziellen Anlagentyp (Kapitel 12.2: Experteninterview). Zum Betrieb mobiler Notstromanlagen sollten mindestens zwei bis drei Elektrofachkräfte mit entsprechender Schulung vorgesehen werden.

- Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen

Dieselgeneratoren haben in der Regel eine sehr lange Nutzungsdauer. Daher kann es bei älteren Geräten passieren, dass Ersatzteile nicht mehr kurzfristig lieferbar sind. In der Regel handelt es sich aber um eine erprobte und weit verbreitete Tech-

nologie, deren Betriebsmittel wie Schmieröle und Filter keine besonderen Anforderungen stellen und leicht erhältlich sind (Kapitel 12.1 und 12.2: Experteninterview). Der Kraftstoff ist ebenfalls überall verfügbar. Ersatzteile und Betriebsstoffe sind in der Regel kurzfristig lieferbar.

- Genehmigungsaufwand

Vorschriften für Notstromdieselgeneratoren sind:

- DIN VDE 0100-551 (VDE 0100-551):2017-02 Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-55 Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Andere Betriebsmittel – Abschnitt 551: Niederspannungsstromerzeugungseinrichtungen (IEC 60364-5-55:2001/A2:2008 (Abschnitt 551)); Deutsche Übernahme HD60364-5- 551:2010+Cor.:2010+A11:2016
- DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06 Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag (IEC 60364-4-41:2005, modifiziert); Deutsche Übernahme HD 60364-4-41:2007
- DIN EN 61557-8 (VDE 0413-8):2015-12 Elektrische Sicherheit in Niederspannungsnetzen bis AC 1 000 V und DC 1 500 V – Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen – Teil 8: Isolationsüberwachungsgeräte für IT-Systeme (IEC 61557-8:2014); Deutsche Fassung EN 61557-8:2015
- DIN EN 61557-2 (VDE 0413-2):2008-02 Elektrische Sicherheit in Niederspannungsnetzen bis AC 1 000 V und DC 1 500 V – Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen – Teile 2: Isolationswiderstand
- DIN 6280:1986-10 Stromerzeugungsaggregate mit Hubkolbenverbrennungsmotor

Bei der Anschaffung von Dieselnotstromgeneratoren handelt es sich um ein Standardverfahren. Für jeden Anwendungsfall existieren entsprechend zertifizierte und geeignete Dieselnotstromsysteme. Für den originären Betrieb als Notstromsystem ist kein außergewöhnlicher Genehmigungsaufwand zu erwarten.

8.1.4 Sicherheitsanforderungen

- IT-Bedarf

Mobile Dieselnotstromaggregate benötigen keine IT und es sind auch keine Schnittstellen dafür vorgesehen (Kapitel 12.2: Experteninterview). Bei mobilen Anwendungen ist kein Sicherheitsrisiko aufgrund von IT-Schwachstellen zu erwarten. Bei stationären Anlagen ist aufgrund der Reaktionsfähigkeit mindestens ein Regel-

kreis notwendig. Da dieser in der Regel digital ausgeführt wird, ist IT notwendig. Marktüblich ist es, dass vernetzte IT verbaut wird (Caterpillar Corporate 2021).

- Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung

Von Dieselgeneratoren ausgehende Gefahren sind Schäden aufgrund des Lärms und der Abgase. Dem kann durch Schallschutzmaßnahmen wie schallisolierte Gehäuse, eine persönliche Schutzausstattung (PSA) mit Gehörschutz, durch Filter oder eine entsprechende Durchlüftung, bzw. bei mobilen Anlagen durch das Aufstellen im Außenbereich entgegengewirkt werden. Durch den verwendeten Diesel bestehen zusätzliche Gefährdungspotentiale für Natur und Umwelt durch Verunreinigung und eine generelle Brandgefahr. Nicht bewertet werden grundsätzliche Risiken im Umgang mit elektrischen Spannungen (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2019).

- Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus

Die mobilen Anlagen sind grundsätzlich in Containersystemen eingebaut und können durch abschließbare Türklappen vor dem Zugriff unbefugter Personen geschützt werden (Kapitel 12.2: Experteninterview). Nicht immer vor physischer Beschädigung geschützt werden können die Kabel, Sammelschienen und Anschlüsse des Notstromnetzes. Dies ist allerdings unabhängig von der notstrombereitstellen- den Anlage der Fall.

Stationäre Anlagen befinden sich in für unbefugte Personen unzugänglichen, abschließbaren und separaten Räumen (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2019).

Um den Anlagen durch Sabotage und Vandalismus ernsthafte Beschädigungen zuzufügen, ist ein erheblicher Aufwand notwendig.

8.1.5 Marktorientierte Anforderungen

- Investitionskosten

Mobile Notstromsysteme mit Dieselgeneratoren und einer Leistung um die 60 kVA kosten um die 15.000 Euro (BSE USV-Technik GmbH & Co. KG 2021). Größere Anlagen, die auch zur Versorgung eines Krankenhauses bis 500 kVA eingesetzt werden können, liegen bei ca. 85.000 Euro (Endress 2021). Dazu kommen noch geringe Kostenanteile für die Anbindung und periphere Anlagen sowie system- und standortabhängige Kosten für die Installation und den Aufbau. Die Kosten des Tanks belaufen sich auf ca. 6.000 Euro (Tank und Apparate Barth GmbH 2017).

- Operative Kosten

Dieselpreise unterliegen mitunter starken Preisschwankungen und ein großer Anteil des Preises sind Steuern. Der aktuelle Dieselpreis an der Tankstelle liegt bei ca. 1,40 Euro pro Liter (Drahn 2021). Bei den in der Kategorie „Energiespeicherkapazität“ ermittelten Energievolumina ergeben sich folgende operative Kosten:

Bei einem Einsatz der mobilen Anlage mit 75 kVA Leistung und einem Dieselmotor mit einem spezifischen Verbrauch von 0,25 l/kVAh entstehen Kosten in Höhe von 18,75 Euro pro Volllaststunde an Kraftstoffkosten. Während des Betriebs reicht eine Elektrofachkraft aus, um das System zu kontrollieren. Die Kosten für die Elektrofachkraft werden vom THW mit 12,50 Euro pro Stunde in Rechnung gestellt (Kapitel 12.2: Experteninterview). Die tatsächlichen Kosten für das Personal können davon abweichen, da ein Großteil der THW-Mitarbeitenden freiwillig hilft und deren Arbeitgebenden eine, dem Gehalt des Mitarbeitenden entsprechende, Ausfallentschädigung gezahlt wird. Die Differenz wird vom THW finanziert (Kapitel 12.2: Experteninterview). Insgesamt belaufen sich daher die operativen Kosten auf 31,25 Euro pro Stunde.

Die operativen Kosten beim Einsatz einer größeren 500-kVA-Anlage mit einem spezifischen Verbrauch von 0,2 l/kVAh zur Versorgung eines Krankenhauses bei Volllast belaufen sich auf ungefähr 100 Euro pro Stunde für Kraftstoff.

Nicht betrachtet wurden laufende Kosten beispielsweise aufgrund von Garantieverträgen mit Zulieferern zur Versorgung mit Kraftstoff im andauernden Notstrombetrieb, da diese sehr speziell ausfallen und nicht zu verallgemeinern sind. Die operativen Kosten einer mobilen Anlage mit 75 kVA werden auf 31,25 Euro und die einer stationären mit 500 kVA auf 100 Euro pro Stunde geschätzt.

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, wird für die Bewertung der Technologie Biomasse lediglich die Verstromung von Biomethan in Gasmotoren betrachtet. Dies hat den Hintergrund, dass Biomethan in der Zusammensetzung Erdgas ähnelt und dieses somit ersetzen kann. Zudem gibt es bereits zahlreiche Anlagen am Markt, die elektrische Energie aus der Verbrennung von Erdgas gewinnen. Bei diesen Anlagen handelt es sich im benötigten Leistungsbereich vorrangig um BHKWs, weshalb diese für die Bewertung herangezogen werden. Biodiesel wird aufgrund der weitestgehenden Übereinstimmung mit konventionellen Dieselmotoren nicht berücksichtigt. Das System besteht folglich aus mindestens einem Gasmotor, einem Biomethantank und einer Steuereinheit.

8.2.1 Energetische Anforderungen

- Leistungsanforderungen

Stromgeneratoren, die Erdgas oder Biomethan als Kraftstoff verwenden, sind in nahezu allen Leistungsbereichen von wenigen kW (Ademax Deutschland GmbH & Co. KG 2021) für den Heimgebrauch über mehrere kW (Rolls-Royce Power Systems AG 2021, 2G Energy AG 2021) bis hin zu mehreren MW (Caterpillar Energy Solutions GmbH 2021) für industrielle Anlagen verfügbar, siehe Tabelle 3. Diese Anlagen sind allerdings in der Regel nicht für den Notstromfall vorgesehen. Unter den betrachteten Technologien hat lediglich ein Anbieter BHKW-Anlagen bis 75 kW, die explizit für den Notstromfall geeignet sind, im Angebot (42technology 2021). Allerdings geben auf Nachfrage weitere Anbieter an, ihre Anlagen für den Inselnetzbetrieb auslegen zu können. Bei noch höheren Leistungsanforderungen besteht sogar die Möglichkeit der Nutzung von Gasturbinen. Somit werden die nötigen Leistungsbereitstellungen für beide Szenarien erfüllt.

- Regel- und Skalierbarkeit

BHKWs lassen sich grundsätzlich modular aufbauen (Kapitel 12.6: Experteninterview). Somit kann eine Anlage bei zusätzlichem Leistungsbedarf durch ein weiteres BHKW erweitert werden. Zudem sind Gasmotoren in einem breiten Spektrum schnell regelbar (Messerschmid Energiesysteme GmbH 2021). Aufgrund des im Vergleich zum Dieselmotor geringeren maximalen Lastgradienten ist die Regel-

barkeit schlechter zu bewerten. Somit sind die Skalierbarkeit und Regelbarkeit grundsätzlich gegeben.

- Energieträger-Verfügbarkeit

Biomethan wird aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen. Die Energie wird dabei in chemischer Form gespeichert, welche bei Bedarf als Kraftstoff für die Stromerzeugung genutzt werden kann. Biomethan lässt sich lagern und steht somit grundsätzlich im Bedarfsfall unabhängig von Umwelteinflüssen zur Verfügung. Durch entsprechende Lieferverträge und -garantien, sowie einer ausreichenden Bevorratung für Überbrückungszeiten kann einer Versorgungsknappheit entgegengewirkt werden. Zusätzlich bestünde aufgrund der Substituierbarkeit im Notfall die Möglichkeit, auf herkömmliches Erdgas zurückzugreifen.

- Energiespeicherkapazität

Biomethan lässt sich als Flüssiggas Bio-LNG in Tanks oder als Druckgas Bio-CNG in Gasflaschen oder Gastanks lagern. Druckgasflaschen werden typischerweise in 50 l ausgeführt und können zu Bündeln zusammengefasst werden (Linde GmbH 2021a). Der Kraftstoffbedarf wird anhand eines Wirkungsgrades von 37,5 % und des Heizwerts von Misch-Erdgas in Höhe von 10,27 kWh/Nm³ bestimmt (Dortmunder Energie- und Wasserversorgung GmbH 2021). Somit ergibt sich ein spezifischer Raumbedarf von 0,26 Nm³/kWh oder 260 l/kWh. Bei einem Druck von 200 bar erhält man dann einen effektiven Kraftstoffverbrauch von 1,3 l/kWh. Über die Dichte von Biomethan, 0,793 kg/Nm³, ergibt sich eine spezifische Gewichtsbelastung von etwa 0,21 kg/kWh (Dortmunder Energie- und Wasserversorgung GmbH 2021). Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Nutzung eines Gasnetzes als Energiespeicher mit einer für die Anwendung nahezu unendlichen Speicherkapazität. Allerdings existieren bisher keine Gasnetze, die ausschließlich auf Biomasse beruhendes Gas verteilen. Zudem besteht die Möglichkeit, dass bei einem Ausfall des Stromnetzes auch das Gasnetz betroffen ist und für die Nutzung nicht mehr zur Verfügung steht.

Der spezifische Verbrauch des BHKWs liegt bei ca. 1,3 l/kWh bei 200 bar Druck. Dies entspricht einem Energievolumen von 0,77 kWh/l.

- Wirkungsgrad

Der elektrische Wirkungsgrad der Verstromung von BHKW liegt durchschnittlich bei ca. 37,5 % (Dortmunder Energie- und Wasserversorgung GmbH 2021), siehe Tabelle 3. Es ist nicht bekannt, dass sich Biomethan während der Lagerung zersetzt. Wie hoch die typischen Verluste während der Einlagerungszeit aufgrund von Undichtigkeiten sind, kann nicht bestimmt werden.

Es sind grundsätzlich nur verschwindend geringe Lagerverluste bei der Bevorratung von Biomethan zu erwarten.

8.2.2 Technische Anforderungen

- Größe und Gewicht

Die verschiedenen Technologien, welche Biogas oder Erdgas als Brennstoff nutzen können, sind in der Regel etwas größer und schwerer als herkömmliche Dieselaggregate. Zudem sind größere Energiespeicher nötig. Zur Bewertung werden Daten von verfügbaren Anlagen mit entsprechender Leistungsbereitstellung genutzt, siehe Tabelle 3.

Zur mobilen Anwendung werden BHKW mit einer Leistung von 75 kW angeboten, wovon einige in der Lage sind, Biogas als Brennstoff zu nutzen, siehe Tabelle 3. Entsprechende Anlagen haben in der Regel ein Gewicht von ca. 2.500 bis 3.000 kg. Die Abmaße können baubedingt unterschiedlich ausfallen. Typische Abmaße liegen bei einer Länge von 2,7 bis 3,7 m, einer Breite von ca. 1,0 m und einer Höhe von ca. 2,0 m (Sokratherm GmbH 2021a). Somit sind diese Anlagen prinzipiell mit LKWs transportierbar. Auch das Aufstellen auf geeigneten Anhängern wäre technisch möglich. Für eine Bereitstellungszeit von 96 Stunden müssen gemäß den Kennwerten aus Energiespeicherkapazität 1.512 kg oder 1.872 Nm³ Biomethan bevorratet werden. Druckflaschenbündel mit zwölf Gasflaschen und einem Druck von 200 bar weisen einen Inhalt von ungefähr 145 Nm³ Biomethan auf (GasCom-Equipment GmbH 2021). Somit wären für die Bevorratung 13 Flaschenbündel notwendig. Bei einem Platzbedarf von 1,47 m² pro Flaschenbündel ist für die Aufstellung der nötigen Gasflaschen eine Fläche von mindestens 19,11 m² nötig (Lindenfield GmbH 2021a). Flüssiges Biomethan weist eine Dichte von 450 kg/m³ auf (Partz 2021). Somit wäre beim Einsatz von Bio-LNG ein Tankvolumen von 3,36 m³ nötig. Ein Tank, der genügend Speicherkapazität bietet, hat einen Durchmesser von 1,6 m und eine Länge von 7,01 m bei einem Gewicht von 4,91 t.

Die beispielhaften BHKW mit einer Leistung um die 500 kVA für den stationären Anwendungsfall haben ein Betriebsgewicht von ca. 7,3 t. Dabei messen entsprechende Anlagen eine Länge von 3,7 m, bei einer Breite von 1,5 m und einer Höhe von 2,6 m (Sokratherm GmbH 2021b). Somit ist eine normale Raumhöhe von 2,4 m für die Aufstellung eines solchen Aggregats nicht ausreichend. Die Abmaße von BHKWs können je nach Hersteller sehr unterschiedlich ausfallen. Grundsätzlich sind BHKW bezogen auf ihre Größe und ihr Gewicht sowohl für den mobilen als auch den stationären Einsatz geeignet. Für die Bevorratung im stationären Fall ist eine Bereitstellung über 72 Stunden vorgesehen. Damit ist eine Speicherkapazität von 7.560 kg oder 9.360 Nm³ nötig. Bei der Nutzung von Flaschenbündeln sind

somit 65 Flaschenbündel notwendig, welche einen Flächenbedarf von 95,55 m² aufweisen. Bei der Nutzung von Bio-LNG müssen 16,8 m³ bevorratet werden. Ein entsprechender Tank weist einen Durchmesser von 2,4 m und eine Länge von 8,33 m bei einem Leergewicht von 10,13 t auf (Lindenfield GmbH 2021b).

- Notwendige konstruktive Anlagenstruktur und notwendige Peripherie

Die Anlage benötigt je nach Aufstellungsort eine Abdeckung für den Schallschutz, welche gleichzeitig als Schutz gegen Umwelteinflüsse und den Zugriff Dritter dienen kann. Die Anforderungen an solche Abdeckungen entsprechen grundsätzlich den bereits bei Dieselgeneratoren eingesetzten Abdeckungen.

Zusätzlich wird eine Kühlung zur Abfuhr der beim Betrieb entstehenden Wärme benötigt. Bei stationären BHKWs wird diese typischerweise über die Einbindung der Heizungsanlage erreicht. Für den Aufbau des Tanks und des BHKWs wird eine Bodenplatte benötigt. Die Abgase müssen über ein geeignetes Rohr abgeleitet werden. Sollten keine Flaschenbündel oder kein Tank für die Bevorratung vorgesehen sein, ist eine Anbindung an das Gasnetz notwendig. Die genannte Anlagenstruktur ist somit komplexer als die eines Dieselgenerators.

- Komplexität des Energiespeichers

Bio-CNG wird in Druckbehältern oder in Gasflaschen, die einem Druck von über 200 bar standhalten müssen, gelagert. Somit bedarf der Speicher einer entsprechend robusten Bauweise und unterliegt einer regelmäßigen Kontrollpflicht. Festgehalten sind die Vorgaben in den Technischen Regeln der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2016a, 2016b):

- TRBS 3145/TRBS 745: Ortsbewegliche Druckgasbehälter – Füllen, Bereithalten, innerbetriebliche Beförderung, Entleeren, Technische Regel für Betriebssicherheit
- TRBS 3146/TRBS 726: Ortsfeste Druckanlagen für Gase

Hierzu zählen beispielsweise die Einrichtung einer Explosionsschutzzone sowie eine Überdruckabsicherung des Tanks.

Bio-LNG wird nicht unter hohem Druck, dafür allerdings bei einer Temperatur von -161 °C tiefkalt gelagert, wodurch Herausforderungen auftreten, wie beispielsweise eine geeignete Isolation oder die Notwendigkeit der regelmäßigen Entnahme zur Vermeidung von Druckanstiegen (Hermeling 2020). Die Lagerung und damit der Energiespeicher gestalten sich komplexer als dies bei Dieseltanks der Fall ist, da der

Biogas-Kraftstoff bei Überdruck als Bio-CNG oder tiefkalt als BIO-LNG gelagert werden muss.

Bei der Lagerung von CNG und LNG sind für den Nachbetankungsvorgang zusätzlich spezielle Kupplungen nötig, die ein Entweichen von Gas während des Nachbetankungsvorgangs vermeiden. Bei der Nutzung von Druckgasflaschen ist die Möglichkeit des parallelen Betriebes mehrerer Druckgasflaschen nötig.

- Anlaufzeit

Die Anlaufzeit von Gasmotoren liegt ähnlich wie bei Dieselmotoren im Minutenbereich. Speziell BHKWs sind nach spätestens 10 Minuten auf Betriebstemperatur und vollständig leistungsfähig (Kapitel 12.6: Experteninterview). Einige Hersteller geben für den Initialstart an, dass spätestens nach 30 bis 40 s 80 % der maximalen Leistung erreicht werden. Andere Hersteller von größeren Gasmotoren geben Anlaufzeiten von 120 Sekunden an (Maluck 2019). Für die mobile Anwendung liegt die Anlaufzeit somit äquivalent zum Dieselgenerator deutlich unter der Anschlusszeit von 15 Minuten. Die für die stationäre Notstromversorgung in Krankenhäusern geforderte Anlaufzeit von unter 15 Sekunden kann jedoch nicht eingehalten werden, weshalb eine zusätzliche Versorgung zur Überbrückung der Anlaufzeit nötig ist. Eine Versorgung nach bereits 15 Sekunden aus einem Kaltstart heraus kann somit nicht sichergestellt werden, weshalb das Kriterium als negativ bewertet wird.

- Robustheit

Gasgeneratoren gelten ähnlich wie Dieselgeneratoren als sehr robust, sodass bei regelmäßiger Wartung und dem Austausch von Verschleißteilen kein Anlagenausfall zu erwarten ist. Auch hierbei sind Redundanzen lediglich in zusätzlichen Gesamtsystemen vorgesehen. Auch der Prozess der Stromerzeugung wird nicht von Wetterereignissen beeinflusst. Allerdings haben sich lange Standzeiten bei BHKWs als problematisch erwiesen. Idealerweise sind BHKWs durchgehend in Betrieb (Kapitel 12.6: Experteninterview).

Systeme zur Stromerzeugung aus Gas sind je nach Art und Größe des Systems in der Regel eingehaust oder in geschlossenen Räumen verbaut. Aus diesem Grund sind diese Systeme Umwelteinflüssen nur bedingt ausgesetzt. Dies gilt auch für mobile Systeme, bei denen die Montage eines Wetter- und Schallschutzgehäuses möglich und sinnvoll ist. BHKWs gelten grundsätzlich als sehr robust und nicht fehleranfällig, allerdings ist diese Technologie für lange Standzeiten ohne Betrieb ungeeignet, was den Einsatz als reines Notstromsystem fraglich macht.

8.2.3 Organisatorische Anforderungen

- Transport und Aufbau

Im Bereich von BHKWs sind mobile Anwendungen bisher kaum bekannt. Dies liegt vor allem darin begründet, dass diese Anlagen hauptsächlich als Anlagen zur KWK in Industriefanwendungen oder zur Versorgung von Wohnhäusern und damit stationär installiert werden. Vereinzelt existieren allerdings auch mobile BHKWs. Ein Beispiel hierfür ist ein auf einem Anhänger montiertes BHKW mit einer elektrischen Leistung von 50 kW, welches 2020 durch die Stadtwerke Hemer in Betrieb genommen wurde (Sokratherm GmbH 2021c). Grundsätzlich ist ein mobiler Einsatz auch für größere Anlagen denkbar.

Die Herausforderung dabei ist, die Abfuhr der im Betrieb entstehenden Wärmeenergie zu ermöglichen, ohne dabei die KWK nutzen zu können. Hierfür wären Wärmeüberträger notwendig, welche zusätzlich auf dem Transportmittel installiert werden müssten oder auf weiteren Transportmitteln bereitstehen. Darüber hinaus muss ein ca. 4-5-mal größerer Treibstofftank, in diesem Fall Gastank, als dies bei einem Dieselgenerator der Fall wäre, mitgeführt werden, um eine ähnliche Versorgungsdauer gewährleisten zu können. Der Transport und Aufbau eines mobilen BHKW ist möglich. Zur Abfuhr der entstehenden Wärme werden allerdings noch mobile Lösungen benötigt.

- Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb

Es gibt in Deutschland bereits Tankstellen, die Bio-CNG vertreiben. Diese sind allerdings nicht flächendeckend vorhanden (OG Clean Fuels 2021). Bei vertraglichen Regelungen mit Lieferanten sollte eine Beschaffbarkeit von Biomethan im Einsatzfall gegeben sein. Im Notfall kann jedoch auch auf herkömmliches Erdgas zurückgegriffen werden.

Da es sich bei Biomethan um ein Gas handelt, ist der Transportprozess für Biomethan deutlich komplexer als bei Diesel. Dies liegt unter anderem daran, dass Biomethan gasförmig unter hohem Druck oder flüssig bei tiefkalten Temperaturen transportiert werden muss.

Der Betankungsprozess gestaltet sich bei Bio-LNG komplexer als bei Dieselkraftstoff. Bio-LNG muss dem Tank bei tiefkalten Temperaturen zugeführt werden, wodurch unter anderem spezielle Kupplungen nötig sind. Während des Betankungsprozesses ist eine PSA, wie Brille und Handschuhe, für den Betankenden notwendig (Rolande Germany GmbH 2020). Bio-CNG-Druckgasflaschen können

nicht direkt nachbetankt werden. Leere Flaschen werden an den Hersteller zurückgeschickt und durch volle ersetzt.

Die Verfügbarkeit ist etwas schlechter als bei Dieselmotoren zu bewerten. Eine besondere Herausforderung stellt die Nachbetankung und der Transport dar.

- Instandhaltungsaufwand

Die von Herstellern angegebenen Wartungsintervalle für BHKWs betragen zwischen 2.000 und 4.000 Betriebsstunden. Nach 50.000 Betriebsstunden wird eine Generalüberholung empfohlen. Diese Angaben gelten allerdings für den Standard Dauerbetrieb. Eine Wartungsempfehlung für den Notstrombetrieb mit üblicherweise längeren Standzeiten existiert nicht und ist daher schwer abzuschätzen.

Darüber hinaus werden bei Gastanks Wartungen und Überprüfungen fällig. Die Wartung wird dabei in der Regel alle zwei Jahre durchgeführt. Eine Überprüfung durch den TÜV findet alle zehn Jahre statt (PRIMAGAS Energie GmbH 2021).

Auch bei Drucktanks für Erdgas fällt eine sich wiederholende Prüfung gemäß des Anhangs 2 Abschnitt 4 der Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV) an.

Der Instandhaltungsaufwand für ein Biomethan-BHKW für den Notstrombetrieb wird aufgrund der kurzen Prüfintervalle höher eingeschätzt als bei Dieselmotoren.

- Personal- und Qualifikationsbedarf

Zur Bedienung und vor allem zum Zuschalten des Generators auf das Notstromnetz ist wie beim Dieselmotor eine Elektrofachkraft erforderlich. Die vorbereitenden Anschlussmaßnahmen können ebenfalls von für diese Aufgaben elektrisch unterwiesenen Personen durchgeführt werden. Für die Wartung ist ein entsprechend qualifiziertes Personal erforderlich. Die Bedienung und Überwachung im Betrieb kann durch elektrisch unterwiesene Personen erfolgen. Für mobile Anlagen ist eine Elektrofachkraft erforderlich. Stationäre Anlagen können von elektrisch unterwiesenen Personen betrieben werden.

- Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen

Da es sich bei Gasmotoren ebenfalls um Ottomotoren handelt, existieren ebenfalls zahlreiche Hersteller, was die Ersatzteilbeschaffung erleichtert. Die Beschaffung

von Ersatzteilen und Betriebsstoffen auch aus Deutschland ist somit als unproblematisch einzustufen.

Im April 2020 waren deutschlandweit an 210 Standorten insgesamt 219 Anlagen zur Aufbereitung von Biomethan mit einer Aufbereitungskapazität von 133.734 Nm³/h in Betrieb (Völler und Reinholz 2019). Dies entspricht einem Heizwert von ca. 1,34 GWh pro Stunde. Umgesetzt mit BHKW wären das ca. 502,5 MWh elektrische Energie. Somit zeigt sich, dass der Bezug des Kraftstoffs aus Deutschland möglich ist.

- **Genehmigungsaufwand**

Für den Betrieb von Anlagen zur Biomethan-Verstromung von etablierten Herstellern ist keine Genehmigung notwendig. Bei einem netzintegrierten Betrieb ist lediglich eine Genehmigung des Stromnetzbetreibers erforderlich (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2018a). Es ist allerdings darauf zu achten, dass der Netzanschluss nach den gängigen Vorgaben und Normen erfolgt. Auch der Aufbau der Anlage und der nötigen Peripherie muss den gängigen Vorschriften entsprechen. Zusätzlich ist eine Melde- und Nachweispflicht für KWK-Anlagen zu erbringen (Jäger und Gerlach 2018).

Für den Bau eines ortsfesten Druckgasbehälters ist abhängig vom Bundesland beim Überschreiten einer bestimmten Größe eine Baugenehmigung erforderlich (IndustrieGaseVerband e.V. – Expertengruppe Behälter 2018). Für die meisten Bundesländer gilt hier ein Fassungsvermögen von 3 t als Grenze, über der eine Baugenehmigung und eine Genehmigung gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz nötig wird (Propan Rheingas GmbH & Co. KG 2021). Druckbehälter für die Lagerung von Bio-CNG benötigen für den Betrieb zudem eine Zertifizierung gemäß der Verordnung über Druckbehälter, Druckgasbehälter und Füllanlagen (Druckbehälterverordnung – DruckbehV).

BHKWs sind ohne zusätzlichen Genehmigungsaufwand für den Einsatz als Notstromanlage nutzbar, lediglich für den Tank und bei geplanter Netzkopplung werden weitere Regularien relevant.

8.2.4 Sicherheitsanforderungen

- **IT-Bedarf**

Anlagen zur Verstromung von Gas weisen keinen IT-Bedarf auf. Trotzdem werden Anlagen häufig mit einer Regelung oder Steuerung ausgerüstet, welche allerdings nicht vernetzt sein muss. Zur Online-Überwachung kann eine vernetzte IT

installiert werden (Burkhardt GmbH 2021). Im mobilen Anwendungsfall ist kein Sicherheitsrisiko aufgrund von IT-Schwachstellen zu erwarten. Für das stationäre Anwendungsszenario ist, ähnlich wie beim Dieselgenerator, mindestens nicht ver-netzte IT notwendig.

- Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung

Gasmotoren unterliegen höheren Sicherheitsanforderungen als herkömmliche Dieselmotoren, da sich bei Gasaustritten schnell eine explosionsfähige Atmosphäre bilden kann (Hermeling 2020). Explosionsfähige Gasgemische aus Erdgas und Luft weisen einen volumenspezifischen Erdgasanteil zwischen 4,5 und 16,5 Vol% auf (Stadtwerke Villingen-Schwenningen GmbH 2023). Um die Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphären zu verhindern, fordert die TRB 610: Technische Regeln zur Druckbehälterverordnung, einen um die möglichen betriebsbedingten Gasaustrittsstellen ausreichend bemessenen explosionsgefährdeten Bereich festzulegen und in diesem Zündquellen zu vermeiden (TRBS 3146/TRGS 726 Absatz 4.1).

Methan bildet mit Sauerstoff explosive Gemische, weshalb eine Explosion als kritisches Ereignis betrachtet werden muss. Eine Explosion kann zu schweren Verletzungen oder zum Tod führen. In der näheren Umgebung kann eine Explosion je nach Schwere erhebliche Schäden nach sich ziehen. Weitere Gefährdungen können von Lärm oder Abgasen ausgehen. Schäden durch Lärm lassen sich durch den Einsatz von PSA oder durch Schallschutzisolierungen vermeiden. Abgasbelastung kann durch den Einsatz von Filtern, einer guten Belüftung oder das Aufstellen im Außenbereich entgegengewirkt werden (Ausschuss für Gefahrstoffe – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2019).

Insgesamt geht von Methan ein hohes Risiko aus, bei unsachgemäßem Umgang besteht Explosionsgefahr.

- Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus

Bei Anlagen zur Stromerzeugung aus Gas verhält es sich wie bei Dieselgeneratoren. Diese sind häufig in Gebäuden installiert oder eingehaust, weshalb die Anlagen vor dem Zugriff von Dritten sehr gut geschützt sind.

Stationär verbaute Gastanks können in die Erde eingelassen werden, wodurch auch diese gegen einen Zugriff von außen geschützt sind. Lediglich der Domdeckel muss freiliegen. Dieser lässt sich allerdings ebenfalls durch bauliche Maßnahmen schützen. Aufgrund der Kompaktheit der Anlage lässt sich diese gut vor dem Zugriff Dritter und damit vor Sabotage schützen.

8.2.5 Marktorientierte Anforderungen

- Investitionskosten

Die Anschaffungskosten belaufen sich bei Großanlagen zur KWK ab 500 kW elektrischer Leistung auf bis zu 500 €/kW (Anondi GmbH 2021a). Somit ergeben sich für eine stationäre Anwendung mit 500 kW Leistung Anschaffungskosten in Höhe von ca. 250.000 €.

Die Anschaffungskosten für mobile Anlagen zur KWK in einem Leistungsbereich von 50 bis 75 kVA werden mit den Kosten für Mini-BHKWs mit 1.700 – 2.300 €/kW abgeschätzt. Damit ergibt sich ein ungefährender Anschaffungspreis von 85.000 bis 172.500 Euro (Anondi GmbH 2021a). Hinzu kommen die Kosten für Installation, Inbetriebnahme und Planung. Diese werden in Höhe von 30 % der Anschaffungskosten kalkuliert, können entsprechend der Gegebenheiten vor Ort allerdings sehr unterschiedlich ausfallen (Kapitel 12.5: Experteninterview).

Um die Kosten eines geeigneten Speichers zu bestimmen, liegen keine Daten vor. Aus diesem Grund werden die Kosten entsprechend der Kosten für einen LPG-Tank abgeschätzt. Für einen Tank mit einem Fassungsvermögen von 4.850 l fallen Kosten in Höhe von ca. 3.800 € an (Kesselheld GmbH 2021). Die mobile Anwendung benötigt für LNG ein Tankvolumen von ungefähr 3.360 l und für CNG von ungefähr 9.360 l, womit sich bei einer linearen Skalierung Investitionskosten in Höhe von ungefähr 2.600 € für LNG und 7.300 € für CNG ergeben. Bei der stationären Anwendung belaufen sich die Kosten für den LNG-Tank auf ca. 13.200 € und für einen CNG-Tank auf etwa 36.700 €. Bei diesen Angaben handelt es sich lediglich um eine Abschätzung und die realen Preise für den Tank können stark abweichen.

- Operative Kosten

Die Kosten für die kWh Biomethan beliefen sich im Jahr 2018 je nach Erzeugung auf 6,9 ct bis 7,2 ct (Völler und Reinholz 2019). Für die weitere Berechnung wird der Höchstbetrag von 7,2 ct zugrunde gelegt.

Gemäß der Berechnung der Energiespeicherkapazität wird für die mobile Anwendung Biomethan mit einem Energiegehalt von 200 kWh pro Stunde benötigt. Damit ergeben sich Kraftstoffkosten in Höhe von 14,40 €/h. Es werden Personalkosten mit 12,50 €/h abgeschätzt (Kapitel 12.2: Experteninterview). Die gesamten operativen Kosten belaufen sich somit auf 26,90 €/h.

Für die stationäre Anwendung wird angenommen, dass kein zusätzliches Personal für den Betrieb benötigt wird. Gemäß der Berechnung der Energiespeicherkapazi-

tät wird Biomethan mit einem Energiegehalt von 1,33 MWh pro Stunde benötigt. Dadurch ergeben sich Kraftstoffkosten in Höhe von 96 €/h.

Die operativen Kosten einer mobilen Anlage mit 75 kVA werden auf 26,90 Euro und die einer stationären mit 500 kVA auf 96 Euro pro Stunde geschätzt. Bei einer angenommenen Einsatzzeit von 30 Stunden im Jahr ergeben sich somit jährliche Betriebskosten in Höhe von 807 Euro für die mobile und 2.880 € für stationäre Anlagen. Hinzu kommen noch Instandhaltungskosten, welche mit 1000 Euro pro Jahr abgeschätzt werden.

Wie bereits in Abschnitt 6.2 erläutert wurde, existieren unterschiedliche Ausführungen von Brennstoffzellen. Die SOFC sind vor allem für einen stationären und kontinuierlichen Betrieb konzipiert, da die hohen Betriebstemperaturen bei häufigen Lastschwankungen oder An- und Abschaltprozessen schnell zur Materialermüdung führen. Als Notstromsysteme sind sie deshalb nur dann geeignet, wenn eine Abschaltung nicht vorgesehen ist und die erzeugte elektrische Energie anderweitig verwendet oder gespeichert werden kann. Mobile Einsätze sind dadurch nicht umsetzbar. Im Gegensatz dazu sind PEM-BZ zu schnellen Laständerungen in weiten Leistungsbereichen in der Lage und verfügen außerdem sowohl über Schwarzstartfähigkeit als auch über eine große Anzahl an möglichen Schaltzyklen. Aufgrund dessen eignen sich PEM-BZ wesentlich besser zum Betrieb als Notstromsysteme. In der Folge werden deshalb nur PEM-Systeme betrachtet.

8.3.1 Energetische Anforderungen

- Leistungsanforderungen

Brennstoffzellensysteme für den Betrieb mit Wasserstoff haben sich grundsätzlich am Markt etabliert. Insbesondere in kleinen Leistungsbereichen gibt es eine Vielzahl an Anbietenden und Herstellenden. In der hier untersuchten Leistungsklasse von 50 bis 75 kVA existieren Stromerzeuger als Brennstoffzellen vor allem in der Form von BHKW, welche üblicherweise fest installiert sind und über längere Zeiträume betrieben werden. Dabei kommen in der Regel Festoxid-Systeme zum Einsatz, welche für einen Dauerbetrieb ausgelegt sind und deshalb – wie oben erwähnt – hier nicht weiter betrachtet werden. Im Vergleich dazu zeichnen sich PEM-Zellen durch eine wesentlich bessere Dynamik, Schwarzstartfähigkeit und eine hohe Anzahl möglicher Schaltvorgänge aus, sodass für Notstromanwendungen prinzipiell nur PEM-Systeme infrage kommen. Die Versorgung größerer Verbraucher bzw. der Einsatz in höheren Leistungsklassen wird bei diesen üblicherweise durch eine modulare Skalierung und den parallelen Betrieb von mehreren Brennstoffzellensystemen, genannt ‚Stacks‘, erreicht. Durch die modulare Skalierung sind hier prinzipiell keine Grenzen gesetzt. Integrierte Einzelanlagen in der Leistungsklasse von bis zu 100 kW befinden sich derzeit am Markt noch im Etablierungsprozess (Energy Observer Developments SAS 2021, H2SYS 2021). Erste Systeme werden bereits angeboten, wobei mit einer starken Zunahme in den kommenden Jahren zu rechnen ist.

Integrierte Systeme zur direkten Verwendung im Leistungsbereich bis zu 100 kW etablieren sich derzeit am Markt und können grundsätzlich eingesetzt werden. Höhere Leistungen, beispielsweise durch modulare Erweiterung, können prinzipiell ebenfalls erzielt werden. Eigenständige Systeme befinden sich noch in der Entwicklung.

- Regel- und Skalierbarkeit

PEM-Systeme lassen sich unkompliziert durch das Hinzufügen oder Entfernen von Modulen in der Leistung variieren. Übliche Marktbeispiele sind explizit für eine modulare Erweiterung konzipiert und werden von den Herstellern entsprechend angeboten. Außerdem sind PEM-BZ über weite Bereiche ihrer Nennleistung einsetzbar, sodass auch größere Lastschwankungen innerhalb kurzer Zeiträume ausgeglichen werden können.

- Energieträger-Verfügbarkeit

Da reiner Wasserstoff auf der Erde nicht vorkommt, wird er allgemein nicht als Primärenergieträger bezeichnet. Durch unterschiedliche Verfahren lässt sich Wasserstoff jedoch aus vielfältigen Ausgangsstoffen erzeugen, sodass er heute zu den am meisten genutzten chemischen Stoffen gehört. Wie anfangs erwähnt, ist hierbei hinsichtlich der Nachhaltigkeit bezüglich der Ausgangsstoffe eine Unterscheidung vorzunehmen.

Grundsätzlich ist eine sehr hohe Verfügbarkeit von Wasserstoff gegeben, sodass er in zahlreichen industriellen Anwendungen eingesetzt wird. Da jedoch noch kein Transportnetz für Wasserstoff existiert, wird er häufig bedarfsgerecht vor Ort produziert. Für Endverbraucher existieren Tankstellen, an denen Wasserstoff beispielsweise für den Individualverkehr erworben werden kann, analog zu LNG oder CNG. Die aktuelle technologische Umstellung auf regenerative Energieträger wird voraussichtlich einen massiven Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur zur Folge haben, sodass mittelfristig von einer unproblematischen Beschaffung ausgegangen werden kann. Insbesondere im Bereich der Mobilität wird eine starke Zunahme der verfügbaren Zapfstellen für Wasserstoff angenommen. So waren Ende 2018 insgesamt 60 Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland in Betrieb (Mitzel und Friedrich 2019). Derzeit ist die unmittelbare Verfügbarkeit jedoch auf den regionalen Umkreis von Erzeugungs-/Speicheranlagen bzw. Tankstellen begrenzt. Einschränkend ist hier anzumerken, dass eine Entnahme von Wasserstoff an den Tankstellen spezielle Vorkehrungen erfordert, wie beispielsweise einen entsprechenden Speicher mit passenden Einrichtungen zur Kupplung. Die Beschaffung von Großhändlern in Form von vorab befüllten Speichern ist jedoch in der Regel unproblematisch und auch in größeren Mengen möglich.

Die Verfügbarkeit von Wasserstoff ist grundsätzlich gut, kann jedoch regionalen Schwankungen bzw. Einschränkungen unterliegen. In den kommenden Jahren wird eine wesentliche Verbesserung der regionalen Versorgungskapazität erwartet. Schon jetzt können größere Mengen Wasserstoff problemlos von Händlerinnen und Händlern erworben und gelagert werden.

- Energiespeicherkapazität

Wasserstoff verfügt, bezogen auf sein Gewicht, über eine extrem hohe Energiedichte. Mit einem Wert von 33,33 kWh/kg übertrifft er sogar Erdgas und gilt damit als der Brenn- und Treibstoff mit der höchsten massebezogenen Energiedichte (TÜV Süd AG 2021a, Linde GmbH 2019). Ein Kilogramm Wasserstoff enthält so viel Energie wie 2,3 kg Benzin (Linde Gas GmbH 2021). Da Wasserstoff jedoch ein sehr leichter Stoff ist, ist seine Energiedichte bezogen auf das Volumen bei Normaldruck mit 3,00 kWh/Nm³ wesentlich ungünstiger. Eine Menge Benzin gleichen Energiegehalts hätte ein Volumen von 0,34 Liter, also knapp einem Dreitausendstel (Linde Gas GmbH 2021). Beim Speichervolumen lässt sich durch eine Erhöhung des Drucks oder durch Verflüssigung eine wesentliche Verbesserung erzielen. Diese Prozesse sind mit zusätzlichem Energiebedarf und damit einhergehend mit einem reduzierten Wirkungsgrad verbunden.

Übliche Speicherformen bestehen in Form von Druckgasflaschen, welche auf 50 Liter normiert sind und mit einem Druck von 200 oder 300 bar befüllt werden. Diese können entweder einzeln transportiert oder wiederum zu Bündeln zusammengefasst und dann gemeinsam transportiert und installiert werden. Je nach Druck entspricht dies zwischen 8,89 Nm³ (200 bar, 1 Flasche) und 151 Nm³ (300 bar, 12 Flaschen = 1 Bündel) Wasserstoff (Linde GmbH 2019). Der Energieinhalt liegt bei diesen Ausführungen zwischen 8,03 kWh und 453 kWh.

Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 35 % benötigt ein System mit 75 kVA bei maximaler Auslastung eine Brennstoffmenge von 6,43 kg oder 71,43 Nm³ Wasserstoff pro Stunde. Dies entspricht einer Menge von etwa acht Druckgasflaschen bei 200 bar.

Für eine 75-kVA-Anlage werden pro Volllaststunde 6,43 kg bzw. 71,43 Nm³ Wasserstoff benötigt. Dies entspricht etwa acht Druckgasflaschen pro Stunde.

- Wirkungsgrad

Für PEM-BZ-Systeme werden Gesamtwirkungsgrade zwischen 30 und 40 % berichtet. Da diese Technologie noch in der Entwicklung ist, kann hier zukünftig mit einer weiteren Zunahme des Wirkungsgrades gerechnet werden. Die ursprüng-

lichen mit der Lagerung von Wasserstoff assoziierten Schwierigkeiten hinsichtlich einer Diffusion des Gases (Hochdrucklagerung) bzw. eines Abdampfens (Flüssiglagerung) gelten mittlerweile als gelöst. Weitere Lagermöglichkeiten bestehen in der Speicherung in Metallhydriden oder flüssigen Trägermedien, diese sind bisher jedoch experimenteller Natur. Alle diese Methoden haben eine weitestgehend verlustfreie Lagerung gemeinsam. Deshalb sind grundsätzlich keine relevanten Lagerverluste bei der Bevorratung von Wasserstoff zu erwarten.

8.3.2 Technische Anforderungen

- Größe und Gewicht

Beispielhafte Systeme im Bereich bis 100 kVA erreichen Abmessungen von (L x B x H) 2,8 m x 1,1 m x 2,6 m (H2SYS 2021) bzw. 3,35 m x 1,15 m x 2,2 m (Energy Observer Developments SAS 2021). Mit einem Gewicht von etwa 3,5 Tonnen sind diese Systeme mit herkömmlichen LKW transportierbar (inhouse engineering GmbH 2021). Bei dieser Anlage sind Komponenten zur internen Gewinnung von Wasserstoff aus Erdgas enthalten, sodass eine für Wasserstoff optimierte Anlage kleiner und leichter ausfallen würde. Notwendige Komponenten zur Temperierung/Konditionierung sowie Wechselrichter sind bei diesen Systemen bereits integriert, lediglich für den Gasspeicher sind zusätzliche Flächen vorzuhalten. Die hierfür benötigten Komponenten orientieren sich als Spezialfall nach der jeweiligen Anwendung. Grundsätzlich lässt sich hier unterscheiden zwischen der Druckspeicherung und der Speicherung von verflüssigtem tiefkaltem Wasserstoff. Die Verwendung von Hochdruckspeichern bietet sich insbesondere für mobile Anwendungen an. Für stationäre Anlagen kommt zusätzlich eine Speicherung von tiefkaltem Flüssigwasserstoff in Frage. Dadurch verbessert sich die insgesamt vorhaltbare Menge in Bezug auf das Tankvolumen, allerdings erhöhen sich die infrastrukturellen Maßnahmen zur Aufstellung und Sicherheit.

Für den Betrieb über 96 Stunden müssen entsprechend der Werte aus Energiespeicherkapazität für die mobile Anwendung 617,28 kg oder 6857,28 Nm³ Wasserstoff bevorratet werden. Bei der Nutzung von Druckgasflaschen entspricht dies etwa 771 Druckgasflaschen oder 65 Flaschenbündeln. Bei einem Flächenbedarf pro Bündel von ungefähr 1,47 m² und einem Gewicht von 1.320 kg ergeben sich somit ein Platzbedarf von mindesten 95,55 m² und ein Gewicht von 85,8 t für die Lagerung des Wasserstoffs (Lindenfield GmbH 2021a). Bei der Nutzung von flüssigem Wasserstoff mit einer Dichte von 70,8 g/l ergibt sich ein nötiges Tankvolumen von 8.719 l (Linde GmbH 2021b). Ein entsprechender Tank weist einen Durchmesser von 2,0 m und eine Länge von 7,38 m bei einem Leergewicht von 5,91 t auf (Lindenfield GmbH 2021b). Die stationäre Anwendung bedarf für den 72-stündigen Betrieb einer gelagerten Wasserstoffmenge von 3.086,4 kg oder 34.286,4 Nm³. Dies

entspricht einer Anzahl von 322 Flaschenbündeln mit einem Platzbedarf von 473,34 m² und einem Gewicht von 425,04 t. Im flüssigen Zustand entspricht dies einer Lagermenge von 43,2 m³. Ein für diese Menge geeigneter Tank weist einen Durchmesser von 3,0 m und eine Länge von 11,51 m bei einem Leergewicht von 19,77 t auf.

- Notwendige konstruktive Anlagenstruktur und notwendige Peripherie

Der Einsatz von Brennstoffzellensystemen mit Druckspeichern ist relativ unproblematisch möglich. Angebotene Systeme werden in schlüsselfertigen Containern geliefert und beinhalten bereits Vorkehrungen zur Sicherheitstechnik und zur Temperaturregelung. Beim Einsatz in geschlossenen Räumlichkeiten sollte zusätzlich eine ausreichende Lüftung und eine Gaswarnanlage vorgesehen werden, um die Ansammlung explosionsfähiger Gemische zu vermeiden. Durch seine hohe Diffusion ist Wasserstoff extrem flüchtig, was die Ansammlung großer Mengen erschwert (Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland – Arbeitskreis Grundsatzfragen 2008). Bei Flüssigwasserstoff ist eine Aufstellung im Freien notwendig, um den Betrieb der Abblaseeinrichtungen zu gewährleisten.

Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Temperaturen im direkten Umfeld der Anlage innerhalb bestimmter Grenzen bleiben. Diese sind mit bspw. – 5 °C bis + 45 °C relativ eng definiert (Energy Observer Developments SAS 2021). Zur Einhaltung dieser Außentemperaturen sind ggf. weitere Vorkehrungen zu treffen.

- Komplexität des Energiespeichers

Der grundsätzliche Einsatz von Brennstoffzellen ist relativ unproblematisch. Herkömmliche Systeme werden mit integrierten 1- und 3-Phasensteckern geliefert und erfordern keine weiteren Vorkehrungen (Energy Observer Developments SAS 2021). Unterschiede gibt es hier vor allem bei den Speichersystemen, welche sich auch hinsichtlich der Nachbetankung teilweise erheblich unterscheiden. Während bei kleinen Anlagen der Austausch von Gasflaschen ausreichend ist, muss eine Betankung großer Systeme aufwändig über Drucktankwagen oder Flüssigtankwagen durchgeführt werden. Zudem sind die Wartung oder der Austausch von Komponenten durch die integrierte Bauweise sehr aufwändig.

- Anlaufzeit

PEM-Brennstoffzellen sind für Anfahrprozesse innerhalb weniger Sekunden geeignet, sodass die Anlaufzeit als sehr kurz bewertet werden kann. Da sie jedoch eine bestimmte Betriebstemperatur benötigen, muss bei Außentemperaturen unterhalb des Einsatzbereiches unter Umständen mit einer Aufwärmphase gerechnet

werden. Kommerzielle Systeme werden üblicherweise mit integrierten Vorheizungen ausgeliefert, welche jedoch unter Umständen auf eine externe 230-Volt-Versorgung angewiesen sind (Energy Observer Developments SAS 2021). Für Einsätze unter kalten Bedingungen sind Brennstoffzellen deswegen nur bedingt geeignet.

- Robustheit

Durch ihre Funktionsweise kommen Brennstoffzellen weitestgehend ohne bewegliche Teile aus. Damit einher geht ein geringer physischer Verschleiß, was generell für eine hohe Robustheit sorgt. Brennstoffzellen reagieren zudem relativ unempfindlich auf Lastschwankungen und wechselhafte Leistungen. Eine höhere Anfälligkeit besteht gegenüber wechselhaften Umgebungsbedingungen. So können schnelle Temperaturschwankungen für Funktionsstörungen sorgen, weil sich die Dynamik der Redox-Reaktion mit sinkenden Temperaturen verschlechtert. Anfällig reagieren Brennstoffzellen auch auf hohe Kohlenstoffmonoxid-Konzentrationen in der Luftzufuhr, welche die Funktionsfähigkeit der Katalysatoren beeinträchtigt (TÜV Süd AG 2021b). Die Betriebsstunden werden herstellerseitig mit 15.000 bis 20.000 angegeben (H2SYS 2021), was für den Einsatz als Notstromsystem ausreichend erscheint. Generell ist die Lebensdauer der verwendeten Membranen jedoch noch eine Schwachstelle von Brennstoffzellen, weshalb auf diesem Gebiet noch Entwicklungsbedarf besteht.

8.3.3 Organisatorische Anforderungen

- Transport und Aufbau

Wie in 8.3.2 beschrieben, kann der Transport von Systemen im Bereich von 100 kVA bereits mit Klein-LKW erfolgen. Für die Ver- und Entladung sind Stapler oder Kräne notwendig. Kleinere modular aufgebaute Systeme können auch mit PKW transportiert werden. Teilweise existieren auch Systeme mit integrierten Wasserstoffspeichern, was Aufbau und Inbetriebnahme erleichtert, jedoch für zusätzliche Herausforderungen beim Transport sorgt. Grundsätzlich ist für Notstromzwecke auch vorstellbar, die Systeme direkt von der Ladefläche eines LKW zu betreiben, sodass auf ein Abladen verzichtet werden kann. Die Zeit bis zum Einsatz kann auf diese Art minimiert werden, da am Einsatzort nur noch die zu versorgenden Systeme anzuschließen sind. Ansonsten ist beim Aufbau darauf zu achten, dass die Anlagen und Speicher ausreichend belüftet sind, um die Bildung explosionsfähiger Gas-Luft-Gemische zu vermeiden. Eine Lagerung an freier Luft wäre hierfür bereits ausreichend, da sich Wasserstoff extrem schnell verflüchtigt (Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland – Arbeitskreis Grundsatzfragen 2008). Dabei muss jedoch ein ausreichender Schutz vor Witterung, wie Schnee oder Regen, vorgesehen sein.

- Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb

Bei den meisten Systemen gestaltet sich die kontinuierliche Versorgung verhältnismäßig simpel, da die Gasspeicher im laufenden Betrieb ausgetauscht bzw. auf einen alternativen Speicher gewechselt werden können (Energy Observer Developments SAS 2021, H2SYS 2021). Schwierigkeiten entstehen hier vor allem bei der Anlieferung des Wasserstoffs, welche dieselben sind wie bei der initialen Aufstellung der Notstromversorgung. Je nach Betriebsdauer der Anlage kann hier ein beträchtlicher Aufwand entstehen, da bedingt durch das verhältnismäßig große Volumen von Wasserstoffspeichern ein häufiger Wechsel der Speicher notwendig sein kann. Größere Wasserstofftanks können über zusätzliche Anschlüsse nachgefüllt werden, sodass hier eine Versorgung im laufenden Betrieb stattfinden kann. Grundsätzlich ist nach einem Einsatz im Netzersatzbetrieb oder nach einer längeren Funktionsprüfung eine Auffüllung der Kraftstoffreserven zu veranlassen.

- Instandhaltungsaufwand

Die Angaben kommerzieller Anbieter zur Lebensdauer von PEM-Stacks liegen im Bereich von 15.000 bis 20.000 Betriebsstunden (H2SYS 2021), mit Betriebsgarantien für einen Zeitraum von zwei Jahren (Energy Observer Developments SAS 2021). Während dieser Zeit kann im Allgemeinen von einem störungsfreien Betrieb ausgegangen werden, da PEM-Brennstoffzellen durch die Abwesenheit beweglicher Komponenten einen geringen Wartungsaufwand haben. Häufig kann eine Fernwartung erfolgen, bei der der Zustand einer Anlage über Remote-Zugriff erfasst wird. Dies bezieht sich beispielsweise auf den Kraftstofffüllstand des Speichers oder die Auswertung von Fehlermeldungen (Eska und Corneille 2018). Reparaturen der Kernkomponenten müssen jedoch von Fachpersonal durchgeführt werden und erfordern in der Regel einen Rücktransport der Anlagen zum Hersteller.

- Personal- und Qualifikationsbedarf

Für die Auslegung und Installation müssen Herstellende bzw. Fachleute kontaktiert werden, da die Technologie noch neu ist und viele anwendungsspezifische Details berücksichtigt werden müssen. Der Betrieb nach erfolgreicher Installation kann hingegen von einzelnen Personen durchgeführt werden, welche vorab in die Bedienung des Systems eingewiesen werden müssen. Eine zusätzliche Schulung ist für die Annahme von Kraftstofflieferungen und allgemein für den Umgang mit Wasserstoff vorzusehen (Eska und Corneille 2018).

- Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen

Zur Beschaffung von Ersatzteilen müssen Herstellende kontaktiert werden, da alle Systeme individuell entwickelt und produziert werden. Herstellerübergreifende Standards haben sich noch nicht etabliert. Eine Verfügbarkeit der benötigten Ersatzteile kann zudem nicht garantiert werden, da die Produktionszahlen der Herstellenden derzeit noch gering sind. Hier wird jedoch in den kommenden Jahren mit einer intensiven Steigerung sowohl hinsichtlich der produzierten Stückzahlen als auch in Bezug auf allgemeine Standards gerechnet.

- Genehmigungsaufwand

Die generelle Genehmigung und Zertifizierung der Systeme erfolgt über die Herstellenden. Üblich sind CE- und ISO-Zertifizierungen (Energy Observer Developments SAS 2021, H2SYS 2021). Hinsichtlich der notwendigen Genehmigungsverfahren zum Betrieb der Anlage sind die aktuell gültigen Bestimmungen seitens des Gesetzgebers nachzuvollziehen. Zu erfüllen sind hier unter anderem die Vorgaben aus der EU-Richtlinie 2014/68/EU (TÜV Süd AG 2021c). Neben generellen baurechtlichen Genehmigungsverfahren muss ggf. auch auf die Besonderheiten der Gesetzgebung im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) geachtet werden, da die Versorgung mit Brennstoffzellen in den Wirkungsbereich dieser Gesetze fallen könnte.

8.3.4 Sicherheitsanforderungen

- IT-Bedarf

Moderne Systeme bieten in aller Regel die Möglichkeit eines Remote-Zugriffs auf die Anlage. Damit einher geht das Risiko eines unbefugten Zugriffs auf die Anlagensteuerung. Dies ist durch entsprechende Vorkehrungen bei der informationstechnischen Anbindung auszuschließen, beispielsweise durch die Verwendung verschlüsselter Verbindungen. Die Anforderungen unterscheiden sich hierbei nicht von anderen Systemen mit vergleichbarer Funktion (wie beispielsweise BHKW oder digital gesteuerte Dieselgeneratoren).

- Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung

Von Wasserstoff geht grundsätzlich eine Gefahr durch die Bildung explosionsfähiger Gas-Luft-Gemische aus. Hinzu kommt eine extrem niedrige Zündenergie von Wasserstoff-Luft-Gemischen. Bereits kleinste Funken durch bspw. herunterfallendes Werkzeug oder statische Aufladung von Arbeitskleidung können eine Zündung verursachen, wenn die Atmosphäre innerhalb des Zündbereichs von Wasserstoff

liegt. Durch die schnelle Diffusion von Wasserstoff und seine geringe Dichte verflüchtigt er sich schnell, sodass die Bildung einer derartigen Atmosphäre im Freien nicht zu erwarten ist. Dennoch müssen entsprechende Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden, die einerseits ein ungewolltes Austreten schnellstmöglich unterbinden und andererseits durch Warnsignale darauf aufmerksam machen. In Frage kommen hier Gassensoren und Druckwächter. Einmal entzündet, brennt Wasserstoff mit einer nahezu unsichtbaren Flamme, da die Energie überwiegend im ultravioletten Bereich abgestrahlt wird. Dies birgt ein zusätzliches Verletzungsrisiko, da ein Brand erst zu spät bemerkt werden könnte.

- Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus

Bedingt durch die empfindliche Technik und hohen Drücke im Inneren von Brennstoffzellen werden diese in der Regel mit einer robusten Kapselung ausgeliefert. Diese hält mechanischen Belastungen, wie sie bei Vandalismus auftreten können, in der Regel unbeschadet stand. Ernsthafte Schäden können nur beim Einsatz starker Gewalteinwirkung erwartet werden. Durch eine Beschränkung des Zugangs zum Betriebsgelände, beispielsweise durch die Aufstellung von Zäunen, kann dies bereits weitestgehend verhindert werden. Auch die Speichereinrichtungen sind hinreichend robust, da sie ohnehin hohen mechanischen Belastungen standhalten müssen.

8.3.5 Marktorientierte Anforderungen

- Investitionskosten

Dem Battelle Memorial Institute (2017) zufolge kann für die Produktion einer 100-kVA-Anlage mit Kosten in Höhe von etwa 350.000 US\$ (entspr. ca. 300.000 €) gerechnet werden, was einem leistungsbezogenen Preis von etwa 3.000 € pro kVA entspricht. Dies bezieht sich auf die Produktion kleiner Stückzahlen in der Größenordnung von 100 Modulen pro Jahr. Durch einen entsprechenden Ausbau von Produktionskapazitäten kann es hier in der Zukunft zu erheblichen Einsparungen kommen. Ebenfalls aus der Publikation des Battelle Memorial Institute (2017) lässt sich entnehmen, dass sich bei einer Steigerung der Produktion auf 50.000 Module pro Jahr der Stückpreis um ca. 40 % auf dann etwa 240.000 US\$ reduzieren würde. Wiederum auf die Leistung bezogen, ergeben sich damit Preise in der Größenordnung von 2.000 € pro kVA.

Bei stationären Anlagen ist der Preis pro kVA etwas günstiger zu bewerten, wenngleich er auch hier deutlich über alternativen Technologien liegt. Demnach würde die Produktion einer 500-kVA-Anlage mit zwei parallelen 250-kVA-Modulen zwischen 730.000 Euro (für 100 produzierte Systeme pro Jahr) und ca. 1.000.000 Euro

(für 50.000 produzierte Systeme pro Jahr) kosten. Umgerechnet auf den Preis pro kVA ergibt sich hier eine Spannweite von ca. 1.500 €/kVA bis 2.150 €/kVA (Battelle Memorial Institute 2017). Nicht berücksichtigt sind hier die zusätzlichen Kosten für die Speicherung des benötigten Wasserstoffs, da diese in Abhängigkeit von der verwendeten Technologie erheblich variieren können.

Für die Kosten eines geeigneten Speichers für flüssigen Wasserstoff liegen keine Daten vor, um diese zu bestimmen. Aus diesem Grund werden die Kosten entsprechend der Kosten für einen LPG-Tank abgeschätzt. Für einen Tank mit einem Fassungsvermögen von 4.850 l fallen Kosten in Höhe von ca. 3.800 € an (Kesselheld GmbH 2021). Eine lineare Skalierung auf das für die mobile Anwendung benötigte Tankvolumen ergibt Investitionskosten in Höhe von ungefähr 6.800 €. Bei der stationären Anwendung belaufen sich die Kosten für den Tank auf ca. 34.000 €. Bei diesen Angaben handelt es sich lediglich um eine Abschätzung und die realen Preise für den Tank können stark abweichen.

Es zeigt sich, dass durch den Ausbau der Produktion wesentliche Kosteneinsparungen zu erwarten sind. Dieser Effekt dürfte in den kommenden Jahren mit dem zunehmenden Einsatz von Brennstoffzellentechnik noch weiter steigen. Dennoch sind die Investitionskosten für den Einsatz von Brennstoffzellen als sehr hoch zu bewerten.

- Operative Kosten

Die operativen Kosten entstehen vor allem durch den Bedarf an Wasserstoff als Brennstoff. Obwohl die Produktion von Wasserstoff mit fortschreitender Entwicklung der Elektrolysetechnik zunimmt und dadurch Kosten gesenkt werden, zählt Wasserstoff immer noch zu den verhältnismäßig teuren Energieträgern. Derzeit wird für 1 kg Wasserstoff ein Preis von etwa 9,50 Euro fällig (Battelle Memorial Institute 2017). Mit der obigen Berechnung für eine 75-kVA-Anlage von etwa 6,5 kg Wasserstoff pro Stunde Vollastbetrieb ergibt sich daraus ein Brennstoffpreis in Höhe von 62 Euro pro Betriebsstunde. Größere Anlagen sind entsprechend teurer. Bei einer stationären NEA mit 500 kVA Leistung ergibt sich ein stündlicher Verbrauch von etwa 43,3 kg Wasserstoff, was Kosten in Höhe von 411 Euro pro Stunde entspricht.

Weitere operative Kosten können durch die Wartung und ggf. Reparatur der Systeme anfallen, sofern hier keine Rahmenverträge mit den Herstellern getroffen werden. Die operativen Kosten von Brennstoffzellen sind somit als hoch zu bewerten.

Eine Kombination aus Energiespeicher und Photovoltaiksystem kann durch die Energieeinspeisung die Versorgungszeit prinzipiell verlängern oder bei gegebenen Voraussetzungen die benötigte Energiespeicherkapazität verringern. Dabei müssen die Nutzungszeiträume hinreichend lang sein, um sicherzustellen, dass auch bei fluktuierender Verfügbarkeit der Solarenergie mindestens in Teilzeiträume eingespeist werden kann. Bei der Verwendung als Notstromsystem wird hierbei stets eine konservative Betrachtung gewählt, da das Gesamtsystem auch unter den schlechtesten äußeren Rahmenbedingungen die Mindestanforderungen erfüllen muss. Eine Übersicht mit Beispielsystemen ist in Tabelle 1 einzusehen.

8.4.1 Energetische Anforderungen

- Leistungsbereitstellung

Photovoltaiksysteme bestehen aus beliebig vielen Modulen, welche sich wiederum durch die Verschaltung von Photovoltaikzellen zusammensetzen. Die Gesamtleistung kann so beliebig skaliert werden. Stationäre Großprojekte erstrecken sich über viele Quadratkilometer und haben installierte Gesamtleistungen von mehreren Gigawatt (Wolfe 2021). Die meisten mobilen Systeme sind für Kleinstanwendungen im privaten Bereich konzipiert. Erneuerbare Energien, insbesondere Photovoltaiksysteme, wurden bereits zum Zwecke der langfristigen Hilfe nach Katastrophen oder Minimalversorgung, für netzferne bzw. netzentkoppelte Regionen vielschichtig untersucht. Dennoch handelt es sich bei den jeweiligen Anwendungen vor allem um kleine Leistungsbedarfe und die Versorgungssicherheit ist weniger relevant (Qazi 2017). Versorgungsziele können hier Systeme zur Wasseraufbereitung oder Kommunikation sein. Es gibt jedoch auch vereinzelt kommerzielle mobile Lösungen in höheren Leistungsklassen bis 26 kW_p und 300 kW_p (Acciona 2021, Renovagen Ltd. 2021). Unabhängig von aktuell verfügbaren Systemen und dem jeweiligen Anwendungsfall sind beliebige Leistungsgrößen für PV-Systeme denkbar.

- Regel- und Skalierbarkeit

Skalierbar sind PV-Systeme inhärent durch ihre Modularität. Die Regelung und das Systemverhalten bei wechselnden Einstrahlungsintensitäten, Lastschwankungen

und Netzfehlern hängt von Steuerkreisen und dem verwendeten Wechselrichter ab. Diese definieren ebenfalls die möglichen Schnittstellen des Systems. Da die gesamte Systemleistung über den Wechselrichter von Gleichspannung in Wechselspannung gewandelt werden muss, ist die Inselnetzfähigkeit maßgeblich von diesem abhängig. Da moderne Wechselrichter, mit entsprechender Steuerung, dazu prinzipiell in der Lage sind, kann auch ein Gesamtsystem inselnetzfähig sein (Ortega et al. 2015). Private Hausinstallationen können diesen Betrieb zur Eigenversorgung mit aktuellen Systemen ebenfalls umsetzen. Das Kriterium ist als sehr gut zu werten.

- Energieträger-Verfügbarkeit

Im Folgenden wird abgeschätzt, wie viele Volllaststunden Sonneneinstrahlung für eine Photovoltaikanlage während der Mindestnutzungsvorgaben der zwei Anwendungsszenarien, gemäß 4.1 und 4.2, mindestens wirken. Die Tageslängen in Deutschland, als Grundvoraussetzung für die Verfügbarkeit von Sonnenenergie, variieren orts- und jahreszeitabhängig zwischen 7 und 17 Stunden (Nier 2019). Im Januar scheint die Sonne mit 30 Stunden durchschnittlich am wenigsten. Daraus ergibt sich ein Tagesminimum am kürzesten Tag von unter einer Sonnenstunde. Aufgrund von unter anderem einstrahlungswinkelbezogenen Minderungsfaktoren reduzieren sich die zugehörigen Volllaststunden nochmal auf weit unter eine Stunde pro Tag (Statista 2021a). Umgebungs- und wetterbedingte Verschattungen verschlechtern die Volllaststunden erneut. Obwohl jährlich mindestens 1060 Volllaststunden angenommen werden können, lässt sich kein verlässliches tägliches Mindestmaß an Einstrahlung angeben (Wirth 2021a). Über den vorgeschriebenen Mindestnutzungszeitraum von 96 Stunden für den mobilen Anwendungsfall, welcher weit länger als der durchschnittliche praktische Anwendungsfall gemäß THW-Interview ist, könnte davon ausgegangen werden, dass eine Volllaststunde an Einstrahlung genutzt werden kann. Selbst bei einer großen monokristallinen Anlage mit einer Fläche von 200 m^2 und 40 kW_p würden jedoch lediglich 40 kWh der 7200 kWh des Anwendungsfalls abgedeckt werden. Die zur Notstromversorgung benötigte Energiemenge müsste, weil der schlechteste Fall quasi keine Einspeisungsperiode garantiert, vollständig aus der Speichereinheit entladen werden können. Das Verfügbarkeitskriterium ist für Notstromanwendungen als sehr schlecht geeignet zu bewerten.

- Energiespeicherkapazität

Da die Systemeigenschaften von PV-Modulen für den Einsatz von elektrochemischen Energiespeichern prädestiniert sind und diese im Kapitel 8.7.1 bewertet werden, wird diese Wertung übernommen.

- Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad von PV-Speicher-Systemen setzt sich aus dem Gesamtwirkungsgrad von den elektrochemischen Energiespeichern, dem Wechselrichter, den Modulen selbst und der Peripherie zusammen. Die Wirkungsgrade von PV-Zellen sind technologieabhängig zwischen 15 % und 23 % einzuordnen. Lediglich Forschungsprototypen erreichen auch bis zu 47 %. Wechselrichter erreichen Wirkungsgrade zwischen 96 % und 98 % und Batteriespeicher, je nach verwendeter Technologie, zwischen 75 % und 95 % (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE 2021). Der Energieeigenbedarf ist neben den Verlusten maßgeblich für die Höhe des Wirkungsgrades. Durch die Alterung von Systemkomponenten und die Degeneration der Zellen sinkt die Gesamteffizienz über die Laufzeit technologie- und systemabhängig ab. Da der Gesamtwirkungsgrad jedoch ebenfalls von den Betriebsbedingungen abhängt, ist dieser ohne eine exakt definierte Nutzung nur abstrakt als gut zu bewerten.

8.4.2 Technische Anforderungen

- Größe und Gewicht

Die Dimensionen des PV-Systems setzen sich maßgeblich aus denen des Energiespeichers und der PV-Module zusammen. Da gemäß 8.4.1 der Speicher für die gesamte Kapazität ausgelegt werden muss, um die Versorgungssicherheit gewährleisten zu können, kann hierfür die Dimensionsbestimmung aus 8.7.2 genutzt werden. Durchschnittliche kommerzielle PV-Module weisen Ausmaße von 200 cm Breite, 100 cm Länge und eine Dicke von 2 bis 8 cm auf, wiegen ca. 23 kg und bestehen aus 72 Zellen (Intermountain Wind & Solar 2021). Neue Technologien weichen in Teilen von diesen Standardmaßen ab. Die Leistung einzelner Module variiert technologieabhängig zwischen 300 und 450 W_p . Da durch die geringe minimale Einspeisezeit keine sinnvolle Mindestleistung angegeben werden kann, kann auch keine konkrete Modulanzahl und somit kein Volumen und Gewichtsbedarf bestimmt werden. Gemäß den Herstellerangaben von Trinasolar können 527 Module mit einer Peak-Leistung von insgesamt bis zu 375 kW_p in einen 40-Fuß-Container verladen werden (Trina Solar Co. Ltd. 2022). Eine bereits verfügbare transportierbare und schnell aufbaubare Lösung mit bis zu 300 kW_p bietet die Firma RenovaGen an (Renovagen Ltd. 2021). Technologiesystemspezifisch ergeben sich unterschiedliche Bewertungen. Durch den benötigten voll ausgelegten Speicher und die Vielzahl an Modulen ist das Kriterium als sehr schlecht zu werten.

- Notwendige konstruktive Anlagenstruktur und notwendige Peripherie

Während die Speichersysteme zwar hohe Anforderungen an die Umgebungsbedingungen und Sicherheitsmaßnahmen stellen, sind diese meist in geschlossenen Systemen untergebracht, die diese Rahmenbedingungen anwendungsfallunabhängig erfüllen. Die PV-Systeme müssen jedoch aufgestellt werden. Damit geht ein hoher Platzbedarf einher, der zusätzlich noch Anforderungen an Verschattungsfreiheit, Zugangsmöglichkeiten und Bodenbeschaffenheiten stellt. Dadurch gestaltet sich der Aufbau, insbesondere in unplanbaren Situationen bei den mobilen Anwendungen, besonders schwer. Die Anlagenstruktur ist anwendungsfallbezogen als sehr aufwändig einzuschätzen.

- Komplexität des Energiespeichers

Das Kriterium wird im Abschnitt 8.7.2 untersucht und ist an dieser Stelle gleich zu bewerten.

- Anlaufzeit

Aufgrund des vorhandenen elektrischen Energiespeichers sind die Anlaufzeiten unabhängig von der Sonneneinstrahlung und der Energieerzeugung der PV-Anlage nahezu instantan. Für stationäre Anwendungsfälle ist die Sekundärnutzung einer USV denkbar. Die Anlaufzeiten sind für jeden Anwendungsfall als sehr gut zu bewerten.

- Robustheit

Sowohl die verwendeten Speichertechnologien als auch die PV-Anlagen sind nicht robust im Sinne dieses Kriteriums. Während Speicher empfindlich gegenüber externen Einflüssen sind und auch vor internen Systemfehlern geschützt werden müssen, liegt das Problem der PV-Anlagen häufig in der weitläufigen Struktur. Fehler können so im gesamten Anlagenbereich entstehen und werden oft erst im Schadensfall erkannt. Auch bei Störungen von Einzelkomponenten sind nicht nur Versorgungseinschränkungen, sondern auch ein komplettes Systemversagen möglich (Köntges et al. 2014).

8.4.3 Organisatorische Anforderungen

- Transport und Aufbau

PV-Module sind in der Regel fest in Anlagen verbaut. Die meisten mobilen Anwendungen werden durch kleinere Systeme mit niedrigeren Leistungsumfängen bedient. Es gibt jedoch vereinzelt auch größere transportfähige Anlagen (Qazi 2017).

Davon abgesehen ist es prinzipiell möglich, PV-Systeme beliebiger Leistungsklassen transportfähig und für einen schnellen Aufbau zu gestalten. Dabei stellen die gängigen Transportmittel die maßgebliche Limitation dar (Renovagen Ltd. 2021). Der dafür notwendige Personal- und Zeitaufwand wird vom Aufbaukonzept bestimmt. Für mobile Anlagen wird die Dauer des Aufbaus erst ab 30 Minuten relevant. Da der Aufbau zusätzlich zum Systemanschluss an den jeweiligen Verknüpfungspunkt auch noch den Aufbau und die Verkabelung der PV-Anlage umfasst, ist das Kriterium als negativ zu bewerten.

- Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb

PV-Anlagen müssen im laufenden Betrieb nicht mit Betriebsmitteln versorgt werden, weshalb kein Versorgungsaufwand anfällt. Daher ist dieser Punkt als sehr positiv zu bewerten.

- Instandhaltungsaufwand

Für PV-Anlagen wird für Wartungen von vielen Experten ein Intervall von ein bis zwei Jahren empfohlen, um Schäden oder einem Leistungsabfall entgegenzuwirken. Eine Wartung ist jedoch nicht vorgeschrieben (Anondi GmbH 2021b). Allerdings sind wiederkehrende Prüfungen auf Grundlage von DGUVV3 und TRBS 1201 durchzuführen. Die Prüffristen und Prüfkriterien sind in den Normen DIN VDE 0105, DIN VDE 0100 und DIN VDE 0126 festgelegt (flex-sec GmbH & Co. KG 2021). Das Prüfintervall darf dabei nicht größer sein, als es für das Wechselstromnetz gefordert ist, an welches die PV-Anlage angeschlossen wurde, längstens allerdings alle vier Jahre (Krug 2021). Zusätzlich ist eine Reinigung der PV-Anlagen notwendig. Die Häufigkeit ist je nach Aufstellungsort und Witterung unterschiedlich. So wird für Gewerbegebiete empfohlen, alle drei bis vier Jahre eine Reinigung durchzuführen, während bei landwirtschaftlichen Betrieben eine jährliche Reinigung empfohlen wird (Mattstedt 2021). Durch defekte Isolierungen kann es bei der Reinigung zu Stromschlägen kommen, weshalb eine Prüfung der Anlage vor der Reinigung erfolgen sollte. Daher sollte die Reinigung nur von entsprechend geschulten Personen durchgeführt werden. Bei transportierbaren Anlagen ergeben sich gesonderte Wartungs- und Reinigungsintervalle.

- Personal- und Qualifikationsbedarf

Für die Installation und Prüfung einer PV-Anlage sind Elektrofachkräfte nötig. Dies gilt auch für das Zuschalten des Wechselrichters auf das Notstromnetz bei mobilen Anlagen. Aufgrund des großen Aufwandes für den Aufbau von PV-Anlagen wird mehr Personal in dieser Phase benötigt. Bei der Reinigung der Anlagen ist aufgrund der großen Flächen ebenfalls mit einem hohen Personalbedarf zu kalkulieren. Dies

gilt insbesondere für die mobile Anwendung. Somit ist der Personalbedarf als hoch zu bewerten. Der Betrieb der Anlage erfordert kein zusätzliches Personal.

- Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen

Ersatzteile für PV-Anlagen sind auf mehreren Plattformen verfügbar. Zudem gibt es zahlreiche Hersteller von PV-Anlagen, weshalb perspektivisch eine ausreichende Versorgung mit Ersatzteilen gegeben ist. Dabei ist zu beachten, dass PV-Anlagen nur als modulare Systeme verfügbar sind, weshalb auch nur ganze Module getauscht werden können. Zudem müssen die Ersatzmodule mit den vorhandenen kompatibel sein, weshalb in der Regel vorrangig die Module des jeweiligen Herstellers verwendet werden müssen. PV-Anlagen benötigen für den Betrieb keine Betriebsstoffe, weshalb der Beschaffungsaufwand dafür entfällt.

- Genehmigungsaufwand

Für kleine private PV-Dachanlagen bis 600 Watt ist prinzipiell keine Genehmigung erforderlich. Dies ändert sich allerdings, wenn die PV-Anlagen größer ausfallen, Fassadenanlagen geplant sind, PV-Anlagen an öffentlichen Gebäuden installiert werden, eine kommerzielle Nutzung beabsichtigt ist oder Gebäude unter Denkmalschutz stehen. Freiflächenanlagen hingegen sind in allen Bundesländern genehmigungspflichtig. Die Genehmigung wird gemäß dem Baurecht des jeweiligen Bundeslandes erteilt (Schmitz 2021).

8.4.4 Sicherheitsanforderungen

- IT-Bedarf

PV-Anlagen benötigen grundsätzlich für den Betrieb keine IT. Bei heutigen PV-Anlagen ist allerdings häufig eine Kommunikation mit der Haustechnik vorgesehen, um eine optimale Nutzung der Solarenergie zu gewährleisten. Zusätzlich ist es realisierbar, Anlagen an das Internet anzubinden und so die Überwachung zu jedem Zeitpunkt und von jedem Ort zu ermöglichen (Heizungsmacher AG 2021). Zusätzlich zur PV-Anlage wird allerdings ein Energiespeicher benötigt, welcher wiederum zum Betrieb ein IT-Steurelement benötigt. Somit ist dieses Kriterium analog zu Batteriespeichern zu bewerten.

- Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung

PV-Anlagen gelten als sehr sicher. Die Hauptgefahr bei PV besteht in Form von Bränden, wie sie bei allen elektrischen Systemen auftreten können. Allerdings ist die Gefahr, dass Brände entstehen, sehr gering. Bis zum Jahr 2018 haben nur 6 ppm

der installierten Anlagen einen Brand verursacht (Wirth 2021b). Der Hauptgrund für Brände von PV-Anlagen ist menschliches Versagen bei der Planung oder Installation (Sepanski et al. 2018). Die Gefährdung geht maßgeblich von der Batterie aus.

- Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus

Aufgrund der nötigen direkten Sonneneinstrahlung auf die PV-Module ist es nicht möglich, diese durch ein Dach zu schützen oder eingehaust aufzustellen. Zwar lassen sich ebenerdige PV-Anlagen durch das Aufstellen von Zäunen gegen einen Zugriff von Dritten schützen, allerdings ist dieser Schutz nicht als gleichwertig zu einer Einhausung oder einer Aufstellung in geschlossenen Räumen zu sehen, da sich ein Zaun leicht überwinden lässt. Auch ein Steinwurf ist durch einen Zaun kaum zu verhindern (Sieg 2010). Zudem ist die Aufstellung eines temporären Schutzes bei mobilen Anlagen kaum möglich. Einen zusätzlichen Schutz gegen den Zugriff von Dritten bei stationären Anlagen kann eine Installation der PV-Anlage an unzugänglichen Stellen, wie beispielsweise auf Dachflächen, bieten. Aufgrund der weitläufigen Anlagenstruktur und der hohen Empfindlichkeit gegenüber physischer Beschädigung und Verschattung ist es für Dritte relativ einfach, eine PV-Anlage zu beschädigen.

8.4.5 Marktorientierte Anforderungen

- Investitionskosten

Die Investitionskosten für PV-Anlagen setzen sich aus den Kosten für die PV-Module, den Wechselrichter und die Installation zusammen. Für schlüsselfertige Anlagen, in denen alle Komponenten und Module berücksichtigt sind, wird ein Preis von 1200 bis 1400 € pro kW_p angegeben, wobei der Preis für größere Anlagen am unteren Spektrum der Preisspanne liegt, weshalb für die Bewertung ein Preis von 1200 Euro pro kW_p zugrunde gelegt wird (Meyer 2021).

Die Kosten für Wechselrichter mit 10 kW bis 100 kW liegen bei 74 € pro kW_p (Burkhardt 2021). Für die Installation werden dann nochmal 150 bis 220 € pro kW_p angenommen (Meyer 2021). Hinzu kommen die Kosten für den elektrischen Energiespeicher mit 1000-1500 €/kWh. Aufgrund der konservativen Betrachtung der Bereitstellung von Sonnenlicht muss davon ausgegangen werden, dass während der Bereitstellungsphase von 96 h nur eine Sonnenstunde zur Verfügung steht. Somit könnte der installierte Batteriespeicher pro installiertem kW_p um eine Kilowattstunde kleiner ausfallen. Aus der Betrachtung der Kosten für ein kW_p installierter Leistung von PV-Anlagen und einer Kilowattstunde Energiespeicherkapazität des Batteriespeichers folgt, dass die Investitionskosten für die Notstromversorgung als höher einzuschätzen sind als die für einen Batteriespeicher.

- Operative Kosten

Betreibende einer PV-Anlage sollten mit laufenden Kosten pro Jahr in Höhe von 1-2 % der Investitionskosten rechnen, womit sich 12-28 € pro kW_p und Jahr ergeben. Diese beinhalten Wartung, Reinigung, Reparaturen, Versicherungen und Zählermiete (Meyer 2021). Laufende Kosten für Brennstoffe oder Betriebsmittel fallen nicht an. Zudem wird kein Personal für den laufenden Betrieb benötigt.

Zusätzlich fallen operative Kosten für den Batteriespeicher an. Diese betragen etwa 7-14 € pro kWh, weshalb die operativen Kosten von PV-Anlagen-Systemen als schlechter zu bewerten sind als von Anlage, die ausschließlich Batteriespeicher einbeziehen.

Im folgenden Kapitel wird die Bewertung der elektrischen Energieerzeugung von Wasserkraftwerken durchgeführt. Für den stationären Anwendungsfall werden vorrangig Speicherkraftwerke mit künstlich angelegten Speicherseen und Laufwasserkraftwerke an gestauten Flüssen und Kanälen betrachtet. Für den mobilen Anwendungsfall werden transportfähige Laufwasserkraftwerke, allerdings ohne Staustufe, beurteilt.

8.5.1 Energetische Anforderungen

- Leistungsbereitstellung

Stationäre Wasserkraftanlagen wurden in Deutschland bereits in vielen Leistungsbereichen erfolgreich gebaut. Das derzeit größte Pumpspeicherkraftwerk in Goldisthal hat eine elektrische Leistung von 1060 MW (Vattenfall GmbH 2023). Die derzeit kleinste Anlage dagegen befindet sich in Nagold und liefert eine elektrische Leistung von 100 kW (Gyin 1993). Grundsätzlich lassen sich stationäre Wasserkraftanlagen in unterschiedlichen Leistungsklassen errichten und sie sind deshalb für den stationären Anwendungsfall sehr gut geeignet.

Mobile Wasserkraftanlagen hingegen bieten derzeit keine Möglichkeit, den Leistungsbedarf durch eine einzige Anlage zu decken. Die maximale elektrische Leistung liegt derzeit bei 5 kW und wird ab einer Fließgeschwindigkeit von 2,8 m/s erreicht (Smart Hydro Power 2015a, 2015b). Dennoch gibt es die Möglichkeit, diese zu skalieren. Die geforderte Leistungsbereitstellung kann deshalb voll erreicht werden.

- Regel- und Skalierbarkeit

Die Regelbarkeit insbesondere von stationären (Pump-)Speicherkraftwerken ist durch die kontrollierbare Strömungsgeschwindigkeit des Wassers durch die Turbine als gut einzuschätzen. Insbesondere die Pumpspeicherkraftwerke werden deshalb vorrangig zur Verringerung von Leistungsspitzen im Versorgungsnetz eingesetzt. Eine Skalierbarkeit kann durch den parallelen Betrieb mehrerer Turbinen gewährleistet werden, ist allerdings mit höherem Aufwand verbunden (Giesecke und Heimerl 2014).

Auch die Regelbarkeit von mobilen Flusskraftwerken ist als gut einzustufen, da neben dem Inselnetzbetrieb auch ein hybrider Betrieb am Netz möglich ist. Die Skalierbarkeit mehrerer Anlagen ist ebenfalls möglich. Aufgrund der geringen Anlagenleistung ist die Skalierbarkeit mit höherem Aufwand verbunden (Smart Hydro Power 2015a, 2015b).

- Energieträger-Verfügbarkeit

Die Grundvoraussetzung zum Betrieb eines Wasserkraftwerkes ist das Vorhandensein eines Flusses bzw. die Möglichkeit zum Bau eines Speichersees. Darüber hinaus muss bei Laufwasserkraftwerken eine gewisse Fließgeschwindigkeit zur Verfügung stehen. Aufgrund dieser für wenige Orte zutreffenden Voraussetzungen ist das Kriterium als sehr schlecht zu bewerten.

- Energiespeicherkapazität

Bei Speicherkraftwerken ergibt sich die Energiespeicherkapazität aus der nutzbaren Wassermenge, die im Speicherbecken bzw. durch das aufgestaute Wasservolumen zur Verfügung steht. Inwiefern bei Laufwasserkraftwerken von einer Speicherkapazität gesprochen werden kann, ist schwierig zu beurteilen. Deshalb wird diese Kategorie für Wasserkraftwerke nicht bewertet.

- Wirkungsgrad

Der Nettowirkungsgrad bei Wasserkraftwerken liegt zwischen 45 und 66 %, wobei Anlagen größerer Leistungen mit einem besseren Wirkungsgrad einhergehen (Heimerl 2002). Der Wirkungsgrad ist sowohl für stationäre als auch für mobile Anlagen als gut zu bewerten, wobei erstere durch ihre Größe einen besseren Wirkungsgrad aufweisen.

8.5.2 Technische Anforderungen

- Größe und Gewicht

Der Flächenbedarf für stationäre Anlagen ist einerseits durch die Grundfläche des Kraftwerkes, aber zum Großteil durch die Fläche des Speicherbeckens charakterisiert. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass die Wasserflächen nicht ausschließlich für die Stromproduktion zur Verfügung stehen. Trinkwasserbevorratung, Hochwasserschutz und Tourismus sind weitere Verwendungszwecke, die bei der Auslegung der Speicherkapazität berücksichtigt werden müssen (Giesecke und Heimerl 2014). Auch Laufwasserkraftwerke haben einen großen Platzbedarf, weshalb diese Kategorie als sehr schlecht zu bewerten ist.

Die mobilen Einzelanlagen sind durch ihre kompakte Bauweise und ihr geringes Gewicht für den Transport geeignet. Die Anlagen haben eine Länge von 3,1 m, eine Breite von 1,6 m und eine Höhe von 2 m. Das Gewicht je Anlage liegt bei 380 kg. Um die geforderten Leistungen zu erreichen, wird jedoch eine Vielzahl an Anlagen benötigt, was die benötigte Gesamtfläche entsprechend erhöht und deshalb dieses Kriterium als negativ bewertet wird (Smart Hydro Power 2015a, 2015b).

- Notwendige konstruktive Anlagenstruktur und notwendige Peripherie

Der Aufwand für die Errichtung von stationären Anlagen ist auch durch die notwendige Peripherie als sehr hoch einzuschätzen. Neben dem eigentlichen Kraftwerk werden Bauwerke für die Speicherung und die Zu- und Ableitung des Wassers benötigt. Zur Speicherung sind Staudämme oder Wehre vonnöten, um eine ausreichende Fallhöhe und damit eine Beschleunigung des Wassers vor dem Eintreffen auf die Turbine zu gewährleisten. Bevor das Wasser in die Turbine gelangen kann, wird in der sogenannten Wasserfassung die Reinigung des Triebwassers durchgeführt. Insbesondere in Flüssen muss der Bau von Schleusen berücksichtigt werden, um die Flüsse schiffbar zu halten. Darüber hinaus müssen Fische die Möglichkeit besitzen, das Bauwerk zu passieren (Giesecke und Heimerl 2014).

Mobile Wasserkraftanlagen können hingegen ohne größeren Aufwand in geeigneten Gewässern betrieben werden. Die Anlage muss an Ankerpunkten befestigt werden, um in der Strömung nicht mitgerissen zu werden (Smart Hydro Power 2021a).

- Komplexität des Energiespeichers

Der Energiespeicher ergibt sich für Speicherkraftwerke aus dem Wasservolumen, welches für die Energieerzeugung bereitgestellt wird. Diese meist künstlich angelegten Stauseen benötigen aufwendige Bauwerke und sind in der Planung und im Bau äußerst aufwendig. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass die Speicherbecken trotz jährlich variierender Niederschlags- und Temperaturverhältnisse sowie der Mehrfachnutzung durch beispielsweise Trinkwasserbereitstellung nicht geleert werden.

Mobile Anlagen haben in der Regel keinen Speicher, abgesehen vom aufgestauten Wasserreservoir. Auch in dieser Kategorie wird deshalb keine Bewertung vorgenommen.

- Anlaufzeit

Durch den bereits lang erprobten und gezielt weiterentwickelten Einsatz von Wasserkraftwerken als Regelkraftwerk lassen sich diese durch optimierte Anlaufzeiten

charakterisieren. Die Anlaufzeiten stationärer Anlagen bewegen sich in Zeiträumen von 60 bis 110 Sekunden und sind somit für den stationären Notstromfall nicht geeignet (Giesecke und Heimerl 2014).

Sobald die Anlagen im Wasser sind, können die mobilen Anlagen in kurzer Zeit zur Stromerzeugung benutzt werden.

- Robustheit

Stationäre Wasserkraftanlagen sind durch ihre einfache und zuverlässige Technik als robust einzustufen. Da es sich darüber hinaus um eine lang erprobte Technologie handelt, ist auch durch regelmäßig geforderte Instandhaltungsmaßnahmen mit einer hohen Robustheit zu rechnen (Giesecke und Heimerl 2014).

Mobile Anlage sind durch ihre exponierte Lage in Flüssen und Kanälen insbesondere vor Treibgut zu schützen. Zwar gibt es entsprechende konstruktive Vorkehrungen an den Anlagen, um eine Blockade durch Gegenstände zu verhindern, dennoch geht der Schutz mit einer Minderung der Fließgeschwindigkeit einher. Die Robustheit ist deshalb als schlecht einzuschätzen.

8.5.3 Organisatorische Anforderungen

- Transport und Aufbau

Mobile Wasserkraftanlagen lassen sich von den Abmaßen her auf gewöhnlichen LKW transportieren. Hier wäre aufgrund des geringen Gewichts von 380 kg sogar ein Transport auf PKW-Anhängern denkbar. Aufgrund der großen Anzahl an benötigten Anlagen sind allerdings mehrere Transportmittel nötig. Ausgehend von 15 Anlagen, die für eine Bereitstellung von 75 kW benötigt werden, und von den Abmessungen eines Sattelauflegers können drei Anlagen pro LKW transportiert werden, sodass insgesamt fünf LKW für den Transport aller Anlagen nötig sind.

Eine besondere Herausforderung stellt der Aufbau der Anlagen dar. Diese müssen in Flussbereichen mit starker Strömung installiert werden. Hierfür sind geeignete Boote nötig, von denen aus eine Installation im Gewässer möglich ist. Zudem ist ein Kran nötig, der die Anlagen im Gewässer platzieren kann. Aufgrund der schwierigen Installationsbedingungen, der notwendigen Geräte und der großen Anzahl an zu installierenden Anlagen ist der Aufbau als negativ zu bewerten.

- Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb

Für Wasserkraftanlagen sind keine Brenn- oder Betriebsstoffe nötig, die der Anlage im laufenden Betrieb zugeführt werden müssen. Daher ist das Kriterium positiv zu bewerten.

- Instandhaltungsaufwand

Durch hohe Sicherheits- und Zuverlässigkeitsansprüche ist eine regelmäßige Wartung nötig. Neben Turbinen, Rohren zur Wasserführung und Staumauer sind auch Fischtreppe und Rechenanlage zu warten. Bei der Rechenanlage besteht die Wartung aus einer regelmäßigen Sichtkontrolle und Reinigung. Die Reinigung kann mechanisch geschehen, wobei eine mechanische Reinigung in Abhängigkeit von Bauart des Rechens und Treibgutaufkommen nötig sein kann (Giesecke und Heimerl 2014). Aufgrund der Vielzahl an zu wartenden Komponenten ist der Instandhaltungsaufwand ebenfalls als sehr hoch einzustufen.

Für die mobile Anwendung kann der Instandhaltungsaufwand nicht näher bestimmt werden. Aufgrund der kompakten Bauweise und der geringen Anzahl an Verschleißteilen wird der Wartungsaufwand selbst allerdings als gering eingeschätzt. Nach jeder Montage in Gewässern erfordert die mobile Wasserkraftanlage nach dem Einsatz eine Reinigung, wodurch der Instandhaltungsaufwand erhöht wird.

- Personal- und Qualifikationsbedarf

Sowohl für die Instandhaltung als auch den Betrieb von stationären Wasserkraftanlagen bedarf es qualifiziertes Personal (Kohler 2006). Aufgrund von Fernüberwachung ist es allerdings häufig möglich, Wasserkraftanlagen unbemannt zu fahren, weshalb der Personalbedarf für den Betrieb als gering bis durchschnittlich einzustufen ist (Weka Business Medien GmbH 2019). Aufgrund des hohen Instandhaltungsaufwandes für Wasserkraftanlagen ist der Personal- und Qualifikationsbedarf für das Instandhaltungspersonal allerdings als sehr hoch anzusehen, weshalb auch der Personalbedarf als hoch einzustufen ist.

Für die mobile Anwendung wird im laufenden Betrieb entsprechend geschultes Personal lediglich für die Überwachung und Kontrolle der Anlagen benötigt. Für den Aufbau der Anlage ist neben einer Elektrofachkraft zum Anschluss der Anlagen weiteres geschultes Personal für den Aufbau und die Montage der Anlagen erforderlich. Hierbei sind neben einer kranführenden Person mindestens zwei weitere Personen für die Montage im Fluss erforderlich. Somit sind mindestens vier Arbeitskräfte für die Montage nötig. Um einen zügigen Aufbau zu gewährleisten,

sollte allerdings deutlich mehr Personal verfügbar sein. Somit ergibt sich ein hoher Personalbedarf bei der mobilen Anwendung. Aufgrund des hohen Personalbedarfs für die Montage wird der Personalbedarf allgemein als hoch eingestuft.

- Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen

Da es sich bei stationären Wasserkraftanlagen nicht um standardisierte Anlagen handelt, muss je nach Größe und Bedeutung der Wasserkraftanlage ein gewisser Materialbestand bevorratet werden, um lange Standzeiten bei Instandhaltungsmaßnahmen zu verhindern. Hierzu zählen Verschleißteile, Teile mit beanspruchungsabhängiger Lebensdauer, Material zur systematischen Wartung, Schmiermittel, Teile mit langer oder unsicherer Lieferzeit sowie Sonderanfertigungen für die Anlage. Zudem ist eine Verfügbarkeit bei deutschen Herstellern nicht sicher gegeben, weshalb der Beschaffungsaufwand als hoch einzustufen ist.

Bei den mobilen Anlagen handelt es sich um eine neue Technologie, die von einer deutschen Firma vertrieben wird, weshalb von einer möglichen Beschaffbarkeit von Ersatzteilen und Betriebsstoffen aus Deutschland auszugehen ist. Da mobile Anlagen nur von einem Hersteller vertrieben werden und es sich um eine neue Technologie handelt, ist eine zuverlässige Beschaffung als nicht gesichert einzustufen.

- Genehmigungsaufwand

Beim Bau von Wasserkraftanlagen gibt es einen erheblichen Genehmigungsaufwand, durch den Genehmigungen für die baulichen Maßnahmen sowie Genehmigungen gemäß Wasserhaushaltsgesetz für das Aufstauen, die Entnahme und das Wiedereinleiten des Wassers anfallen. Da es sich hierbei um eine Bewilligung handelt, kann diese jederzeit unter Angabe eines triftigen Grunds wieder entzogen werden (Pionierkraft GmbH 2022). Zudem sind bei der Nutzung von Wasserkraft weitere Gesetze und Richtlinien zu beachten, die im Wesentlichen verschiedenen Umweltrechtszweigen angehören und eingehalten werden müssen. Einige dieser Gesetze werden im Folgenden aufgezählt (Giesecke und Heimerl 2014).

- Umweltverfassungsrecht
 - Grundgesetz
 - EG-Gründungsvertrag
- Allgemeines Umweltverwaltungsrecht
 - Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
 - Umweltinformationsgesetz
 - EG-Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
 - EG-Umweltauditverordnung

- Besonderes Umweltverwaltungsrecht
 - Gewässerschutz
 - EG-Wasserrahmenrichtlinie
 - Wasserhaushaltsgesetz
 - Landeswassergesetze
 - Abwasserabgabengesetz
 - Naturschutz und Landschaftspflege, Tierschutz, Bodenschutz
 - Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie der EU
 - Bundesnaturschutzgesetz
 - Bundeswaldgesetz
 - Tierschutzgesetz
 - Bundes-Bodenschutzgesetz
 - Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen
 - Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
 - Abfallverbringungsgesetz
 - Luftreinhaltung und Lärmbekämpfung
 - Bundes-Immissionsschutzgesetz mit zugehörigen Verordnungen
 - Schutz vor gefährlichen Stoffen
 - Chemikaliengesetz
 - Pflanzenschutzgesetz
 - Düngemittelgesetz
 - Energieeinsparung
 - Energieeinsparungsgesetz
 - EEG
 - Umweltprivatrecht
 - BGB
 - Umwelthaftungsgesetz
 - Umweltstrafrecht
 - Strafgesetzbuch
 - Gesetz über Ordnungswidrigkeiten

Neben der Vielzahl einzuhaltender Gesetze ist der Bau von Wasserkraftanlagen auch immer mit einem Eingriff in die Natur verbunden, wodurch sich ein großes Potential für Klagemöglichkeiten Dritter ergibt.

Da es sich bei der mobilen Anwendung um eine neue und nicht etablierte Technologie handelt, existiert derzeit kein Genehmigungsprozess, weshalb der Genehmigungsaufwand als hoch einzustufen ist. Es ist dabei nicht davon auszugehen, dass die Anlagen in jedem Gewässer ohne Genehmigung genutzt werden können, da durch diese eine mögliche Gefährdung für den Schiffsverkehr, Wassersport oder die Fischerei ausgehen kann.

8.5.4 Sicherheitsanforderungen

- IT-Bedarf

Wasserkraftanlagen bedürfen eines Leitsystems zur Steuerung und Regelung der Anlage. Somit ist IT grundsätzlich nötig (Giesecke und Heimerl 2014). Die meisten Wasserkraftanlagen werden heutzutage fernüberwacht, weshalb vernetzte IT bei stationären Anlagen als Stand der Technik anzusehen ist (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. 2021). Grundsätzlich wird allerdings lediglich nicht vernetzte IT benötigt.

Für die Einspeisung des von der mobilen Anlage erzeugten Stroms ist nicht vernetzte IT erforderlich, um die Synchronisation der Bauteile zu erreichen. Bei Anlagen, welche netzparallel betrieben werden, ist zusätzlich eine Onlineüberwachung vorgesehen (Smart Hydro Power 2021b). Für den Notstromfall ist somit lediglich nicht vernetzte IT erforderlich.

- Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung

Bei stationären Anwendungen besteht bei Wasserkraftanlagen die klassische Gefährdung des Ertrinkens aufgrund eines Sturzes ins Wasser. Dieses Risiko lässt sich durch das Tragen von Schwimmwesten oder das Bereitstellen von Rettungsbooten minimieren. Weitere Gefährdungen für Einzelpersonen sind beispielsweise stolpern, stürzen und stoßen, welche allerdings auch bei anderen Technologien auftreten können (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. 2021). Somit sind keine besonderen Gefahren für Einzelpersonen vorhanden. Für Dritte, die sich am oder im Gewässer aufhalten, treten die größten Gefährdungen beim Ein- bzw. Auslauf des Kraftwerks auf. So können je nach Anlagentyp und -größe bei sich ändernden Abflusszuständen Schwall- und Sunkwellen auftreten, die vor allem für unwissende oder unachtsame Personen eine erhebliche Gefahr darstellen können. Durch das Aussprechen von Verboten des Betretens besonders gefährdeter Bereiche oder durch bauliche Maßnahmen lässt sich das Risiko für Unfälle jedoch deutlich reduzieren (Giesecke und Heimerl 2014). Die wohl größte Gefährdung für Mensch und Umwelt stellt eine Flutwelle in Folge eines Bruchs der Staumauer dar. Ein Beispiel hierfür ist der Bruch eines Staudamms in der Nähe der Stadt Gusau in Nigeria im Jahr 2006, wobei 40 Menschen starben und ungefähr Tausend Familien ihre Häuser verloren (BBC News 2006). Somit liegt ein sehr hohes Gefährdungspotential vor. Für die mobile Anwendung besteht die Gefahr eines Bruchs der Staumauer nicht. Hier bestehen die größten Gefahren darin, dass sich im Wasser befindende Personen in die Turbine geraten. Eine bauliche Abtrennung des Gefahrenbereichs ist nicht möglich. Für die Personen, die mit der Anlage hantieren, besteht das größte Sicherheitsrisiko bei der Montage oder Demontage der Anlagen im Gewässer. Hier-

für muss das Personal mit Booten auf das Gewässer fahren, wobei die Möglichkeit eines Sturzes in das Gewässer besteht und Ertrinken droht. Die Gefahren für die Umgebung sind allerdings als gering einzuschätzen.

- Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus

Bei stationären Anlagen handelt es sich in der Regel um massive Bauwerke, die sich gegen den Zugriff von außen sehr gut schützen lassen. Alle sensiblen Einrichtungen lassen sich in geschlossenen Räumen unterbringen und sind somit bestmöglich geschützt.

Auch mobile Anwendungen sind gut gegen den Zugriff von Dritten geschützt. Diese Anlagen befinden sich in Gewässerbereichen mit starker Strömung, weshalb ein Zugriff für Dritte sehr schwierig ist. Lediglich die Anschlusselektronik und die zugehörigen Kabel müssen an Land installiert werden. Die Anschlussschränke lassen sich dabei auch in Containern oder Schränken unterbringen, weshalb auch diese gut geschützt werden können.

8.5.5 Marktorientierte Anforderungen

- Investitionskosten

Die Investitionskosten lassen sich nach Nachtnebel wie folgt gliedern (Nachtnebel 2009):

- die Grundstückskosten, Wasserrechtskosten und etwaige Ablösezahlungen,
- Aufschließungskosten an der Projektstelle, die eine zusätzliche Belastung darstellen,
- die Planungs- und Bauleitungskosten für das Kraftwerk und das Versorgungsnetz,
- die Transportkosten, die bei abseits gelegenen Projektstellen unbedingt zu berücksichtigen sind und in denen Seefracht, Transport, Versicherung etc. enthalten sind,
- die Baukosten für die gesamte Anlage,
- die Kosten der elektromaschinellen Ausrüstung, das lokale Versorgungsnetz inkludiert,
- die Abgaben, die an öffentliche Stellen abzuführen sind,
- die während der Bauzeit anfallenden Zinsen und
- ein Kostenanteil, der zur Abdeckung unvorhergesehener Ausgaben dient.

Die spezifische Situation am Aufstellungsort hat einen großen Einfluss auf die jeweiligen Kosten, weshalb eine allgemeingültige quantitative Erfassung der einzelnen Anteile sehr schwierig ist. Somit lässt sich für die Bewertung kein all-

gemeingültiger Wert beziffern. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass sich die Investitionskosten für neue Kleinwasserkraftwerke mit einer Leistung zwischen 70 und 1.000 kW auf 8.500 bis 10.000 Euro pro Kilowattstunde belaufen (Bundesverband Deutscher Wasserwerke e.V. 2019). Somit ergäben sich Investitionskosten für den stationären Anwendungsfall mit 500 kW Leistung in Höhe von 4,25 bis 5 Millionen Euro.

Für die mobile Anwendung werden Turbinen mit einer maximalen Leistung von 5 kW für einen Preis von 14.580 € angeboten (Smart Hydro Power 2021c). Für die Bereitstellung einer Leistung von 75 kW wären somit 15 Anlagen notwendig, welche zusammen einen Preis von 218.700 € aufweisen. Hinzu kommen die Kosten für den elektrischen Anschluss der Anlagen. Hierfür werden fertige Inselnetzsysteme für 8.650 € angeboten (Smart Hydro Power 2021c). Bei 15 Anlagen ergeben sich somit zusätzliche Kosten in Höhe von 129.750 €. Somit würde sich für die Anschaffung der Anlagen ein Preis von 348.450 € ergeben. Da es sich bei den Preisen um Ab-Werk-Preise handelt, müssten zusätzliche Kosten für den Transport der Anlagen berücksichtigt werden.

- Operative Kosten

Für die Nutzung von Wasserkraft fallen keine Kosten für den Treibstoff an, da hier die Bewegungsenergie von Flüssen genutzt wird.

Die laufenden Kosten der stationären Anwendung setzen sich somit aus den Kosten für Instandhaltung, Versicherung, Verwaltung, Miete bzw. Pacht, Unvorhergesehenes und Personal zusammen. Für eine Anlage mit 500 kW installierter Leistung werden dabei Betriebskosten in Höhe von 95.225 € pro Jahr angegeben (Keuneke 2015). Dies entspricht jährlichen Kosten in Höhe von 190 € pro kW oder 10,87 € pro Stunde. Die angegebenen Kosten gelten allerdings für den Dauerbetrieb. Operative Kosten für den Notstrombetrieb mit 30 Einsatzstunden pro Jahr können nicht beziffert werden. Aufgrund der hohen Kosten und des hohen Aufwandes für die Errichtung einer Wasserkraftanlage ist die ausschließliche Nutzung dieser für den Notstromfall als nicht sinnvoll zu erachten.

Für die mobile Anwendung werden lediglich die Kosten für Kraftstoff, Personalbedarf und Instandhaltung berücksichtigt. Für den Kraftstoff fallen keine Kosten an. Der Personalbedarf wird zunächst mit vier Personen abgeschätzt, die laut THW mit einem Stundenlohn von 12,50 € berechnet werden (Kapitel 12.2: Experteninterview). Somit ergeben sich Betriebskosten im Anwendungsfall in Höhe von 50 € pro Stunde. Dies entspricht bei einer Einsatzdauer von 30 Stunden 1500 € pro Jahr. Hinzu kommen Wartungskosten, die aufgrund des recht einfachen Aufbaus in Höhe von 500 € pro Jahr abgeschätzt werden.

Im folgenden Kapitel wird die Bewertung der Anwendungsszenarien durch eine elektrische Energieversorgung auf Basis von Windenergie durchgeführt. Wie in Kapitel 6 beschrieben, ist für einen zuverlässigen Notstrombetrieb die Kombination mit einem Batteriespeicher unumgänglich und wird deshalb mit bewertet. Für den stationären Anwendungsfall im Krankenhaus wird eine Nettoleistung der Anlage von 2 MW vorausgesetzt, was bezogen auf die Nettoleistung einer vierfachen Vergrößerung entspricht. Hintergrund dafür ist, dass WEA Nettoleistung erst ab einer Windgeschwindigkeit von 7–8 m/s erreichen. Um die Wahrscheinlichkeit einer unzureichenden Energieproduktion zu minimieren, wird die Anlage deshalb so dimensioniert, dass bereits kurz nach der Einschaltgeschwindigkeit von 3 m/s die geforderte Leistung erreicht werden kann, siehe Abbildung 14. Somit werden langanhaltende Phasen der Flauten verkleinert und der kostenintensive Batteriespeicher kann entsprechend kleiner ausgeführt werden. Für die folgende Bewertung wird angenommen, dass die WEA für maximal 36 Stunden keinen Strom erzeugt, der Speicher also für diese Zeit ausgelegt wird.

SG 2.1-114 power curve

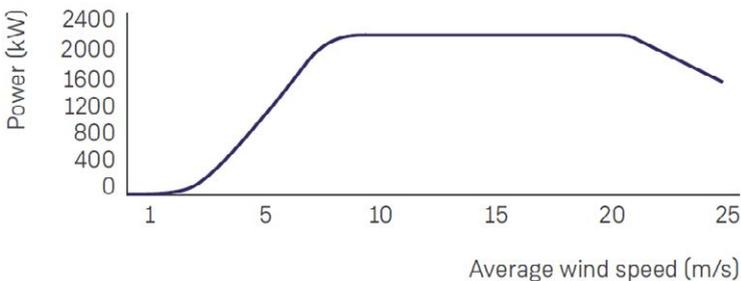


Abbildung 14: Leistungskurve einer WEA mit 2,1 MW (Siemens Gamesa Renewable Energy 2021c)

Selbiges gilt für den mobilen Anwendungsfall, in dem eine Flugwindkraftanlage betrachtet wird. Auch hier wird die Nettoleistung der Anlage um den Faktor 4 vergrößert und der Batteriespeicher für 36 Stunden ausgelegt.

8.6.1 Energetische Anforderungen

- Leistungsbereitstellung

Die Leistungsbereitstellung für das stationäre Anwendungsszenario kann problemlos durch horizontale WEA erfolgen. Diese bieten ein hohes Spektrum an Leistungsbereichen. Derzeit am Markt verfügbare Großanlagen haben Leistungsbereiche von mehreren MW (Siemens Gamesa Renewable Energy 2021c, Nordex SE 2021, Vestas Deutschland GmbH 2021).

Auch für das mobile Anwendungsszenario bieten Flugwindkraftanlagen die geforderte Leistungsbereitstellung. Mehrere Hersteller haben bereits Anlagen auf den Markt gebracht und decken Leistungsbereiche vom unteren bis in den hohen kW-Bereich ab (SkySails Power 2021, Bormann 2021, Kitepower – Airborne Wind Energy – A Enevate BV Company 2021a).

Für beide Anwendungsszenarien gibt es passende Technologien im entsprechenden Leistungsbereich.

- Regel- und Skalierbarkeit

Grundsätzlich ist es möglich, mehrere WEA parallel zu betreiben, um die Leistungsbereitstellung zu skalieren. Der größte Einflussfaktor für die Skalierung ist allerdings der notwendige Abstand zu anderen Anlagen und Gebäuden.

Die Regelbarkeit einzelner horizontaler WEA ist abhängig von der verwendeten Generator- bzw. der dazugehörigen Umrichtertechnologie. Zu den häufigsten Generortechnologien zählen

- direkt angetriebene Anlagen mit fremderregtem Synchrongenerator (Vollumrichter) und
- Anlagen mit Getriebe und doppelt gespeistem Asynchrongenerator.

Anlagen mit fremderregtem Synchrongenerator zeichnen sich durch eine gute Regelbarkeit aus, da die durch den Generator erzeugte Wechselspannung variabler Frequenz zunächst gleichgerichtet und anschließend wieder in eine Wechselspannung konstanter Frequenz umgerichtet wird. Durch die sogenannte Vollumrichtertechnologie bleibt die Ausgangsleistung somit unabhängig von sich ändernden

Windverhältnissen und bietet deshalb sehr gute Regelbarkeit. Insbesondere für die kleinen und mittleren Leistungsbereiche wird diese Technologie eingesetzt. Die Technologie mit doppeltgespeistem Asynchrongenerator wird zunehmend in Anlagen ab 3 MW eingesetzt, um Kosten und Gewicht zu reduzieren. Diese finden in der Bewertung allerdings keine Beachtung.

Durch die zyklische Energieerzeugung verfügen alle Flugwindkraftanlagen über einen elektrischen Speicher, der mindestens die elektrische Energie für den Einholvorgang puffert. Aufgrund des Speichers kann davon ausgegangen werden, dass die Anlagen über eine sehr gute Regelbarkeit verfügen. Darüber hinaus kann die Drehzahl des Generators flexibel gesteuert werden. Die Skalierbarkeit der Anlagen ist jedoch durch einen hohen Abstand aufwendiger.

- Energieträger-Verfügbarkeit

Die Energieträger-Verfügbarkeit von WEA ist von den gegebenen Windverhältnissen abhängig. Die Abhängigkeit ergibt sich einerseits zeitlich z. B. durch die Jahreszeit (Sommer oder Herbst) und andererseits durch die geographische Lage (z. B. Küste oder Inland). Eine Verfügbarkeit ist dabei immer mit Wahrscheinlichkeiten verbunden, deren Vorhersage zwar mit kürzerer Vorlaufzeit präziser wird, aber dennoch mit Unsicherheiten verbunden ist. Dabei ist zu beachten, dass Flugwindkraftanlagen in deutlich größeren Höhen agieren und einer entsprechend höheren Windgeschwindigkeit ausgesetzt sind. Die Einsetzbarkeit gegenüber horizontalen WEA ist somit erhöht (Kitepower – Airborne Wind Energy – A Enevate BV Company 2021b).

Die Planbarkeit und Zuverlässigkeit bei der Windenergie sind zwar vorhersagbar, jedoch orts- und zeitabhängig. Flugwindkraftanlagen sind besser als horizontale WEA zu bewerten. Für beide Systeme muss eine Batterie als Energiespeicher eingesetzt werden.

- Energiespeicherkapazität

Da die Systemeigenschaften von WEA für den Einsatz von elektrochemischen Energiespeichern prädestiniert sind und diese bereits im Kapitel 8.7.1 bewertet werden, wird die Wertung übernommen.

- Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad von WEA-Speicher-Systemen setzt sich aus dem Gesamtwirkungsgrad der elektrochemischen Energiespeicher, des Wechselrichters, der WEA selbst und der Peripherie zusammen. Während die Wirkungsgrade der WEA tech-

nologieabhängig zwischen 40 und 50 % einzuordnen sind, liegen Wechselrichter zwischen 96 und 98 % und Batteriespeicher technologieabhängig zwischen 75 und 95 % (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE 2021). Der Energieeigenbedarf ist neben den Verlusten maßgeblich für die Höhe des Wirkungsgrades.

8.6.2 Technische Anforderungen

- Größe und Gewicht

WEA für den stationären Einsatz erreichen je nach Leistungsklasse Höhen von 150 bis 250 m. Auch das Gesamtgewicht variiert je nach Leistungsklasse, wobei Werte von bis zu 7000 t erreicht werden. Darüber hinaus benötigen WEA ein ausreichend großes Fundament, welches im Durchmesser 20 bis 30 m misst und eine Tiefe von ca. 4 m aufweist (Bundesverband WindEnergie e. V. 2021a). Dazu kommen notwendige Abstandsregeln von bis zu 1000 m zu Wohnhäusern, die den Schutz der Anwohner vor möglichen Emissionen gewährleisten sollen (Zeit Online 2020).

Für Flugwindkraftanlagen gelten diese Abstandsregeln derzeit nicht. Dennoch muss ein ausreichender Abstand um die Bodenstation von 400 bis 500 m eingehalten werden (Kitepower – Airborne Wind Energy – A Enevale BV Company 2021a). Die Anlagen der unteren Leistungsklassen sind im gepackten Zustand mittels Container und LKW transportfähig. Dazu kommt der Transport des Batteriespeichers, welcher einen weiteren LKW beansprucht.

- Notwendige konstruktive Anlagenstruktur und Peripherie

Der Aufwand für die Aufstellung horizontaler WEA ist insbesondere durch die Schaffung eines entsprechenden Fundaments als hoch einzustufen. Darüber hinaus müssen befestigte Wege für Schwerlasttransporte geschaffen werden, um die einzelnen Anlagenteile an den Aufbauort zu transportieren. Der Transport der Anlagenteile ist ebenfalls mit hohem Aufwand verbunden, da für die Durchführung von Schwertransporten ein hoher Planungsaufwand notwendig ist.

Mobile Flugwindkraftanlagen benötigen ebenfalls einen geeigneten Aufstellungs-ort. Die Schaffung eines geeigneten Fundaments ist aufgrund des geringeren Gewichts der Anlage als deutlich geringer einzustufen. Die Anlagenhersteller werben grundsätzlich mit einem einfachen und unkomplizierten Aufbau. Gewicht und Größe sind bei stationären Anlagen als sehr hoch einzustufen, kleinere mobile Anlagen haben weniger hohe Anforderungen.

- Komplexität des Energiespeichers

Da für den Energiespeicher elektrochemische Speichertechnologien prädestiniert sind, wird auf die Bewertung dieser in Kapitel 8.7.2 verwiesen.

- Anlaufzeit

Die Anlaufzeit von WEA ist von den herrschenden Windverhältnissen abhängig. Bei ausreichender Windgeschwindigkeit lässt sich die Nennleistung verschiedener Technologien innerhalb weniger Minuten erreichen. Die Anlaufzeit von WEA ist bei ausreichender Windgeschwindigkeit als sehr niedrig einzustufen. Zusätzlich wird die Anlaufzeit durch den Batteriespeicher auf ein Minimum reduziert und gilt auch für die Flugwindkraftanlagen für den mobilen Einsatz.

- Robustheit

Grundsätzlich sind horizontale WEA als robust einzuschätzen. Insbesondere sind die Anlagen so konstruiert, dass äußere Wettereinflüsse zu wenigen bis gar keinen Einschränkungen im Betrieb führen. Horizontale WEA müssen ab einer Windgeschwindigkeit von 25 m/s abgeschaltet werden. Flugwindkraftanlagen haben eine Abschaltwindgeschwindigkeit von 20 bis 25 m/s (SkySails Power 2021, Kitepower – Airborne Wind Energy – A Enevate BV Company 2021b).

Die Robustheit von WEA ist prinzipiell als hoch einzustufen. Der Ausfall aufgrund zu hoher Windgeschwindigkeiten ist abhängig vom Wettergeschehen am Aufstellort. Durch Kombination mit einem Batteriespeicher wird die Robustheit niedrig gewertet.

8.6.3 Organisatorische Anforderungen

- Transport und Aufbau

Mobile Flugwindkraftanlagen werden im Hinblick auf einen möglichen Transport entwickelt. Im gepackten Zustand lassen sich diese in einem 20- bis 40-Fuß-Container unterbringen und mittels Lastkraftwagen transportieren. Große stationäre Anlagen müssen mittels Schwertransport in mehreren Ladungen transportiert werden. Wege und Verkehrsflächen müssen soweit vorbereitet werden, dass einerseits die Transportfahrzeuge an den Aufstellort gelangen können und andererseits die Aufstellfläche den Angaben der Hersteller entspricht. Der Aufbau der Flugwindkraftanlagen erfolgt häufig mit automatisierter Unterstützung und kann innerhalb von vier Stunden erfolgen (Kitepower – Airborne Wind Energy – A Enevate BV Company 2021a). Transport und Aufbau mobiler WEA sind grundsätzlich

als wenig kompliziert einzuschätzen. Transport und Aufbau stationärer WEA sind als sehr hoch einzuschätzen.

- Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb

Nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme benötigen sowohl stationäre als auch mobile Windkraftanlagen bis auf eine elektrische Versorgung keine weitere Versorgung mit Betriebsmitteln zur Aufrechterhaltung der Betriebsfähigkeit.

- Instandhaltungsaufwand

Da WEA komplexe Systeme sind, ist eine Instandhaltung der Anlagen unumgänglich. Insbesondere bei stationären Anlagen, welche ununterbrochen in Betrieb sind, werden halbjährliche Wartungsintervalle durchgeführt. Wichtige Arbeiten sind dabei die Kontrolle insbesondere der mechanischen und elektronischen Bauteile. Der Austausch kleinerer Komponenten ist dabei zügig und unkompliziert möglich. Defekte an größeren Bauteilen wie den Rotorblättern oder dem Getriebe sind mit größerem Aufwand verbunden und benötigen zusätzliche Hilfsmittel (Bundesverband WindEnergie e.V. 2021b).

Der Instandhaltungsaufwand mobiler Flugwindkraftanlagen ist aufgrund der geringeren Größe als etwas unkomplizierter einzustufen.

- Personal- und Qualifikationsbedarf

Die Bedienung stationärer Anlagen kann grundsätzlich automatisiert erfolgen, so dass kein Personal- bzw. Qualifikationsbedarf benötigt wird. Lediglich für Instandhaltungsmaßnahmen ist qualifiziertes Personal notwendig. Dieses muss neben der Aneignung technischer Fähigkeiten auch Sicherheitstrainings durchlaufen (Berufsbildungswerk Gemeinnützige Bildungseinrichtung des DGB GmbH 2021).

Für Aufbau, Anschluss und die Bedienung mobiler Flugwindkraftanlagen sind entsprechend qualifizierte Personen erforderlich. Das Training für den Aufbau der Anlagen kann allerdings innerhalb eines halben Tages durchgeführt werden. Insbesondere der elektrische Anschluss der Anlage muss mindestens durch eine elektrotechnisch unterwiesene Person oder eine Elektrofachkraft erfolgen (Kitepower – Airborne Wind Energy – A Enevate BV Company 2021a).

Der Personal- und Qualifikationsbedarf für WEA ist für den mobilen Anwendungsfall als durchschnittlich und für den stationären als hoch anzusehen.

- Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen

Die technische Lebensdauer von WEA ist mit 20 Jahren beziffert. Die Komplexität erhöht sich bei größeren Anlagen dahingehend, dass zusätzliche Systeme beispielsweise zur Kühlung verbaut sind. Der Aufwand zur Beschaffung insbesondere von Ersatzteilen hängt jedoch von dem Stand der Serienreife der jeweiligen WEA ab. Die am Markt erhältlichen mobilen Flugwindkraftanlagen befinden sich noch in der Entwicklungsphase bzw. werden in Kleinserien gefertigt. Eine zuverlässige Versorgung von Ersatzteilen, insbesondere bei Insolvenz der Herstellenden, kann deshalb nicht garantiert werden. Herstellende geben allerdings eine Versorgungssicherheit von fünf Jahren an. Ersatzteile für etablierte WEA sollten grundsätzlich schnell lieferbar sein. Ersatzteile für Flugwindkraftanlagen sind verfügbar, so lange der Hersteller diese anbieten kann.

- Genehmigungsaufwand

Für stationäre WEA ab einer Höhe von 50 m wird eine sogenannte immissionschutzrechtliche Genehmigung gefordert. Diese setzt sich zusammen aus Bestandteilen des Bauplanrechts (BauGB), des Bauordnungsrechts des entsprechenden Bundeslands, des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG), des Luftverkehrsrechts (LuftVG) und des Bundesfernstraßengesetzes (FStrG). Grundsätzlich kann für die Projektplanung für den Bau einer WEA ein Planungsaufwand von mehreren Jahren angesetzt werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2021b).

Auch für den Betrieb von Flugwindkraftanlagen müssen vor der Inbetriebnahme entsprechende Genehmigungen eingeholt werden. Insbesondere durch die große Flughöhe muss eine Fluggenehmigung bei den lokalen Behörden bzw. der Flugsicherung beantragt werden (Kitepower – Airborne Wind Energy – A Enevale BV Company 2021a).

8.6.4 Sicherheitsanforderungen

- IT-Bedarf

Stationäre WEA und mobile Flugwindkraftanlagen sind mit SCADA-Systemen (Supervisory Control and Data Acquisition) ausgerüstet und müssen gegen unbefugte Eingriffe geschützt werden. Auch für die Verarbeitung von Wetterprognosen wird eine Schnittstelle benötigt. Es ist ein etwas höheres Sicherheitsrisiko zu erwarten.

- Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung

Der korrekte Aufbau sowie die Einhaltung von Abständen zu den WEA sind Grundlage für einen sicheren Betrieb der Anlage. Emissionen entstehen lediglich in Form von Lärm durch die Bewegung der Rotorblätter oder den Flug des Drachens. Selten führt ein technischer Defekt oder ein schweres Unwetter zur Zerstörung der Anlage. Das Risiko geht maßgeblich vom Energiespeicher aus und wird deshalb analog bewertet.

- Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus

Der Zugang zu WEA muss durch bauliche Vorkehrungen für unbefugte Personen begrenzt werden. Der Zugang zu großen WEA ist schlicht durch das Verschließen der Tür zum Turm gegeben. Mobile Flugwindkraftanlagen müssen durch Zäune vor unbefugtem Betreten geschützt werden.

8.6.5 Marktorientierte Anforderungen

- Investitionskosten

Die Investitionskosten von stationären WEA in horizontaler Bauweise haben sich in den letzten Jahren deutlich verringert und liegen bei etwa 900 € pro kW (Hau 2016). Dazu kommen weitere Kosten für die Projektentwicklung, Genehmigungsverfahren oder die Schaffung einer technischen Infrastruktur von etwa 100 € pro kW (Quentin 2015). Für eine Anlage mit 2000 kW ergeben sich somit Investitionskosten von 2 Millionen €. Für den Batteriespeicher werden weitere Investitionskosten von 8 Millionen € angenommen.

Für Flugwindkraftanlagen werden Investitionskosten in Höhe von ca. 3000 € pro kW angenommen. Dies ist auf die vergleichsweise neue Technologie zurückzuführen (Kitepower – Airborne Wind Energy – A Enevate BV Company 2021b). Für eine Flugwindkraftanlage mit 300 kW werden somit Investitionskosten von 900.000 € erwartet. Für den Batteriespeicher werden weitere Investitionskosten von 3,6 Millionen € angenommen.

- Operative Kosten

Die Kosten zum Betrieb einer stationären WEA sind als niedrig einzustufen, da zum Betrieb kein Brennstoff benötigt wird. Der größte Kostenfaktor wird durch Instandhaltung, Pacht, Versicherung und Verwaltung hervorgerufen. Für stationäre WEA werden jährliche operative Kosten von 36 € pro kW abgeschätzt (Costa et al. 2021). Für eine Anlage von 500 kW ergeben sich jährliche Kosten von ca. 18.000 €.

Aufgrund fehlender Serienreife gibt es wenig Daten, um die operativen Kosten von Flugwindkraftanlagen genau zu bestimmen. Hersteller nennen operative Kosten von ca. 0,05 € pro kWh (Aull et al. 2020). Bei einer mobilen Anlage mit 75 kW ergeben sich somit Kosten von 3,75 € pro Betriebsstunde, also 112,50 € im Jahr. Hinzu kommen ggf. Personalkosten und Raumnutzungsabgaben.

Neben der Nutzung einer Verbundanlage aus Energiewandler, -speicher und Steuereinheit kann bei hinreichender Dimensionierung des Speichers auf die Energiewandler verzichtet werden. Die Auswertung der erneuerbaren Energieanlagen Photovoltaik und Windenergie haben gezeigt, dass in der praktischen Umsetzung eines Notstromsystems keine zuverlässige Mindestleistung garantiert werden kann. Aus diesem Grund müsste der Batteriespeicher des Systems in jedem Fall so ausgelegt werden, dass dieser in der Lage wäre, die Mindestanforderungen an Leistung und Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Im Folgenden sollen daher elektrische/elektrochemische Energiespeicher ohne Erzeuger betrachtet und gemäß der Methodik aus Abschnitt 7 bewertet werden. Obwohl Energiespeicher in entsprechenden Dimensionierungen bereits weltweit in vielen Anwendungen verbaut sind, stellen vor allem die spezifischen Anforderungen der Anwendungsszenarien an die Mobilität noch Hürden dar. Energiespeicher für meist netzintegrierbare Großspeicherapplikation sind im konstanten Fokus der Forschung (Chen et al. 2020). Eine Übersicht mit Beispielsystemen ist in Tabelle 1 einzusehen.

8.7.1 Energetische Anforderungen

- Leistungsbereitstellung

Die meisten elektrischen Batteriespeicher sind unabhängig von ihrem Verwendungszweck und der Leistungsklasse grundlegend modular aufgebaut. Durch die strukturelle Verschaltung vieler einzelner Zellen werden so gezielt die gewünschten Leistungs- und Kapazitätswerte erreicht. Für die meisten Technologien, wie z. B. die Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion-Batterie), die Natrium-Schwefel-Batterie (Na-S-Batterie) oder Bleisäurebatterien, sind Leistung und Speicherkapazität miteinander verknüpft. Dies gilt jedoch nicht für Redox-Flow-Batterien, die aufgrund ihrer Funktionsweise die beiden Charakteristiken entkoppeln. Daraus resultiert eine individuelle Skalierbarkeit von Leistung und Kapazität. Elektrische Energiespeicher gibt es in vielen Größenordnungen, von einzelnen elektrischen Bauteilen mit nur Bruchteilen eines Watts bis hin zu Großspeicheranlagen mit weit über 100 MW Leistung (Guo et al. 2018). Technologieunabhängig können die geforderten Leistungen theoretisch erreicht werden.

- Regel- und Skalierbarkeit

Die Skalierbarkeit wurde bereits in 8.7.1: Leistungsbereitstellung beschrieben und gilt als erfüllt. Die Regelbarkeit ist grundsätzlich voll flexibel. Die Resilienz des Systems gegenüber z. B. Lastschwankungen und Netzfehlern hängt von Steuerkreisen und dem verwendeten Wechselrichter ab. Diese Bauteile bestimmen auch die Verwendungs- und Anschlussmöglichkeiten des Gesamtsystems. Ob und unter welchen Rahmenbedingungen der Aufbau eines Inselnetzes oder der Anschluss an eines möglich ist, hängt, ebenso wie die Fähigkeit, das Gesamtsystem modular zu erweitern, von diesen beiden Komponenten ab.

- Energieträger-Verfügbarkeit

Da es in dieser Technologievariante keinen Wandlungsprozess gibt, ist auch die Verfügbarkeit durch den Speicher immer gegeben. Die Speicher werden in der Bereitstellungsphase direkt mit elektrischer Energie geladen. Nur mit sogenannten „grünen Stromtarifen“ kann die Intention, CO₂ zu reduzieren, gewährleistet werden. Energieträger-Verfügbarkeit ist in der Einsatzphase demnach nicht notwendig und das Kriterium für die vordefinierten Einsatzzwecke ist somit als sehr gut zu bewerten.

- Energiespeicherkapazität

Auch die Energiespeicherkapazität kann aufgrund des modularen Aufbaus beliebig erweitert werden. Elektrische Energiespeicher sind von Bruchteilen einer Wattstunde bis hin zu einigen hundert Megawattstunden verfügbar (Guo et al. 2018). Gängige mobile Energiespeicher werden z. B. in elektrischen Fahrzeugen verbaut und haben eine Kapazität von 90 bis 200 kWh (EV Database (9-Five-9 Ventures BV) 2021). Für den mobilen Anwendungsfall wird bei einer geforderten Leistung von 75 kVA und einer Einsatzdauer von 96 Stunden eine Kapazität in Höhe von 7,2 MWh angenommen. Stationäre Anwendungen werden netzintegriert weltweit dazu genutzt, um Systemdienstleistungen zu erbringen, die Versorgungssicherheit zu gewährleisten und wirtschaftliche Interessen zu verfolgen (Heuck et al. 2010). Die dazu eingesetzten Systeme variieren von wenigen Kilowattstunden bis zu 400 MWh (Sandia National Laboratories 2021). Die Energiedichte der jeweiligen Technologie bestimmt dabei maßgeblich die Dimension des Speichers. Gravimetrische Energiedichten erreichen Werte von 70 bis 260 Wh/kg und volumetrische bis zu 700 Wh/l (Guo et al. 2018, Karabelli und Birke 2021, Hetttersheimer et al. 2017). Insgesamt ist das Kriterium höchstens durchschnittlich zu bewerten.

- Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad von elektrischen Energiespeichern ist als einzelne Kenngröße, ohne eine exakt definierte Nutzung, nur grob abschätzbar. Verschiedene Technologien, Lade- und Entladevorgänge und Speicherdauern haben für spezifische Ladezustände und Gesamtnutzungsdauern alle unterschiedliche Werte. Als grober Anhaltspunkt kann jedoch ein Gesamtwirkungsgrad zwischen 75 und 95 % genannt werden (Statista 2012). Bei extrem langen Bereitschaftsphasen kann, technologieabhängig, der Wirkungsgrad durch Selbstentladung, Verflüchtigung oder Dissipation sinken. Der Wirkungsgrad ist im Vergleich sehr gut.

8.7.2 Technische Anforderungen

- Größe und Gewicht

Elektrische Energiespeicher haben je nach Technologie spezifische Kapazitäten zwischen 70 Wh/kg und 260 Wh/kg, wobei aktuelle Forschungsprototypen bereits Werte von bis zu 500 Wh/kg erreichen (Németh 2014). Mobil in Elektrobussen eingesetzte Speicher haben bei einer Kapazität von 375 kWh eine Masse von 3,2 Tonnen inklusive Peripherie (Deutscher Bundestag 2020). Für den mobilen Anwendungsfall mit einem 7,2 MWh großen Speicherbedarf, muss selbst bei Technologien mit einer hohen Energiedichte eine Mindestlast von 27 Tonnen berücksichtigt werden – gemäß der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung §34 ist für die meisten Vier-Achsen-Lastkraftwagen eine Gesamtmasse in Höhe von 40 Tonnen zulässig. [190]. Das genaue minimale Volumengewicht einer Speichertechnologie ist nicht präzise zu bestimmen, da zwar die volumenspezifische Kapazität der Zellen errechnet werden kann, aber die Einbindung in ein Gesamtsystem den Großteil des Platzbedarfes verursacht und diese systemspezifisch stark variiert (Wang et al. 2021). Jedoch lässt sich abschätzen, dass sich das Volumen der Zellen bei dem gegebenen Kapazitätsbedarf aus den spezifischen Dichten der Kathode und Anode ergibt, 1400 bis 3600 Wh/l respektive 640 bis 3800 Wh/l. Dabei werden auf Modulebene volumetrische Energiedichten von 400 bis 700 Wh/l erreicht, woraus sich ein Staubedarf von unter 22 m³ ergibt. Selbst mit Peripherie, Kühlung und Anbindungen ist das verfügbare Transportvolumen eines gängigen 40-Fuß-Containers mit 65,7 m³ deutlich unterschritten (Karabelli und Birke 2021, Hettersheimer et al. 2017, Deutsches Institut für Normung 2020). Für stationäre Systeme ist das hinnehmbare Gesamtvolumen oft relevanter als die Masse. Standortabhängig haben Krankenhäuser nur sehr geringe Raumkapazitäten, siehe Anhang (Kapitel 12.4: Experteninterview). Generell sind die Anforderungen jedoch gut erfüllbar.

- Notwendige konstruktive Anlagenstruktur und notwendige Peripherie

Der Aufbau und die Anlagenstruktur dienen vor allem dazu, die Speichersysteme in technologieabhängigen adäquaten Temperaturbereichen zu halten, diese vor Vibrationen und mechanischen Impulsen zu schützen, äußere Sicherheit zu gewährleisten und eine möglichst große Variation an Anschlüssen und Schnittstellen zu ermöglichen. In der Regel sind trockene, klimatisierte und sonnengeschützte Umgebungsbedingungen herzustellen. Für stationäre Anwendungen ist das oft unproblematisch, da die grundlegenden Strukturen, z. B. eine Bodenplatte zum Abstellen des Systems, bereits vorhanden sind. Für mobile Anwendungen bedarf es entweder zusätzlichen konstruktiven Aufwands oder eines ausgereiften Gesamtsystems, das mobil, ohne weiteren Aufbau, eingesetzt werden kann.

- Komplexität des Energiespeichers

Technologieabhängig variieren die verwendeten Materialien und damit auch die Temperaturbereiche, die genutzten Gefahrenstoffe und die einhergehende Reaktivität. Hochtemperaturspeicher, wie zum Beispiel Na-S-Batterien, arbeiten in Temperaturbereichen ab 350 °C und haben dadurch erhöhte Anforderungen an die thermische Isolation und unterliegen strengeren Sicherheitskriterien. Li-Ion-Batterien sind aufgrund ihrer hohen Energiedichte besonders temperaturempfindlich. Bereits bei Zelltemperaturen über 60 °C kann der Prozess des „thermal runaway“ eingeleitet werden, bei dem durch thermisches Elektrolytversagen interne Kurzschlüsse zu einer exothermen Reaktion führen, welche die Zelle und gegebenenfalls das Gesamtsystem zerstören können. Die initiale Ursache kann sowohl eine externe thermische Überlastung, eine kritische mechanische Beschädigung oder eine elektrische Überlastung sein (Hauer et al. 2019). Eine redundante, unabhängig angesteuerte Ausführung der Kühlsysteme ist daher sinnvoll. Anwendungsfallunabhängig muss der Energiespeicher hinreichende Sicherheiten gegenüber allen Gefährdungsaspekten bieten. Die technologieabhängigen technischen Maßnahmen zur sicheren Energievorhaltung sind sehr hoch.

- Anlaufzeit

Während die kleinsten elektrischen Energiespeicher, Spulen und Kondensatoren ihre Energie nahezu instantan in Millisekunden abgeben können, bleiben auch größere elektrochemische Speicher aufgrund von Reglern, Verschaltungsarten und Antwortzeiten immer noch unterhalb einer Sekunde. Damit gehört diese Speicherart zu den am schnellsten reagierenden. Oft werden nicht nur Notstromsysteme, sondern auch USVs mit diesen Technologien umgesetzt. Die Anlaufzeiten sind für jeden Anwendungsfall als sehr gut zu bewerten.

- Robustheit

Elektrochemische Speicher sind nur in begrenzten Temperaturbereichen und in mechanisch unversehrtem Zustand funktionsfähig und ungefährlich, siehe Kriterium Komplexität des Energiespeichers. Unter anderem aus diesen Gründen sind elektrochemische Speicher empfindlich gegenüber externen Einflüssen. Aber auch der interne Betrieb muss durch eine Steuereinheit überwacht werden, da auch elektrische Überlastungen zum Systemversagen führen können. Damit sind diese Technologien nicht als robust einzustufen.

8.7.3 Organisatorische Anforderungen

- Transport und Aufbau

Der Transport von elektrochemischen Energiespeichern ist mit dem von konventionellen Generatoren vergleichbar. Auch hier befinden sich die Speicherzellen bereits als Gesamtsystem einsatzbereit und transportfertig montiert auf entsprechenden LKWs. Aufgrund der wesentlich geringeren Energiedichten wird insgesamt mehr Transportraum benötigt, was zum Einsatz mehrerer Fahrzeuge führen kann. Da die Aufbau- und Inbetriebnahmezeit auch hier maßgeblich von der Komplexität des Anschlusspunktes und vom System selbst abhängig sind, ergeben sich vergleichbare Zeiten bis zur Leistungsbereitstellung (Kapitel 12.2: Experteninterview). Die bloße Anlaufzeit ist hervorragend.

- Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb

Eine Versorgung des Speichers selbst findet im laufenden Betrieb nicht statt. Denkbar wäre der Austausch des Energiespeichersystems mit einem redundanten Zweitsystem. Da die Rahmenbedingungen der Anwendungsszenarien dies jedoch weder für den stationären noch für den mobilen Anwendungsfall vorsehen, bleibt diese Option außer Betracht. Lediglich der Personalaufwand für die Überwachung und Aufsicht und deren Versorgungsaufwand ist zu berücksichtigen. Da dies jedoch fast technologieübergreifend der Fall ist, ist das Kriterium nahezu autonom und somit als sehr gut zu werten.

- Instandhaltungsaufwand

Im Notstrombetrieb werden die elektrochemischen Speicher, abgesehen von Prüfungsintervallen, nur in der Einsatz- und nicht in der Bereitstellungsphase genutzt. Dadurch ergeben sich, relativ zum netzparallelen Betrieb, verhältnismäßig wenig Lade- und Entladezyklen. Das verringert nicht nur die Degeneration des Speichers und verlängert so die effektive Nutzungsdauer, es reduziert auch den betriebs-

zeitabhängigen Wartungsaufwand. Da in den Systemen in der Regel nur für die Klimatisierung bewegliche Teile verbaut sind, gibt es nahezu keinen mechanischen Verschleiß, was den Wartungsaufwand weiter reduziert. Diverse Speicherüberwachungsprogramme liefern Informationen über den Gesundheits- und Ladezustand der Systeme. Diese sind besonders relevant, da alle elektrochemischen Speicher einer Form der Selbstentladung unterliegen. Durch die Automatisierung der Überwachung entfällt die manuelle Prüfung. Einzig die Sichtprüfungen in Hinblick auf mögliche Korrosionsschäden sind regelmäßig durchzuführen. Resultierend ist der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand als minimal anzusehen.

- Personal- und Qualifikationsbedarf

Der Schulungsaufwand des Personals ist mit dem der konventionellen Systeme zu vergleichen. Für den Betrieb sollte eine elektrische Ausbildung und eine system-spezifische Einweisung erfolgen. Die Qualifikationsanforderungen beziehen sich dann vorrangig auf den Anschluss des Systems mit dem spezifischen Verknüpfungspunkt und nicht auf die Inbetriebnahme selbst. Da die Elektrofachkräfte auch im Einsatz die Systeme über entsprechende Informationsschnittstellen überwachen können und im Schadensfall ohnehin ein längerer Prozess eingeleitet werden muss, existiert im Vergleich zur konventionellen Notstromversorgung sogar ein reduzierter Personalbedarf (Kapitel 12.2: Experteninterview).

- Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen

Da die Betriebsstoffe nur die elektrische Ladung umfassen und weder Verschleißteile noch Zusatzstoffe benötigt werden, entfällt diese Betrachtung.

Ersatz-Teilsysteme hingegen sind von elementarer Bedeutung. Da die Wartung und die Behebung von Schäden in der Regel nicht durch die Endnutzenden erfolgen können, ist ein bereits bei der Beschaffung durchdachtes Konzept für diese Szenarien zu vereinbaren. Dazu müssen die Verantwortlichkeiten für die Schadensbehebung und die Wartungen mit Fokus auf die Reaktionszeiten geklärt sein. Ebenso müssen statistisch störanfällige Systemkomponenten bevorratet werden. Die Vorhaltung aller Systemkomponenten über die komplette geplante Nutzungszeit ist ebenfalls von großer Bedeutung (Hettersheimer et al. 2017). Solange dies vorausschauend eingeplant wird, ist das Kriterium als gut zu werten.

- Genehmigungsaufwand

Obwohl die Rechtsprechung bereits Definitionen für elektrochemische Energiespeicher etabliert hat, gibt es noch keine konkrete Betrachtung für den Zweck der Notstromversorgung (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunika-

tion, Post und Eisenbahnen 2021). Es ist lediglich festgelegt, dass alle ortsfesten Stromspeicher registriert werden müssen (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen 2019). Dabei ist sowohl der stationäre als auch der in der Bereitstellungsphase netzintegrierte mobile Anwendungsfall eingeschlossen. Allgemein sind für den Netzanschluss die

- VDE-AR-N 4110:2018-11 und die
- VDE-AR-N 4105

ausschlaggebend. Für die generelle Zulassung von Energiespeichersystemen sind folgende Normen relevant:

- UN 38.3 Sicherheitsanforderungen beim Transport von Lithiumbatterien
- IEC 62619 Akkumulatoren und Batterien mit alkalischen oder anderen nicht säurehaltigen Elektrolyten – Sicherheitsanforderungen für Lithium-Akkumulatoren
- VDE AR 2510-50 stationäre Energiespeichersysteme mit Lithium-Batterien – Sicherheitsanforderungen
- Penetrationstests für die IT-Sicherheit des gesamten Systems inklusive Wechselrichter
- IEC 62485-5 stationäre (Li-Ion) Sekundärbatterien und Batteriesysteme bis 1,5 kV DC
- VDE-AR-E 2510-2 stationäre elektrische Energiespeichersysteme vorgesehen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz
- IEC 62133-2 Strom; Sekundärzellen und Batterien mit alkalischen oder anderen nichtsäurehaltigen Elektrolyten – Sicherheitsanforderungen für tragbare gasdichte Akkumulatoren und daraus hergestellte Batterien für den mobilen Einsatz – Teil 2: Lithiumsysteme
- IEC 62620 Akkumulatoren und Batterien mit alkalischen oder anderen nichtsäurehaltigen Elektrolyten – Lithium-Batterien und Batterien für industrielle Anwendungen (TÜV Rheinland 2021)

Da diese jedoch nur für die Markteinführung vom Hersteller durchgeführt werden müssen, ist dies im Anwendungsbereich nur von sekundärer Bedeutung. Für die Straßenzulassung sind weiterführende Regularien relevant. Durch die breite Verfügbarkeit und hohe Marktdurchdringung besteht relativ wenig Genehmigungsaufwand.

8.7.4 Sicherheitsanforderung

- IT-Bedarf

In großen elektrochemischen Speichersystemen sind Steuerungsprogramme zur Überwachung der Systemkomponenten und Ladezustände, zur Regelung der Peripherie und der Wechselrichter und gegebenenfalls zur Kommunikation verbaut. Dementsprechend sind Sicherheitsstandards gemäß der eingeführten Kategorie 2, nicht vernetzte IT, oder 3, vernetzte IT, zu berücksichtigen. Die IT-Sicherheit ist besonders bedeutend, da nicht nur die Unterbrechung der Notstromversorgung, sondern auch die Systemstabilität gefährdet werden kann. Ein Ausfall der Kühlsysteme kann z. B. zum Überschreiten der zulässigen Temperaturbereiche und zur Beschädigung oder Zerstörung des Systems führen. Das Kriterium ist somit von erheblicher Bedeutung.

- Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung

Die Anlagensicherheit wird maßgeblich über den zulässigen Betriebsbereich der Speicherzellen definiert. Dieser hängt sowohl von den äußeren Umwelteinflüssen als auch von der Funktionalität des Systems ab. Aufgrund der hohen Energiedichte und der großen Kapazität hätte ein kritischer Systemfehler schwere Konsequenzen. Der „thermal runaway“ kann durch physische Schäden und durch systembedingte Störungen eingeleitet werden. Die Einhaltung von Sicherheitsbereichen ist essentiell.

Die Lärmbelastung entsteht nur durch die Ventilatoren der Kühlanlage, sie ist vergleichsweise gering.

Technologieabhängig sind Gefahrenstoffe in den Zellen verbaut, die besonders in empfindlichen Umweltregionen bei Systemfehlern zu erheblichen Schäden führen können. Dagegen müssen redundante Sicherheiten eingeplant werden.

- Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus

Dadurch, dass es sich bei beiden Anwendungsfällen um in der Regel abgeschlossene Systeme handelt und so kein direkter Zugriff besteht, müssen unerlaubte Zugriffe nicht betrachtet werden. Mit der Ausnahme der Belüftungsöffnungen sind keine strukturellen Schwachstellen vorhanden. Da die Konsequenzen eines erfolgreichen Sabotageversuches aufgrund der Anfälligkeit der Speicherzellen ggf. gravierend sein können, ist das Kriterium in jedem Fall hoch zu bewerten.

8.7.5 Marktorientierte Anforderungen

- Investitionskosten

Die Investitionskosten setzen sich aus den Zellkosten, der modularen Verbindung, dem Wechselrichter, der Steuerung, den Sicherheitssystemen, Kommunikationssystemen und weiterer Peripherie zusammen. Da sowohl die Technologien als auch die konkrete Systemumsetzung den Gesamtpreis stark beeinflussen, kann lediglich eine grobe Kosteneinordnung stattfinden. Während die Zellen selbst oft spezifisch auf ihre Energiekapazität bepreist werden, gibt es andere Komponenten, wie zum Beispiel Wechselrichter, Trägerkomponenten und Peripherie, die entweder spezifisch in Wattstunden oder nur absolut bepreist eingeordnet werden können. Aktuell liegt der zusammengefasste Preis elektrochemischer Energiespeicher zwischen 100 und 1500 €/kWh, also für den mobilen Anwendungsfall zwischen 1 und 12 Millionen Euro. Dieser Preis wird prognostiziert bis 2030 auf 90 bis 500 €/kWh, also 0,7 bis 4 Millionen Euro fallen (Hettersheimer et al. 2017, International Renewable Energy Agency 2017). Für Großanlagen bis 100 MW und 1 GWh macht der relative Kostenblock der Zellen 40 % der Gesamtkosten aus, für kleinere Systeme verschiebt sich die Kostenverteilung (Mongird et al. 2020). Die Kosten werden sich durch den Einbau in ein mobiles System etwas erhöhen.

Ein stationäres netzintegriertes Energiespeicherprojekt mit 2 MW Leistung und 8 MWh Speicherkapazität wurde in Australien für ca. 13 Millionen Euro gebaut (Caroll 2020).

Die Investitionskosten sind sowohl aktuell als auch zukünftig als sehr hoch einzuschätzen.

- Operative Kosten

Alle operativen Kostenpositionen sind gegenüber den Investitionskosten und deren Abschreibungen zu vernachlässigen. Arbeitsstunden, Verwaltungskosten und Stromkosten ordnen sich anwendungsunabhängig um Größenordnungen dem initialen Kapitalaufwand unter.

Pauschalisiert wird geschätzt, dass pro Jahr die Betriebskosten von netzintegrierten Speichersystemen in einer Höhe von 7 bis 14 €/kW, insgesamt also zwischen 500 und 1.000 €, liegen (Mongird et al. 2020). Auch wenn diese pauschale Schätzung ungenau ist, verdeutlicht sie die verschwindend geringe Bedeutung der operativen Kosten im Vergleich zur Investition.

Die operativen Kosten sind als gering zu bewerten.

In diesem Kapitel werden die vorab bewerteten Technologien vergleichend und anwendungsfallunabhängig in Tabelle 9 gegenübergestellt.

Während alle Technologien, zumindest in einer ihrer Variationen, die geforderten Mindestkriterien an die Leistungsbereitstellung, Transportierbarkeit und Mindestbereitstellungszeiträume erfüllen können, gibt es dennoch gravierende Unterschiede zwischen ihnen.

Die Energieträgerverfügbarkeit unterscheidet zwischen primärenergienutzenden Technologien, z. B. PV, Wasserkraft und WEA sowie denen, die bereits verarbeitete Energieträger wie Wasserstoff, Bio-Methan oder Diesel verwenden. Situationsunabhängig und planbar Energieträger bevorraten zu können, wird hier sehr positiv gewertet. Aufgrund der hohen Arbeitshöhe der mobilen Windkraft-Technologie sind zwar nicht konstante, jedoch statistisch minimale hinreichende Windgeschwindigkeiten vorhanden. Damit schneidet die Technologie etwas besser als die stationäre Variante ab, die aufgrund der niedrigeren Arbeitshöhen größeren Schwankungen unterliegt. Die nicht planbaren Mindesteinstrahlungszeiten sind Grundlage für die sehr schlechte Bewertung von PV-Technologien. Obwohl Wasserkraft die einzige verlässliche und planbare erneuerbare Energieform nutzt, wurde diese trotzdem aufgrund der maßgeblich geografischen Restriktion mit der schlechtesten Wertung versehen.

Wegen dieser Planbarkeit benötigen Wasserkraft-Technologien keine wesentlichen Energiespeicher, weshalb die Kriterien „Energiespeicherkapazität“ und „Komplexität des Energiespeichers“ nicht bewertet wurden.

Die physischen Ausmaße, volumetrisch und gravimetrisch, sind hauptsächlich aufgrund der Speicherdichten bei allen alternativen Technologien wesentliche größer. Besonderer Ausreißer ist hier wiederum die stationäre Wasserkraft-Technologie. Der Anlagen- und ggf. Staubedarf übertrifft bereits bei kleinen Anlagen die anderen Technologien wesentlich. Sowohl WEA als auch PV-Anlagen haben große Flächen- und Raumbedarfe und werden somit ebenfalls sehr schlecht bewertet.

Alle Technologien, die einen elektrochemischen Speicher vorsehen, haben das Potential sehr kurzer Anlaufzeiten. Sie sind deshalb energiewandlerunabhängig

außergewöhnlich gut bewertet. Da diese Batterien für die gesamte geforderte Laufzeit ausgelegt werden sollten, weil ein klassisches Nachbetanken nicht möglich, ein Austausch nicht vorgesehen und eine Fernüberwachung empfehlenswert ist, benötigt diese Technologie keine Versorgung im laufenden Betrieb.

Alle Arbeiten mit Wasserkraft-Technologien erfordern speziell qualifiziertes Personal, z. B. für die Installation von mobilen Lösungen mit einem Kran oder die Betriebsführung von großen stationären Anlagen. Das wurde im Vergleich außergewöhnlich negativ bewertet.

In Genehmigungsaspekten wurden besonders neue Systeme schlecht bewertet, da es hier zu langen und aufwendigen Verfahren für die Zulassung kommen kann.

Die zurückhaltende Bewertung im Bereich der IT ist durch die Abwägung zwischen notwendigem Bedarf an IT und der üblichen Praxis bzw. der zweckmäßigen Einbindung entstanden. Während vernetzte und fernsteuerbare Systeme fast immer möglich sind und auch diverse Vorteile bieten können, ist ein Auslegen von Systemen ohne Schnittstellen nahezu genauso gut möglich, wodurch sich die Sicherheit erhöht. Bei elektrochemischen Speichern ist die Ferndiagnostik und damit die vernetzte Einbindung von IT gängige Praxis.

Die besonders schlechten Bewertungen im Bereich der „Anlagen und Gefährdungsbetrachtung“ lassen sich auf die verwendeten Gefahrenstoffe und deren Zerstörungspotential zurückführen. Einzig der Bruch einer Stauanlage wurde schwerwiegender eingestuft.

Schlussendlich lassen die Investitionskosten als primäre zusätzliche Anschaffungshürde eine wesentliche Differenzierung zwischen den Technologien zu und sind der maßgebliche Hinderungsgrund für die zeitnahe Durchsetzung der grünen alternativen Technologien im Bereich der Notstromversorgung. Dadurch, dass die Investitionsbeträge der Technologien, hauptsächlich aufgrund des hohen Speicherbedarfs, sich um Größenordnungen von denen der konventionellen Technologien unterscheiden, ist eine direkte Nutzung dieser Technologien für den alleinigen Verwendungszweck der Notstromversorgung wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen.

Zusätzlich zu den betrachteten Kriterien muss vor der Anschaffung eines konkreten Systems eine ökologische Betrachtung stattfinden. Sowohl bei einem möglichen Austausch bestehender Systeme als auch bei einer Neuanschaffung müssen ökologische Kosten in Form von CO₂-Äquivalenten für das System und den Betrieb errechnet und verglichen werden. Aufgrund der anwendungsfallspezifischen geringen Nutzungsdauern ist es denkbar, dass der Verbrauch von fossilen Energieträgern keinen maßgeblichen Beitrag im Vergleich zu den Produktionskosten

ausmacht. Bei dem alleinigen Verwendungszweck als Notstromsystem ist somit nicht offensichtlich und eindeutig gegeben, dass alternative Systeme eine bessere CO₂-Bilanz aufweisen als konventionelle.

Besonders aufgrund der erheblichen ökonomischen und ökologischen Nachteile wurden in Kapitel 10 Strategien zur verbesserten Nutzung und zur optimierten Integration von alternativen Notstromsystemen zusammengetragen. Diese dienen dazu, technische und technologiebedingte Schwächen zu kompensieren und die Anschaffung wirtschaftlich attraktiver zu gestalten.

Tabelle 9: Bewertung der Technologien anhand der erarbeiteten Kriterien
(+++ außergewöhnlich gut, --- außergewöhnlich schlecht)

	Diesel	Biomasse BHKW	BZ	PV + Batterie
Energetische Anforderungen				
Leistungsbereitstellung	+++	+++	+++	+++
Regel- und Skalierbarkeit	+	o	++	+++
Energieträger-Verfügbarkeit	+++	+++	+++	--
Energiespeicherkapazität	+++	o	+	o
Wirkungsgrad	+	+	o	+
Technische Anforderungen				
Größe und Gewicht	+++	o	o	--
Notwendige konstruktive Anlagenstruktur	++	-	o	--
Komplexität des Energiespeichers	++	--	--	--
Anlaufzeit	++	---	++	+++
Robustheit	+++	o	o	--
Organisatorische Anforderungen				
Transport und Aufbau	++	+	+	-
Versorgung im laufenden Betrieb	++	o	o	+++
Instandhaltungsaufwand	o	--	o	o
Personal- und Qualifikationsbedarf	o	o	o	--
Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen	+++	++	+	+
Genehmigungsaufwand	++	o	o	o
Sicherheitsanforderungen				
IT-Bedarf	+	+	+	-
Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung	o	--	--	--
Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus	++	++	++	--
Marktorientierte Anforderungen				
Investitionskosten	+++	o	-	---
Operative Kosten	+	+	o	o

	Wasser- kraft (mobil)	Wasser- kraft (stationär)	WEA + Bat. (mobil)	WEA + Bat. (stationär)	Batterie
Energetische Anforderungen					
Leistungsbereitstellung	+++	+++	+++	+++	+++
Regel- und Skalierbarkeit	++	++	+	o	+++
Energieträger-Verfügbarkeit	---	---	-	--	+++
Energiespeicherkapazität	n.b.	n.b.	o	o	o
Wirkungsgrad	+	++	+	+	+++
Technische Anforderungen					
Größe und Gewicht	--	---	--	--	+
Notwendige konstruktive Anlagen- struktur	-	---	+	--	+
Komplexität des Energiespeichers	n.b.	n.b.	--	--	--
Anlaufzeit	+	---	+++	+++	+++
Robustheit	--	++	-	-	-
Organisatorische Anforderungen					
Transport und Aufbau	-	---	+	--	+
Versorgung im laufenden Betrieb	+++	+++	+++	+++	+++
Instandhaltungsaufwand	-	---	o	-	++
Personal- und Qualifikationsbedarf	---	---	o	-	+
Beschaffungsaufwand von Ersatz- teilen und Betriebsstoffen	--	--	--	o	+
Genehmigungsaufwand	--	---	--	--	+
Sicherheitsanforderungen					
IT-Bedarf	o	o	-	-	-
Anlagensicherheit und Gefähr- dungsbetrachtung	++	---	--	--	--
Resistenz gegenüber Sabotage und Vandalismus	+	++	-	+	++
Marktorientierte Anforderungen					
Investitionskosten	-	--	--	--	---
Operative Kosten	++	---	++	-	++

Anwendungsfallbezogene Zusammenfassung

9



Die abschließende Zusammenfassung kontextualisiert die Technologiebewertungen, indem sie die Relevanz der einzelnen Kriterien in Bezug auf den jeweiligen Anwendungsfall mit den Gewichtungen überlagert und in Tabelle 11 und Tabelle 12 darstellt. Dadurch kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie bedeutend die Eignung einer Technologie im jeweiligen Kriterium für einen Anwendungsfall ist und wie Vor- und Nachteile von Technologien anwendungsspezifisch einzuordnen sind.

Die Abgrenzung und Gewichtung der insgesamt 21 Kriterien für zwei Anwendungsfälle erfolgte durch Experteninterviews und Recherchearbeit. Kapitel 7 stellt die methodische Herangehensweise, die Definition der Kriterien, deren Abgrenzung, die Bewertungsskala, deren Bezug zu den Anwendungsfällen und abschließend eine vergleichende Übersicht ihrer Bedeutung dar. Die Grundlage für die Bewertungen waren intensive Recherchearbeiten und eine vergleichende Marktanalyse von diversen Technologien, Technologievariationen und Systemen. Kapitel 8.8 liefert eine umfassende Darstellung. Vorausgehend wurde dafür jede betrachtete Technologie in jedem Kriterium einzeln bewertet, wobei auf Eignung, Kennzahlen und Besonderheiten eingegangen wurde.

Die nun folgende gewichtete Bewertung wurde gem. dem Bewertungsschema in Tabelle 10 durchgeführt. Hierbei bildet die Bewertung einen Startpunkt, der je nach Gewichtung entweder hervorgehoben oder abgeschwächt wird. So ist sichergestellt, dass die Bewertungstendenz, also die Eignung einer Technologie, erhalten bleibt. Negative und positive Bewertungen bleiben so tendenziell negativ bzw. positiv und werden ggf. nur bei starken Gewichtungen neutral. Resultierend können Stärken, von „+++“ bis „+“, und Schwächen, von „---“ bis „-“, differenziert werden.

Die Technologie zur Nutzung von Wasserkraft für den stationären Anwendungsfall wird für die folgenden Übersichten aufgrund der fehlenden Eignung vernachlässigt.

Tabelle 10: Verrechnungsmatrix zur Erstellung der gewichteten Bewertungen für die Anwendungsszenarien

		Bewertung						
		+++	++	+	0	-	--	---
Gewichtung	+++	+++	+++	++	0	--	---	---
	++	++	++	+	0	-	--	--
	+	++	+	+	0	-	-	--
	0	++	+	+	0	-	-	--
	-	+	+	0	0	0	-	-
	--	+	0	0	0	0	0	-
	---	0	0	0	0	0	0	0

Die gewichtete Bewertung des in Kapitel 4.1 beschriebenen mobilen Anwendungsszenarios ist in Tabelle 11 zusammengefasst. Die Anwendung der Gewichtung hebt vor allem den Unterschied besonders relevanter Kategorien hervor und erlaubt eine ganzheitliche und anwendungsfallbezogene Bewertung.

Im Hinblick auf das Kriterium „Energieträger-Verfügbarkeit“ zeigt sich ein markanter Unterschied zwischen Technologien, die auf Primärenergieträgern basieren, wie beispielsweise Solar- oder Windenergie, und jenen, die verarbeitete Energieträger wie Diesel oder Wasserstoff verwenden. Diese Differenz wird insbesondere durch die Bewertungsausprägungen ‚sehr schlecht‘ bis ‚außergewöhnlich schlecht‘ für auf Primärenergieträgern basierende Technologien und ‚außergewöhnlich gut‘ für Technologien, die verarbeitete Energieträger nutzen, verdeutlicht. Hauptgrund für diese Bewertung ist, dass das Anwendungsszenario eine ununterbrochene bzw. ständige Leistungsbereitstellung erfordert. Diese konstante Nachfrage kann durch die fluktuierende Energieerzeugung entweder niemals garantiert oder gegebenenfalls nur mit erheblich überdimensionierten Kapazitäten erfüllt werden.

Die Kriterien „Robustheit“, „Energiespeicherkapazität“ und „Größe und Gewicht“ sind für das mobile Anwendungsszenario höher gewichtet und zeigen ebenfalls einen deutlichen Unterschied, diesmal explizit zwischen konventionellen Generatoren und allen anderen Technologien. Die inhärenten Vorteile der relativ kompakten Bauweise von Dieselgeneratoren und die hohe Energiedichte des Brennstoffs wiegen durch die Notwendigkeit zur Transportfähigkeit besonders schwer. Dadurch werden diverse weitere organisatorische, marktorientierte und Sicherheitsanforderungen beeinflusst. Beispielsweise sind die Art und Komplexität von Transportmitteln, die systemgebundene Materialmenge und die damit verbundenen Investitionskosten und die Dimensionen des aufgebauten Systems und damit die Anfälligkeit gegen Sabotage bzw. Störungen direkt betroffen.

Zusammenfassend haben die differenzierten Untersuchungen ergeben, dass konventionelle Generatoren, gemessen an dem hier definierten Anwendungsszenario der mobilen Notstromversorgung, am besten zu bewertet sind. Gleichzeitig stellen Batteriesysteme in vielen Anforderungsdimensionen vergleichbare oder sogar bessere Lösungen dar. Sie sind aufgrund des enormen Unterschieds in den Investitionskosten jedoch keine reale Alternative zur Verwendung als reine Notstrom-

systeme. Alle übrigen Technologien zeigen im Vergleich zu diesen beiden Ansätzen deutliche Defizite.

Der hier angewendete Bewertungsmaßstab bezieht sich auf konkrete Systeme und isolierte Anwendungsszenarien. Kapitel 10 beschreibt weiterführende beispielhafte Konzepte für die Integration von grünen Notstromsystemen.

Tabelle 11: Gewichtete Bewertung der Technologien bezogen auf das mobile Anwendungsszenario

	Diesel	Biomasse BHKW	BZ	PV + Batterie	Wasserkraft (mobil)	WEA + Bat. (mobil)	Batterie
Energetische Anforderungen							
Leistungsbereitstellung	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Regel- und Skalierbarkeit	++	o	+++	+++	+++	++	+++
Energieträger-Verfügbarkeit	+++	+++	+++	---	---	--	+++
Energiespeicherkapazität	++	o	+	o	n.b.	o	o
Wirkungsgrad	o	o	o	o	o	o	+
Technische Anforderungen							
Größe und Gewicht	+++	o	o	---	---	---	++
Notwendige konstruktive Anlagenstruktur	++	-	o	--	-	+	+
Komplexität des Energiespeichers	++	--	--	--	n.b.	--	--
Anlaufzeit	o	-	o	+	o	+	+
Robustheit	++	o	o	--	--	-	-
Organisatorische Anforderungen							
Transport und Aufbau	++	+	+	-	-	+	+
Versorgung im laufenden Betrieb	++	o	o	++	++	++	++
Instandhaltungsaufwand	o	-	o	o	-	o	+

	Diesel	Biomasse BHKW	BZ	PV + Batterie	Wasserkraft (mobil)	WEA + Bat. (mobil)	Batterie
Personal- und Qualifikations- bedarf	o	o	o	--	--	o	+
Beschaffungs- aufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen	++	++	+	+	--	--	+
Genehmigungs- aufwand	++	o	o	o	--	--	+
Sicherheitsanforderungen							
IT-Bedarf	+	+	+	-	o	-	-
Anlagensicher- heit und Gefährdungs- betrachtung	o	--	--	--	++	--	--
Resistenz gegen- über Sabotage und Vandalis- mus	++	++	++	--	+	-	++
Marktorientierte Anforderungen							
Investitions- kosten	++	o	-	--	-	--	--
Operative Kosten	o	o	o	o	+	+	+

Die gewichtete Bewertung des in Kapitel 4.2 beschriebenen stationären Anwendungsszenarios ist in Tabelle 12 zusammengefasst. Analog zu Kapitel 9.1 hebt die Anwendung der Gewichtung vor allem den Unterschied besonders relevanter Kategorien hervor und erlaubt eine ganzheitliche und anwendungsfallbezogene Bewertung.

Da in diesem Anwendungsfall die Transportfähigkeit als notwendige Eigenschaft entfällt, sind davon betroffene Anforderungen weniger schwer gewichtet. Die „Anlaufzeit“ hingegen kommt erst in diesem Anwendungsszenario zum Tragen. Da fest verbaute oder zumindest vor Ort befindliche Systeme keinen bzw. keinen wesentlichen Transportweg haben, kann die tatsächliche technologieabhängige Zeit bis zur Bereitstellung der Energie differenziert werden. Batteriesysteme sind am schnellsten und ggf. sogar unterbrechungsfrei einsatzbereit. Die gewichtete Bewertung erfolgte jedoch aufgrund der abgestuften Gewichtung in der gleichen Kategorie wie Dieselsysteme. Obwohl ein prinzipieller Vorteil von alternativen Technologien mit Batterien besteht, ist dieser im Gesamtkontext nicht entscheidend.

Aufgrund der Systemeinbindung mit Energiespeichern sind Technologien, die auf Primärenergieträgern basieren, in der Anforderung „Versorgungsaufwand im laufenden Betrieb“ am besten bewertet, da diese prinzipiell autonom laufen und ohne zusätzliche Betriebsstoffe auskommen können. Dieselgeneratoren haben aufgrund der allgemeinen Verfügbarkeit der Betriebsstoffe eine etwas abgeschwächte aber immer noch „sehr gute“ Bewertung erhalten. Ähnlich wie beim Kriterium der „Anlaufzeit“ sind die Technologien aufgrund der gewählten Gewichtung in der gewichteten Bewertungsübersicht gleichgesetzt. Andere Technologien wurden schlechter bewertet.

Auch für dieses Szenario kann zusammenfassend festgehalten werden, dass konventionelle Generatoren ganzheitlich am besten für den Anwendungsfall der stationären Notstromversorgung bewertet sind. Der herausgestellte Vorteil von Dieselgeneratoren ist jedoch kleiner als in der Bewertung des mobilen Szenarios. Hier können nicht nur alleinstehende Batteriesysteme, sondern auch alle weiteren betrachteten Technologien als technische, organisatorische und sicherheitsbezogene Konkurrenz angesehen werden. Jedoch bilden wiederum die Investitionskosten eine Hürde für die reale Nutzung von alternativen Technologien.

Tabelle 12: Gewichtete Bewertung der Technologien bezogen auf das stationäre Anwendungsszenario

	Diesel	Biomass BHKW	BZ	PV + Bat- terie	WEA + Bat. (stationär)	Batterie
Energetische Anforderungen						
Leistungsbereitstellung	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Regel- und Skalierbarkeit	+	o	++	++	o	++
Energieträger-Verfügbarkeit	++	++	++	--	--	++
Energiespeicherkapazität	++	o	+	o	o	o
Wirkungsgrad	o	o	o	o	o	+
Technische Anforderungen						
Größe und Gewicht	++	o	o	-	-	+
Notwendige konstruktive Anlagenstruktur	+	o	o	-	-	o
Komplexität des Energiespeichers	+	-	-	-	-	-
Anlaufzeit	++	--	++	++	++	++
Robustheit	+	o	o	-	o	o
Organisatorische Anforderungen						
Transport und Aufbau	o	o	o	o	o	o
Versorgung im laufenden Betrieb	+	o	o	++	++	++
Instandhaltungsaufwand	o	-	o	o	-	+
Personal- und Qualifikationsbedarf	o	o	o	-	-	+
Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen	++	++	+	+	o	+
Genehmigungsaufwand	+	o	o	o	-	+

	Diesel	Biomass BHKW	BZ	PV + Bat- terie	WEA + Bat. (stationär)	Batterie
Sicherheitsanforderungen						
IT-Bedarf	+	+	+	-	-	-
Anlagensicherheit und Gefähr- dungsbetrach- tung	o	-	-	-	-	-
Resistenz gegen- über Sabotage und Vandalismus	+	+	+	-	+	+
Marktorientierte Anforderungen						
Investitions- kosten	++	o	-	--	--	--
Operative Kosten	o	o	o	o	o	o

Technologieübergreifende
Ansätze zur Integration
nachhaltiger Notstromsysteme

10



Den Rahmen dieser Studie bildet die Betrachtung grüner Technologien zur Erzeugung von elektrischer Energie und deren Einsetzbarkeit als Notstromsystem in zwei vorgegebenen allgemeinen Szenarien. Um die Technologien und ihre Notstromtauglichkeit unter heutigen Bedingungen bewerten zu können, wurde ein insgesamt 21 Kriterien umfassender Bewertungsbogen erstellt.

Beim Umstieg auf grüne Technologien spielt die systemabhängige CO₂-Bilanz, welche in dieser Studie zum Vergleich der Technologien allerdings nicht bewertet wird, eine entscheidende Rolle. Neben der CO₂-Emission im Betrieb sollte vor allem bei reinen Notstromsystemen, welche, bezogen auf ihre Lebensdauer, in der Regel vergleichsweise kurze Nutzungsdauern aufweisen, die gesamte Umwelt- und CO₂-Bilanz betrachtet werden. Im Vergleich mit konventionellen Notstromgeneratoren muss daher immer zusätzlich geprüft werden, ob die initialen CO₂-Kosten von Speichern und Alternativtechnologien die der konventionellen nicht übersteigen.

Im folgenden Kapitel sollen Lösungsansätze diskutiert werden, welche nicht im Rahmen der Kriterien bewertet werden konnten.

Notstrom durch Sektorenkopplung

Das Ziel der Klimaneutralität hat längst dazu geführt, dass die Lösungen für das Energiesystem der Zukunft nicht mehr nur im Sektor Strom gesucht werden, sondern auch sektorübergreifende Energiesysteme mit in die Planung einfließen (Hamburg Marketing GmbH 2021).

Ein Ansatz zur Notstromversorgung könnte daher sein, beim Ausfall des elektrischen Netzes auf ein anderes Versorgungsnetz zu wechseln. Mögliche Ansätze bieten dabei Reallabor-Forschungsprojekte wie das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Projekt Integrierte Netzplanung für die drei Energieträger Strom, Gas und Wärme (iNeP), welches Methodiken untersucht, die einen gemeinsamen Netzausbau der Energiesektoren ermöglichen (Schulz und Vorwerk 2021). Denkbar wären auch Brennstoffzellensysteme, die den im Gasnetz eingespeisten Wasserstoff nutzen und in elektrische Energie umwandeln. Eine Herausforderung stellt die Umwandlung von Wärmeenergie aus beispielsweise

Fernwärmenetzen in elektrische Energie dar, aber auch Systeme zur Nutzung des Gasnetzes zur Notstromversorgung sind noch nicht ausreichend vorhanden. Eine umgekehrte Substituierung von Wärme- und Gasnetz mit elektrischer Energie ist deutlich einfacher umzusetzen.

Angemerkt werden sollte an dieser Stelle auch, dass eine solche Lösung nur bedingt eine grüne Alternative zu herkömmlichen Dieselgeneratoren darstellen kann. Voraussetzung wäre ein entsprechend hoher Anteil an Biomethan und grünem Wasserstoff im Gasnetz. Zusätzlich wäre die Verfügbarkeit der anderen Netze auch nur beschränkt zuverlässig. Denkbar wäre dies im Falle eines Stromausfalls aufgrund von Netzüberlastung, aber nicht aufgrund von physischer Zerstörung in Folge eines Hochwassers oder Erdbebens.

Bestehende Praxis grüner gestalten

Aktuell wird die Notstromversorgung fast ausschließlich durch Dieselgeneratoren bereitgestellt. Um diese bei größeren Lastschwankungen oder bei sehr niedrigen Lasten im Dauerbetrieb frequenzstabiler nutzen zu können, werden sogenannte Grundlasten eingesetzt. Dabei handelt es sich in der Regel um Heizwiderstände, die über den Generator erzeugte elektrische Energie in Wärme umwandeln, welche in der Regel nicht weiter genutzt wird (Kapitel 12.2: Experteninterview). Ein kurzfristig umsetzbarer Schritt zur grüneren Gestaltung der bisherigen Praxis mobiler Notstromversorgung könnte der Einsatz von beispielsweise Batteriespeichern oder Elektrolyseuren zur Grundlastenergieerzeugung sein. Dadurch wäre es möglich, einen Teil der Energie wieder nutzbar zu machen und so den Gesamtwirkungsgrad des Notstromsystems zu erhöhen. Zusätzlich könnten Versorgungsmanagementkonzepte erarbeitet werden, welche z. B. den Einsatz dieser deutlich leiseren und abgaslosen Systeme bei Nacht vorsehen. Dies würde allerdings noch keine wirkliche grüne Notstromalternative darstellen.

Nutzung alternativer Kraftstoffe

Power-to-X bezeichnet Verfahren und Technologien zur Speicherung und Nutzung von überschüssiger erneuerbarer elektrischer Energie in chemischen Energieträgern, Kraftstoffen oder Rohstoffen zur Nutzung in der Chemie oder auch zur Wärmeerzeugung. Unterteilt werden diese Technologien nach ihrem Verwendungszweck bzw. ihrer Energieform (TÜV Süd 2021d). Ein Ansatz zur nachhaltigen Umgestaltung der Notstromversorgung bieten daher Power-to-Liquid-Technologien (PtL/P2L). Power-to-Liquid bezeichnet die Nutzung der erneuerbaren elektrischen Energie zur Herstellung von flüssigem Kraftstoff. Der Prozess sieht vor, aus erneuerbarem Strom mittels Elektrolyse grünen Wasserstoff herzustellen und diesen anschließend mit CO_2 umzusetzen. Dadurch erhält man dann flüssigen

Kohlenwasserstoff (TÜV Süd 2021d). Um daraus synthetischen Diesel herzustellen, werden aus dem Kohlenwasserstoff ein Synthesegas und daraus wiederum über die Fischer-Tropsch-Synthese längerkettige, flüssige Diesel-ähnliche Kohlenwasserstoffe synthetisiert. Auch aus Biomasse kann synthetischer Diesel gewonnen werden (Shell Deutschland GmbH 2018, 2021).

Ein Umstieg auf synthetischen Dieseldieselkraftstoff (E-Fuel) würde es ermöglichen, die bekannten und etablierten Notstromsysteme weitestgehend zu behalten. Dazu müssten die Eigenschaften der E-Fuels allerdings den Normen für Diesel entsprechen. Es existiert auch bereits eine Extra-Norm für E-Fuels, die EN 15940. Aufgrund der teuren Herstellung und fehlender Industrieanlagen fand eine breite Markteinführung allerdings noch nicht statt (ADAC 2021).

Nachteile der Technologie neben der aktuellen Verfügbarkeit sind allerdings ein noch sehr niedriger Gesamtwirkungsgrad von ca. 15 %, bedingt durch die vielen einzelnen Herstellungsschritte und die zunächst, im Vergleich zum herkömmlichen Diesel, höheren Kosten. Aktuell würde der synthetische Diesel pro Liter in der Herstellung ca. 4,50 € kosten. Prognosen sagen für 2030 einen Preis von 2,29 € inkl. Steuern als möglich voraus (ADAC 2021).

Nutzung von bestehenden mobilen Energiespeichern

Die Energiewende in Deutschland ist auch eine Mobilitätswende. Ein Aspekt der Mobilitätswende ist der Umstieg von Verbrennungsmotoren auf Elektrofahrzeuge. Der Anteil der Elektroautos in Deutschland stieg in den letzten Jahren kontinuierlich an. 2021 lag er bei circa 1,22 %. Bei den Neuzulassungen machen Elektroautos sogar 6,7 bis 6,9 % aus. Prognosen nach könnte der Anteil der Elektroautos bis 2025 bereits 11,1 % und 2030 bereits 24,4 % betragen (Statista 2021b). Auch der öffentliche Bereich stellt auf Elektromobilität um. Die Hamburger Hochbahn AG bestellt seit 2020 nur noch Elektrofahrzeuge. Bis 2030 soll die gesamte 1.100 Busse umfassende Flotte auf E-Fahrzeuge umgerüstet sein (Hamburger Hochbahn AG 2021).

All diese Fahrzeuge in teilöffentlicher Hand stellen potentielle Speicher dar, welche auch für den Fall der Notstromversorgung eingesetzt werden könnten. Die Speicherkapazität eines Busses kann um 500 kWh betragen (Man 2021). Damit wäre eine Versorgung des beschriebenen mobilen Szenarios für eine Zeit von bis zu sieben Stunden möglich.

Dabei muss allerdings immer abgewogen werden, dass auch der öffentliche Verkehr und damit Busse zur kritischen Infrastruktur gezählt werden. Es ist Aufgabe der öffentlichen Verkehrsbetriebe, im Notfall die Evakuierung der Bevölkerung sicherzustellen. Nichtsdestotrotz sollte eine Betrachtung stattfinden, die den Einsatz

von Elektrobussen auch als fahrende Speicher für den Notstromfall mitberücksichtigt. Der tatsächliche Einsatz kann dann im Einzelfall abgewogen werden.

Der tatsächliche Notstromfall tritt vergleichsweise selten ein (Kapitel 12.2 und 12.4: Experteninterview). Die Kosten der Anschaffung eines Notstromsystems sind aber mitunter sehr hoch. Durch die ganzheitliche Betrachtung beider Anforderungen können daher Synergieeffekte geschaffen werden. Beispielsweise kann die Anschaffung zusätzlicher Busse durch den Auftrag der Notstromversorgung gerechtfertigt werden.

Synergieeffekte können auch für die Verkehrsunternehmen entstehen, da durch die duale Nutzung der Busse im Rahmen der Notstromversorgung zusätzliche Buskapazitäten gerechtfertigt werden können. Da diese Transportmittel im Bedarfsfall ohnehin für Evakuierungen eingesetzt werden, bestehen bereits Kommunikationswege und Handlungsanweisungen, die lediglich um diesen Aspekt erweitert werden müssten.

Netzintegration von Energiewandlern, Speichern und Verbundsystemen zur stationären Notstromversorgung

Durch die Integration von „Notstromanlagen“ zu Insel- und Verbundnetzen ergeben sich neue Möglichkeiten in der Versorgungsplanung stationärer elektrischer Anlagen und Synergieeffekte können genutzt werden.

Wenn erneuerbare Notstromanlagen netzparallel betrieben werden, können diese wie generische Erzeuger unter gewissen Voraussetzungen während ihrer Bereitstellungsphase Energie einspeisen. Grundlage für das europäische Verbundnetz sind diverse Richtlinien und Gesetze auf europäischer, deutscher und lokal auf der Netzbetreiberebene. Für Inselnetze gibt es gesonderte Richtlinien (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. 2019, 2021b) sowie die Verordnung über die Netzzugangsbedingungen für den grenzüberschreitenden Stromhandel und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1228/2003.

Werden zusätzlich zum reinen Erzeugersystem noch Speicher netzintegriert, können weiterführende Systemdienstleistungen in der Bereitstellungsphase wahrgenommen werden. Dazu gehören u. a. die aktive Regelbarkeit, die Bereitstellung von Regelreserven und die Frequenz- und Spannungsstütze. Teile dieser Bereitstellungen werden ebenfalls vergütet. Jeder Entladevorgang muss so abgestimmt sein, dass eine vorher definierte Kapazitätsuntergrenze, die für den eigentlichen Zweck der Notstromversorgung gedacht ist, nicht unterschritten wird.

Sowohl Erzeuger als auch Speicher können so zusätzliche Einnahmen generieren, stillstandbedingten Verschleiß minimieren und zur Verbesserung der Netzqualität beitragen. Damit einher gehen jedoch erhöhte Betriebsstunden, welche wiederum verbrauchsabhängige Kosten verursachen. Dazu können zum Beispiel kürzere Wartungsintervalle oder beschleunigte Abnutzung und Degeneration gehören. Eine ganzheitliche ökonomische Betrachtung sollte im Einzelfall durchgeführt werden.

Die Netzkopplung einer Notstromanlage ist anwendungsfallunabhängig möglich, da der Lager- bzw. Verwahrort in der Bereitstellungsphase netzgekoppelt sein kann. Da die ökonomischen und netzdienlichen Funktionen während der Einsatzphase ohnehin nicht genutzt werden können, ist diese Phase für den Aspekt der Netzintegration nicht zu betrachten.

Literaturverzeichnis

11



2G Energy AG (Hrsg.) (2021): Leistungsstarke Blockheizkraftwerke. Abrufbar unter: <https://2-g.com/de/produkte>, abgerufen am: 01.10.2021.

42technology AG (Hrsg.) (2021): Notstrom, Notstromversorgung, BHKW und SCADA, Notstromaggregat. Abrufbar unter: <https://42technology.ch/de/>, abgerufen am: 08.10.2021.

Acciona (Hrsg.) (2021): Acciona installs a mobile photovoltaic unit in Chile as a sustainable energy source to construct the New Prison in Talca. Abrufbar unter: <https://www.acciona.com/updates/articles/acciona-installs-mobile-photovoltaic-unit-chile-sustainable-energy-source-construct-new-prison-talca/>, abgerufen am: 02.05.2023.

ADAC (Hrsg.) (2021): Synthetische Kraftstoffe – Energieträger der Zukunft? Abrufbar unter: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>, abgerufen am: 01.10.2021.

Ademax Deutschland GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2021): Stromaggregate – Gas-Stromerzeuger. Abrufbar unter: <https://ademax-strom.de/STROMAGGREGATE/Gas-Stromerzeuger/>, abgerufen am: 19.10.2021.

Anondi GmbH (Hrsg.) (2021a): BHKW Kosten – Kosten für ein Blockheizkraftwerk. Abrufbar unter: <https://www.heizsparer.de/heizung/heizungssysteme/bhkw/bhkw-kosten>, abgerufen am: 01.10.2021.

Anondi GmbH (Hrsg.) (2021b): Photovoltaik Wartung: Photovoltaik – Was darf die Wartung einer PV-Anlage kosten? Abrufbar unter: <https://www.solaranlage-ratgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-wartung/photovoltaik-wartung-kosten>, abgerufen am: 29.10.2021.

Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland – Arbeitskreis Grundsatzfragen (Hrsg.) (2008): Wasserstoff und dessen Gefahren – Ein Leitfaden für Feuerwehren. Abrufbar unter: https://www.fwvbw.de/fileadmin/Downloads/Einsatz_Wasserstoffleitfaden.pdf, abgerufen am: 02.05.2023.

- Aull M., Stough, A., und Cohen, K. (2020):** Design Optimization and Sizing for Fly-Gen Airborne Wind Energy Systems. In: Automation, Band 1, Heft 1. S. 1–16.
- Ausschuss für Gefahrstoffe – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.) (2019):** Technische Regeln für Gefahrstoffe – Abgase von Dieselmotoren – TRGS 554. Abrufbar unter: https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-554.pdf?__blob=publicationFile, abgerufen am: 02.05.2023.
- Bartels, W., Flügel, T., Haubner, T., Pfütsch, M., Roth, H., Sommer, R. und Weidemann, W. (2004):** Notstromaggregate – Richtlinie für Planung, Errichtung und Betrieb von Anlagen mit Notstromaggregaten. 5. Auflage. Berlin: Verband der Netzbetreiber.
- Battelle Memorial Institute (Hrsg.) (2017):** Manufacturing Cost Analysis of 100 and 250 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications. Abrufbar unter: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/02/f49/fcto_battelle_mfg_cost_analysis_100_250kw_pp_chp_fc_systems_jan2017.pdf, abgerufen am: 02.05.2023.
- BBC News (Hrsg.) (2006):** Burst dam destroys Nigeria homes. Abrufbar unter: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/africa/5396176.stm>, abgerufen am: 02.05.2023.
- Berufsbildungswerk Gemeinnützige Bildungseinrichtung des DGB GmbH (Hrsg.) (2021):** Weiterbildung Servicemonteur/-in für Windenergieanlagen (HWK) Bremerhaven. Abrufbar unter: <https://www.bfw.de/angebot/weiterbildung/bremerhaven/servicemonteur-in-hwk-fuer-windenergieanlagen-hwk-offshore/>, abgerufen am: 12.10.2021.
- Blum, J. und Sofic, D. (2015):** Notstromversorgung in Krankenhäusern und Rechenzentren. Abrufbar unter: https://www.eab-rhein-main.de/media/de-das-elektrohandwerk-auszug_de_18_152_28-31.pdf, abgerufen am: 25.04.2023.
- Bormann, A. (2021):** Enerkäte – Produkte. Abrufbar unter: <https://www.enerkate.de/produkte.html>, abgerufen am: 18.08.2021.
- Bormann, R., Rehfeldt, K. und Kruse, D. (2020):** Volllaststunden von Windenergieanlagen an Land – Entwicklung, Einflüsse, Auswirkungen. Abrufbar unter: <https://www.lee-nrw.de/data/documents/2020/11/23/532-5fbb61e5e6bb2.pdf>, abgerufen am: 25.04.2023.

Breiting, A. und Knosala, R. (1997): Bewerten technischer Systeme – Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen. Berlin, Heidelberg: Springer.

BSE USV-Technik GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2021): GEKO BL60000 ED-S/KEDA RSS: Datenblatt. Abrufbar unter: https://www.bse-usv-technik.de/epages/63415186.sf/?Locale=de_DE&ObjectPath=/Shops/63415186/Products/4GK985878-60BL00&ViewAction=ViewProductViaPortal, abgerufen am: 01.09.2021.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (Hrsg.) (2019): Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden – Leitfaden für die Planung, die Einrichtung und den Betrieb einer Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden. Praxis im Bevölkerungsschutz, Band 13. 2. Auflage. Bonn. Abrufbar unter: https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-13-notstromversorgung-unternehmen-behoerden.pdf?__blob=publicationFile&v=8, abgerufen am: 18.04.2023.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (Hrsg.) (2021): Kritische Infrastrukturen – Definition und Übersicht. Abrufbar unter: https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/kritische-infrastrukturen_node.html, abgerufen am: 14.10.2021.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.) (2016a): Ortsbewegliche Druckgasbehälter – Füllen, Bereithalten, innerbetriebliche Beförderung, Entleeren – TRBS 3145/TRGS 745. Abrufbar unter: https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/pdf/TRBS-3145.pdf?__blob=publicationFile&v=3, abgerufen am: 02.05.2023.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.) (2016b): Ortsfeste Druckanlagen für Gase – TRBS 3146/TRGS 746. Abrufbar unter: https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/pdf/TRBS-3146.pdf?__blob=publicationFile&v=2, abgerufen am: 02.05.2023.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.) (2019): Technische Regeln für Gefahrstoffe – Abgase von Dieselmotoren TRGS 554. Abrufbar unter: https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-554.pdf?__blob=publicationFile, abgerufen am: 02.05.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2021a): Altmaier legt erste Abschätzung des Stromverbrauchs 2030 vor. Abrufbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/07/20210713-erste-abschaetzungen-stromverbrauch-2030.html>, abgerufen am: 25.04.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.) (2021b): Windenergie an Land. Abrufbar unter: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/windenergie-an-land.html?cms_docId=72880, abgerufen am: 06.10.2021.

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hrsg.) (2019): EE-Stromspeicher: Registrierungspflichten, Amnestie, Förderung und Abgrenzung Version 1.1. Abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Hinweispapiere/Stromspeicher.pdf?__blob=publicationFile&v=2, abgerufen am: 25.04.2023.

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hrsg.) (2021): Regelungen zu Stromspeichern im deutschen Strommarkt. Abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Speicherpapier.pdf?__blob=publicationFile&v=5, abgerufen am: 25.04.2023.

Bundesverband Deutscher Wasserkraftwerke e. V. (Hrsg.) (2019): Wasserkraft in Zahlen. Abrufbar unter: <https://www.wasserkraft-deutschland.de/wasserkraft/wasserkraft-in-zahlen.html>, abgerufen am: 22.05.2023.

Bundesverband Deutscher Wasserkraftwerke e. V. (Hrsg.) (2021): Wasserkraft Genehmigungsverfahren. Abrufbar unter: <https://www.wasserkraft-deutschland.de/wasserkraft/genuehmigungsverfahren.html>, abgerufen am 19.08.2021.

Bundesverband WindEnergie e. V. (Hrsg.) (2021a): Fundament. Abrufbar unter: <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/konstruktiver-aufbau/fundament/>, abgerufen am: 12.10.2021.

Bundesverband WindEnergie e. V. (Hrsg.) (2021b): Sicherer Betrieb durch Wartung und Instandhaltung. Abrufbar unter: <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/betrieb/wartung-und-instandhaltung/>, abgerufen am: 12.10.2021.

Burkhardt GmbH (Hrsg.) (2021): Kraft-Wärme-Kopplung mit Holzpellets – Strom für Wärme aus Holzpellets. Abrufbar unter: <https://burkhardt-gruppe.de/de/energietechnik/kwk-mit-holzpellets/>, abgerufen am: 01.10.2021.

Burkhardt, J. (2021): Kosten Wechselrichter: pro kW, beim Kauf, Betriebskosten. Abrufbar unter: <https://echtsolar.de/kosten-wechselrichter/>, abgerufen am: 14.10.2021.

Caroll, D. (2020): Australian PV plant tests 2 MW/8 MWh vanadium flow battery. Abrufbar unter: <https://www.pv-magazine.com/2020/12/11/australian-pv-plant-tests-2-mw-8-mwh-vanadium-flow-battery/>, abgerufen am: 25.04.2023.

Caterpillar Corporate (Hrsg.) (2021): Dieselgenerator C1.1 (50 Hz) – 6.8–9.5kVA. Abrufbar unter: https://www.cat.com/de_DE/products/new/power-systems/electric-power/diesel-generator-sets/1000001184.html#, abgerufen am: 19.10.2021.

Caterpillar Energy Solutions GmbH (Hrsg.) (2021): Gasmotor TCG 2032 V12, V16. Abrufbar unter: <https://www.mwm.net/gasmotoren-stromaggregate/gasmotor-tcg-2032/>, abgerufen am: 01.10.2021.

Chen, T., Jin, Y., Lv, H., Yang, A., Liu, M., Chen, B., Xie, Y. und Chen, Q. (2020): Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems. In: Transactions of Tianjin University, Band 26, Heft 3. S. 208–217.

CNG-Club e.V. (Hrsg.) (2021): Was ist BioCNG? Abrufbar unter: https://www.cng-club.de/was_ist_biocng, abgerufen am: 13.10.2021.

Costa, Á. M., Orosa, J. A., Vergara, D. und Fernández-Arias, P. (2021): New Tendencies in Wind Energy Operation and Maintenance. In: Applied Sciences, Band 11, Heft 4.

Crastan, V. (2018): Energiewirtschaft und Klimaschutz, Elektrizitätswirtschaft und Liberalisierung, Kraftwerktechnik und alternative Stromversorgung, chemische Energiespeicherung. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.

Crastan, V. und Westermann, D. (2018): Elektrische Energieversorgung 3 – Dynamik, Regelung und Stabilität, Versorgungsqualität, Netzplanung, Betriebsplanung und -Führung, Leit- und Informationstechnik, FACTS, HGÜ. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (Hrsg.) (2011): BGI/GUV-I 8561 – Gefahrstoffe auf Bauhöfen im öffentlichen Dienst. Abrufbar unter: https://www.unfallkasse-nrw.de/fileadmin/server/download/Regeln_und_Schriften/Informationen/213-030-2011.pdf, abgerufen am: 06.06.2023.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (Hrsg.) (2021): Wasserkraft. Abrufbar unter: <https://www.dguv.de/de/mediencenter/hintergrund/energie/wasserkraft/index.jsp>, abgerufen am: 26.10.2021.

Deutscher Bundestag (Hrsg.) (2020): Energiespeicher der Elektromobilität – Entwicklung der Energiedichten. Abrufbar unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/819220/31128d3d32638f43627fa8a99bd3cb83/WD-8-090-20-pdf-data.pdf>, abgerufen am: 25.04.2023.

Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) (2020): Serie 1 Frachtcontainer – Klassifizierung, Abmessungen und Gesamtgewichte (ISO 668:2020-01).

Diesel, R. (1893): Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekannten Verbrennungsmotoren. Berlin, Heidelberg: Springer.

Dortmunder Energie- und Wasserversorgung GmbH (DEW21) (Hrsg.) (2021): Unser Erdgas – Erdgaskennwerte 2020. Abrufbar unter: <https://www.dew21.de/fileadmin/Dokumente/Produkte/Erdgas/Erdgaskennwerte.pdf>, abgerufen am: 19.10.2021.

Drahn, C. (Hrsg.) (2021): Dieselpreise Deutschland – Preisentwicklung Diesel. Dieselpreise in Metropolen. Abrufbar unter: <https://www.benzinpreis-aktuell.de/dieselpreise>, abgerufen am: 01.09.2021.

Endress (Hrsg.) (2021): ESE 510 VW/AS. Abrufbar unter: https://www.fnshop.de/artikel.php?artnr=331218&sortiment=Endress&utm_source=billiger&utm_medium=cpc&utm_campaign=billiger&gclid=EAJaIQobChMI89j3p7vd8gIVDNGyCh10bA5JEAYYBiABEGIDvvD_BwE, abgerufen am: 01.09.2021.

Energy Observer Developments SAS (Hrsg.) (2021): Product Information Sheet – Hydrogen Power Generator GEH2 100 kVA. Abrufbar unter: https://eo-dev.imgix.net/documents/eodev-productinformationsheet-geh2-en_2021-04-08-142420.pdf, abgerufen am: 31.20.2021.

Enevoldsen, P., Permien, F-H., Bakhtaoui, I., von Krauland, A-K., Jacobsen, M. Z., Xydis, G., Sovacool, B. K., Valentine, S. V., Luecht, D. und Oxley, G. (2019): How much wind power potential does europe have? Examining european wind power potential with an enhanced socio-technical atlas. In: Energy Policy, Band 132. S. 1092–1100.

ENTEKA Plus GmbH (Hrsg.) (2021): Windkraftanlagen-Leistung: Das sind die stärksten Windräder der Welt! Abrufbar unter: <https://www.entega.de/blog/windkraftanlage-leistung/>, abgerufen am: 29.10.2021.

Eska, B. und Corneille, M. (2018): Planungsleitfaden Brennstoffzellen-Ersatzstromversorgungen – Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) und Netzersetzanlagen (NEA) mit Brennstoffzellen. Abrufbar unter: <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/cpn-planungsleitfaden-brennstoffzellen-esv.pdf>, abgerufen am 02.05.2023.

EWE Aktiengesellschaft (Hrsg.) (2021): Die Farben des Wasserstoffs – Eine Übersicht. Abrufbar unter: <https://www.ewe.com/de/zukunft-gestalten/wasserstoff/die-farben-des-wasserstoffs>, abgerufen am: 29.10.2021.

EV Database (9-Five-9 Ventures BV) (Hrsg.) (2021): Tesla Model S Plaid: Elektroauto. Abrufbar unter: <https://ev-database.org/de/pkw/1405/Tesla-Model-S-Plaid>, abgerufen am: 07.10.2021.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.) (2021): Biogas: Biomethan. Abrufbar unter: <https://biogas.fnr.de/biogas-nutzung/biomethan>, abgerufen am 13.10.2021.

Fan, X., Liu, B., Liu, J., Ding, J., Han, X., Deng, Y., Lv, X., Xie, Y., Chen, B., Hu, W. und Zhong, C. (2020): Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage. In: Transactions of Tianjin University, Band 26, Heft 2. S. 92–103.

flex-sec GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2021): Wiederkehrende Prüfung von Photovoltaikanlagen. Abrufbar unter: <https://flex-sec.de/ratgeber/pruefung-photovoltaikanlagen/>, abgerufen am: 14.10.2021.

Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (Hrsg.) (2021): Das nächste Level für Dünnschicht-Solarmodule. Abrufbar unter: <https://www.imws.fraunhofer.de/de/kompetenzfelder/photovoltaik/highlights/das-naechste-level-fuer-duennschicht-solarmodule.html>, abgerufen am: 18.08.2021.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Hrsg.) (2021): Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen – Fraunhofer ISE. Abrufbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/fue-infrastruktur/center/zentrum-fuer-hoechsteffiziente-solarzellen.html>, abgerufen am: 14.10.2021.

GasCom-Equipment GmbH (Hrsg.) (2021): CNG von der GasCom Equipment GmbH. Abrufbar unter: <https://www.gascom.de/leistungen/rund-ums-erdgas/cng/>, abgerufen am: 27.10.2021.

Giesecke, J. und Heimerl, S. (2014): Wasserkraftanlagen. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg.

Greenhouse Media GmbH (Hrsg.) (2021): Lohnen sich Dünnschichtmodule? Abrufbar unter: <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/solarmodule/duennschichtmodule>, abgerufen am: 18.08.2021.

Guo, B., Niu, M., Lai, X. und Chen, L. (2018): Application research on large-scale battery energy storage system under Global Energy Interconnection framework. In: Global Energy Interconnection, Band 1, Heft 1. S. 79–86.

Gyin, J. (1993): Geschichte der Stromversorgung in Nagold und Umgebung. Nagold Stuttgart: Energie-Versorgung Schwaben.

H2SYS (Hrsg.) (2021): Produktblatt Thytan – Hydrogen Power Generator – Product Information Sheet. Abrufbar unter: <https://www.h2sys.fr/wp-content/uploads/2021/09/FT101-V2.1-092021-FRTHYTAN.pdf>, abgerufen am: 01.08.2021.

Hamburg Marketing GmbH (Hrsg.) (2021): Energiewende: Norddeutsches Reallabor gestartet. Abrufbar unter: <https://www.hamburg-news.hamburg/innovation-wissenschaft/energiewende-norddeutsches-reallabor-gestartet>, abgerufen am: 25.04.2023.

Hamburger Hochbahn AG (Hrsg.) (2021): E-Busse für Hamburg – Die große Emissionsfreiheit. Abrufbar unter: <https://www.hochbahn.de/de/projekte/e-busse-fuer-hamburg>, abgerufen am: 20.10.2021.

Hansen, H.-J. (2021): Stromgenerator warten & pflegen – Wartung und Service. Abrufbar unter: <https://www.stromgenerator.pro/stromgenerator-pflege-und-wartung/>, abgerufen am: 01.09.2021.

Hau, E. (2016): Windkraftanlagen – Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. Berlin, Heidelberg: Springer.

Hauer, A., Bauer, D. P. und Wetzel, T. (2019): Thermische Energiespeicher für Elektrizitätserzeugung und industrielle Anwendungen. In: Energy Research for Future – Forschung für die Herausforderungen der Energiewende. Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2019. S. 70–73. Abrufbar unter: <https://www.fvee.de/wp-content/uploads/2022/08/th2019.pdf>, abgerufen am: 09.06.2023.

Hebling, C., Ragwitz, M., Fleiter, T., Groos, U., Härle, D., Held, A., Jahn, M., Müller, N., Pfeifer, T., Plötz, P., Ranzmeyer, O., Schaadt, A., Sensfuß, F., Smolinka, T. und Wietschel, M. (2019): Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Abrufbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf, abgerufen am: 25.04.2023.

Heimerl, S. (2002): Systematische Beurteilung von Wasserkraftprojekten. Stuttgart.

Heizungsmacher AG (Hrsg.) (2021): Photovoltaikanlagen – Nachhaltig und unabhängig. Abrufbar unter: <https://www.solarmacher.ch/wissen/>, abgerufen am: 14.10.2021.

Helmholtz-Zentrum hereon GmbH (Hrsg.) (2021): Niedersachsen u. Bremen: Mittlere Windgeschwindigkeit (1981-2010). Abrufbar unter: <https://www.norddeutscher-klimamonitor.de/klima/1981-2010/jahr/mittlere-windgeschwindigkeit/niedersachsen-bremen/coastdat-2.html>, abgerufen am: 07.10.2021.

Hermeling, W. (2020): Handbuch für den LNG- und CNG-Praktiker – Liquefied Natural Gas in der Anwendung. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Hettersheimer, T., Thielmann, A., Neef, C., Möller, K.-C., Wolter, M., Lorentz, V., Gepp, M., Wenger, M., Prill, T., Zausch, J., Kitzler, P., Montnacher, J., Miller, M., Hagen, M., Fanz, P. und Tübke, J. (2017): Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität. Pfinztal: Fraunhofer-Allianz Batterie. Abrufbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/Oca7ef53-3b51-4467-ad20-bdef36958520/details>, abgerufen am: 09.06.2023.

Heuck, K., Dettmann, K.-D. und Schulz, D. (2010): Elektrische Energieversorgung – Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis, 8., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag/Springer Fachmedien. Abrufbar unter: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-8348-9761-9>, abgerufen am: 09.06.2023.

Hiete, M., Merz, M., Trinks, C., Grambs, W. und Thiede, T. (2010): Krisenmanagement Stromausfall – Kurzfassung – Krisenmanagement bei einer großflächigen Unterbrechung der Stromversorgung am Beispiel Baden-Württemberg. Heidelberg: Jedermann-Verlag.

HO-MA Elektro Aggregate Service GmbH (Hrsg.) (2021a): HO-MA H50-2A-IV – Technische Daten. Abrufbar unter: <https://www.ho-ma-notstrom.de/ho-ma-h50-2a-iv.html>, abgerufen am: 01.09.2021.

HO-MA Elektro Aggregate Service GmbH (Hrsg.) (2021b): Turnusgemäße Wartung – nach sämtlichen gesetzlichen Vorschriften. Abrufbar unter: <https://www.ho-ma-notstrom.de/wartung>, abgerufen am: 01.09.2021.

IndustriegaseVerband e. V. – Expertengruppe Behälter (Hrsg.) (2018): Aufstellung von ortsfesten Druckgasbehältern – IGV Technische Leitlinien IGV-TL-01B-Rev2. Abrufbar unter: <https://www.industriegaseverband.de/download-file/igv-tl-01b-rev2tankaufstellung2018-01-30.pdf>, abgerufen am 02.05.2023.

inhouse engineering GmbH (Hrsg.) (2021): Produktdatenblatt inhouse 5000+: Product Information Sheet. Abrufbar unter: <https://www.inhouse-engineering.de/wp-content/uploads/inhouse-5000-1.pdf>, abgerufen am 15.10.2021.

Intermountain Wind & Solar (Hrsg.) (2021): Solar Panels 101: Understanding Module Size and Weight. Abrufbar unter: <https://www.intermtnwindandsolar.com/solar-panels-101-understanding-module-size-and-weight/>, abgerufen am: 14.10.2021.

International Renewable Energy Agency (Hrsg.) (2017): Electricity storage and renewables – Costs and markets to 2030. Abrufbar unter: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf?rev=a264707cb8034a52b6f6123d5f1b1148, abgerufen am: 25.04.2023.

Jäger, J. und Gerlach, H. J. (2018): Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. – Leitfaden zur Anmeldung und steuerlichen Behandlung von kleinen Blockheizkraftwerken. Berlin: wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.

Joest, S., Fichtner, M., Wietschel, M., Bünger, U., Stiller, C., Schmidt, P. und Merten, F. (2009): Studie zur Frage „Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?“ – Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und in Abstimmung mit der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW). Abrufbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9060_MOB_Studie_Woher_kommt_der_Wasserstoff_in_Deutschland_bis_2050__Abschlussbericht_.pdf, abgerufen am: 25.04.2023.

Kaltschmitt, M., Hartmann, H. und Hofbauer, H. (Hrsg.) (2009): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin, Heidelberg: Springer.

Karabelli, D. und Birke, K. P. (2021): Feasible Energy Density Pushes of Li-Metal vs. Li-Ion Cells. In: Applied Sciences, Band 11, Heft 16.

Kemter, M. (2021): Kraftstofflagerung – Wie lange ist Benzin und Diesel haltbar? Abrufbar unter: <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.haltbarkeit-von-benzin-und-diesel-mhsd.92a2636d-ecb3-4601-affc-8e708b415067.html>, abgerufen am: 01.09.2021.

Kern, L., Seebaß, J. V. und Schlüter, J. (2019): Das Potenzial von vertikalen Windenergieanlagen im Kontext wachsender Flächennutzungskonflikte und Akzeptanzprobleme der Windenergie. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft, Band 43, Heft 4. S. 289–302.

Kesselheld GmbH (Hrsg.) (2021): Flüssiggastank – Preise, Größen & Vorschriften im Überblick. Abrufbar unter: <https://www.kesselheld.de/fluessiggastank/>, abgerufen am: 27.10.2021.

Keuneke, R. (2015): Marktanalyse zur Vorbereitung von Ausschreibungen – Vorhaben Iid, Wasserkraft. Abrufbar unter: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/marktanalysen-studie-wasserkraft.pdf?__blob=publicationFile&v=4, abgerufen am: 02.05.2023.

Kitepower – Airborne Wind Energy – A Enevale BV Company (Hrsg.) (2021a): Kitepower Falcon 100kW Airborne Wind Energy System. Abrufbar unter: <https://thekitepower.com/product/#components>, abgerufen am: 12.10.2021.

Kitepower – Airborne Wind Energy – A Enevale BV Company (Hrsg.) (2021b): The Kitepower Falcon 100kW. Abrufbar unter: <https://kitepower.nl/resources/product/New%20Powerful%20Ways%20-%20The%20Kitepower%20Falcon%20100kW.pdf>, abgerufen am: 12.10.2021.

- Knauer, R. (2017):** Biosprit – Klimafreundlicher Diesel – und gut für den Motor. Abrufbar unter: <https://www.tagesspiegel.de/wissen/biosprit-klimafreundlicher-diesel-und-gut-fuer-den-motor/19977906.html>, abgerufen am: 25.04.2023.
- Kohler, B. (2006):** Externe Effekte der Laufwasserkraftnutzung. Abrufbar unter: https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/262/1/Dissertation_Kohler.pdf, abgerufen am: 02.05.2023.
- Konstantin, P. (2017):** Praxisbuch Energiewirtschaft – Energieumwandlung, -transport und -beschaffung, Übertragungsnetzausbau und Kernenergieausstieg. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K. A., Kato, K., Friesen, T., Liu, H. und van Iseghem, M. (2014):** International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme – Performance and Reliability of Photovoltaic Systems – Sub-task 3.2: Review of Failures of Photovoltaic Modules. Abrufbar unter: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf, abgerufen am: 02.05.2023.
- Krug, F. (2021):** Prüfung von PV-Anlagen nach DGUV Vorschrift 3. Abrufbar unter: <https://www.elektrofachkraft.de/pruefung/pruefung-von-pv-anlagen-nach-dguv-vorschrift-3>, abgerufen am: 02.05.2023.
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2012):** Energiemais für Biogas. Abrufbar unter: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/nawaro/energiemais.htm>, abgerufen am: 25.04.2023.
- Lange, A. (2021):** Notstromaggregat – Unser Strom ist blau. Abrufbar unter: <https://www.thw.de/SharedDocs/Ausstattungen/DE/Geraete/notstromaggregat.html?noMobile=1>, abgerufen am: 01.08.2021.
- Linde Gas GmbH (Hrsg.) (2021):** Rechnen Sie mit Wasserstoff – Die Datentabelle. Abrufbar unter: https://www.linde-gas.at/de/images/1007_rechnen_sie_mit_wasserstoff_v110_tcm550-169419.pdf, abgerufen am: 14.10.2021.
- Linde GmbH (Hrsg.) (2019):** Produktdatenblatt Wasserstoff 5.0: Product Information Sheet. Abrufbar unter: https://produkte.linde-gase.de/db_neu/wasserstoff_5.0.pdf, abgerufen am: 14.10.2021.

Linde GmbH (Hrsg.) (2021a): Methan 2.5 Bündel – Technische Gase von Linde online kaufen. Abrufbar unter: <https://www.linde-gas.de/shop/de/de-ig/gase-kaufen/schneid-und-schwei%C3%9Fgase/methan/methan-25-b%C3%BCndel-methan-25-buendel>, abgerufen am: 08.10.2021.

Linde GmbH (Hrsg.) (2021b): Wasserstoff fluessig 5.0. Abrufbar unter: https://produkte.linde-gase.de/db_neu/wasserstoff_fluessig.pdf, abgerufen am: 27.10.2021.

Lindenfield GmbH (Hrsg.) (2021a): Wasserstoff Bündel kaufen: Eigenschaften und Kosten. Abrufbar unter: <https://www.gasido.de/wasserstoff-buendel-kaufen-eigenschaften-und-kosten>, abgerufen am: 27.10.2021.

Lindenfield GmbH (Hrsg.) (2021b): Wasserstofftank für die Industrie mieten oder kaufen. Abrufbar unter: <https://www.gasido.de/wasserstofftank>, abgerufen am: 27.10.2021.

Maluck, L. (2019): Gas passt. Abrufbar unter: <https://www.mtu-solutions.com/eu/de/stories/energie/gas-generatoren/gas-passt.html>, abgerufen am: 02.05.2023.

Man (Hrsg.) (2021): Lion's City 12 E. Abrufbar unter: https://www.man.eu/ntg_media/media/de/content_medien/doc/bw_master/bus_1/datenblaetter/man_datenblatt_lionscity_12e.pdf, abgerufen am: 29.10.2021.

Mattstedt, M. (Hrsg.) (2021): Photovoltaik Reinigung – wie oft? Abrufbar unter: <https://solarreinigung.com/photovoltaik-reinigung-wie-oft/>, abgerufen am: 19.10.2021.

Meyer, S. (2021): Photovoltaik Kosten und Preise 2021: Was kostet eine Solaranlage 2021? Abrufbar unter: <https://www.photovoltaik-angebotsvergleich.de/photovoltaik-kosten.html>, abgerufen am: 14.10.2021.

Mertens, K. (2020): Photovoltaik – Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis. München: Hanser.

Messerschmid Energiesysteme GmbH (Hrsg.) (2021): Das Blockheizkraftwerk (BHKW) – Führend in Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit. Abrufbar unter: <https://www.messerschmid-energiesysteme.de/blockheizkraftwerke.html>, abgerufen am: 01.10.2021.

MITTRONIK GmbH (Hrsg.) (2021): Diesel Generator von 2 bis 3000 kVA – Made in EU. Abrufbar unter: <https://mittronik.com/diesel-generator/>, abgerufen am: 01.08.2021.

Mitzel, J. und Friedrich, K. A. (2019): Wasserstoff und Brennstoffzellen. In: BWK Energie, Band 71, Heft 6. S. 126–138.

Mongird, K., Viswanathan, V., Alam, J., Vartanian, C., Sprende, V. und Baxter, R. (2020): 2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. Abrufbar unter: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>, abgerufen am: 25.04.2023.

Nachtnebel, H. P. (2009): Wasserwirtschaftliche Planung (816.106). Abrufbar unter: https://iwhw.boku.ac.at/LVA816106/Wasserwirtschaftliche%20Planung816106_020309korr.pdf, abgerufen am: 02.05.2023.

Németh, K. (2014): Ultrahigh energy density Li-ion batteries based on cathodes of 1D metals with –Li–N–B–N– repeating units in α -Li_xBN₂ (1 ≤ x ≤ 3). In: The Journal of Chemical Physics, Band 141, Heft 5.

NEW 4.0 – Norddeutsche EnergieWende (Hrsg.) (2021): Energiewende: Entdecke das Energiesystem der Zukunft! Abrufbar unter: <https://www.new4-0.de/energiewende/#projektziele>, abgerufen am: 01.08.2021.

Nier, H. (2019): So unterschiedlich lang sind die Tage in Deutschland. Abrufbar unter: <https://de.statista.com/infografik/17559/tageslichtdauer-in-deutschland/>, abgerufen am: 07.10.2021.

Nordex SE (Hrsg.) (2021): Plattformen – Nordex SE – Deutsch. Abrufbar unter: <https://www.nordex-online.com/de/product/plattformen/#delta4000>, abgerufen am: 12.10.2021.

OG Clean Fuels (Hrsg.) (2021): Tankstellen. Abrufbar unter: <https://orangeegas.nl/de/tankstellen>, abgerufen am: 13.10.2021.

OMV Refining & Marketing GmbH (Hrsg.) (2017): Lagerung von Dieselmotortreibstoff. Abrufbar unter: https://www.lm-energy.at/wp-content/uploads/2023/03/Diesel_Factsheet_Lagerung.pdf, abgerufen am: 06.06.2023.

Ortega, R., Carranza, O., Sosa, J.C., García, V.H. und Rodríguez, J.J. (2015): Modeling and design of photovoltaic inverters for island mode operation within a microgrid. In: 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV). S. 1–6.

Partz, J. (2021): LNG Gas: Entstehung und Einsatz von Flüssigerdgas. Abrufbar unter: <https://www.fluessiggas1.de/lng-gas-entstehung-und-einsatz-von-fluessigerdgas/>, abgerufen am: 02.05.2023.

Paschotta, R. (2020): Notstromversorgung. Abrufbar unter: <https://www.energielexikon.info/notstromversorgung.html>, abgerufen am: 09.08.2023.

Pavlovic, T. (Hrsg.) (2020): The Sun and Photovoltaic Technologies. Cham: Springer Nature Switzerland AG.

Pionierkraft GmbH (Hrsg.) (2021): Kleinwasserkraftwerk: Das Wasserkraftwerk für zuhause! Abrufbar unter: <https://pionierkraft.de/2020/12/04/kleinwasserkraftwerk-das-wasserkraftwerk-fuer-zuhause/>, abgerufen am: 26.10.2021.

PRIMAGAS Energie GmbH (Hrsg.) (2021): Für mehr Möglichkeiten – Von der Heizung über Kochen bis hin zur Prozess-Energie. Abrufbar unter: <https://www.primagas.de/wissen/fluessiggastank-informationen>, abgerufen am: 01.10.2021.

Propan Rheingas GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2021): Flüssiggastank – Vorschriften für Aufstellung & Einbau. Abrufbar unter: <https://www.rheingas.de/fluessiggas/fluessiggastank-vorschriften/>, abgerufen am: 01.10.2021.

PV4Life GmbH (Hrsg.) (2017): Der neue MobilPV für den MobilHybrid packt die Sonne in Ihren Tank. Abrufbar unter: <https://mobilhybrid.de/wp-content/uploads/2020/04/MobilPV.pdf>, abgerufen am: 25.04.2023.

Qazi, S. (2017): Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas. Amsterdam: Elsevier.

Quentin, J. (2015): Dauer und Kosten des Planungs- und Genehmigungsprozesses von Windenergieanlagen an Land. Abrufbar unter: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/marktanalyse-windenergie-an-land-workshop-01-vortrag-fachagentur-windenergie-an-land.pdf?__blob=publicationFile&v=7, abgerufen am: 02.05.2023.

Renovagen Ltd. (Hrsg.) (2021): Rapid Roll-Instant Deployable Solar Power – Solar Power Mobility Without Compromise. Abrufbar unter: https://www.renovagen.com/wp-content/uploads/2018/04/Renovagen_Brochure.pdf, abgerufen am: 20.10.2021.

Rolande Germany GmbH (Hrsg.) (2020): So wird LNG getankt. Abrufbar unter: <https://rolandelng.de/so-wird-lng-getankt/>, abgerufen am: 02.05.2023.

- Rolls-Royce Power Systems AG (Hrsg.) (2021):** Die neuen mtu Gasaggregate der Baureihe 500. Abrufbar unter: <https://www.mtu-solutions.com/eu/de/applications/power-generation/power-generation-products/gas-generator-sets/natural-gas-generator-sets/gas-powered-series-500.html>, abgerufen am: 01.10.2021.
- Sandia National Laboratories (2021):** DOE Global Energy Storage Database. Abrufbar unter: <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/index.html>, abgerufen am: 02.05.2023.
- Schmitz, J. (2021):** Brauchen Photovoltaikanlagen eine Baugenehmigung? Abrufbar unter: <https://www.solaranlagen-portal.de/recht-steuern/photovoltaikmodule.html#!>, abgerufen am: 14.10.2021.
- Schneider, D. (1974):** Investition und Finanzierung – Lehrbuch der Investitions-, Finanzierungs- und Ungewißheitstheorie. 2. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Schulz, D., Dietmannsberger, M., Lücken, A., Lang, L. und von Alm, J. (2018):** Autarke Notstromversorgung der Bevölkerung unterhalb der KRITIS-Schwelle. Praxis im Bevölkerungsschutz, Band 19. Bonn. Abrufbar unter: https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-19-autarke-notstromversorgung-bevoelkerung.pdf?__blob=publicationFile&v=6, abgerufen am: 18.04.2023.
- Schulz, D. und Vorwerk, D. (2021):** Integrierte Netzplanung für die drei Energieträger Strom, Gas und Wärme (iNeP). Abrufbar unter: <https://www.hsu-hh.de/ees/forschung/forschungsgebiete/inep>, abgerufen am: 28.10.2021.
- SDMO Industries (Hrsg.) (2021):** Handbuch zur Bedienung und Wartung von Stromerzeugern. Abrufbar unter: http://www.sdmo-rentalpower.com/commonsDocuments/300/33516002401_0_1.pdf, abgerufen am: 28.10.2021.
- Sepanski, A., Reil, F., Vaaßen, W., Janknecht, E., Hupach, U., Bogdanski, N., van Heeckeren, B., Schmidt, H., Bopp, G., Laukamp, H., Grab, R., Philipp, S., Thiem, H., Huber, J., Haselhuhn, R., Häberlin, H., Krutzke, A., Neu, B., Richter, A., Bansemer, B. und Halfmann, M. (2018):** Guideline. Assessing Fire Risks in Photovoltaic Systems and Developing Safety Concepts for Risk Minimization. Abrufbar unter: <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/assessing-fire-risks-photovoltaic-systems-and-developing-safety-concepts-risk>, abgerufen am: 09.06.2023.

Sharaf, O. Z. und Orhan, M. F. (2014): An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Band 32. S. 810–853.

Shell Deutschland GmbH (Hrsg.) (2018): Technische Details – Shell GTL Fuel – Synthetic Technology for Cleaner Air. Abrufbar unter: <https://www.bremer-mineraloel.de/wp-content/uploads/2018/06/Shell-GTL-Fuel-techn.-Details.pdf>, abgerufen am: 25.04.2023.

Shell Deutschland GmbH (Hrsg.) (2021): Gas to Liquids for Automotive Fuel. Abrufbar unter: https://web.archive.org/web/20090219143619/http://www.shell.com/static/shellgasandpower-en/downloads/what_is_gas_to_liquids/gtl_automotive_factsheet.pdf, abgerufen am: 28.10.2021.

Sieg, M. (2010): Der vermeidbare Albtraum. Abrufbar unter: <https://www.photovoltaikeu/wartung/der-vermeidbare-albtraum>, abgerufen am: 04.05.2023.

Siemens Gamesa Renewable Energy (Hrsg.) (2021a): Onshore Wind Turbine SG 5.8-170. Abrufbar unter: <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/onshore/wind-turbine-sg-5-8-170>, abgerufen am: 18.08.2021.

Siemens Gamesa Renewable Energy (Hrsg.) (2021b): SG 2.1-114 Onshore wind turbine – Benchmark in the sector for medium- and low-wind sites. Abrufbar unter: <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/onshore/wind-turbine-sg-2-1-114>, abgerufen am: 12.10.2021.

Siemens Gamesa Renewable Energy (Hrsg.) (2021c): Onshore Wind Turbines. Abrufbar unter: <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/onshore>, abgerufen am: 12.10.2021.

SkySails Power (Hrsg.) (2021): Onshore Wind Power has a New Face. Abrufbar unter: <https://skysails-power.com/onshore-units/>, abgerufen am: 12.10.2021.

Smart Hydro Power (Hrsg.) (2015a): Smart Free Stream Turbine. Abrufbar unter: https://www.smart-hydro.de/wp-content/uploads/2015/12/Datasheet_SMART_Freestream.pdf, abgerufen am: 04.05.2023.

Smart Hydro Power (Hrsg.) (2015b): Smart Monofloat Turbine. Abrufbar unter: https://smart-hydro.de/wp-content/uploads/2015/12/Datasheet_SMART_Monofloat.pdf, abgerufen am: 04.05.2023.

Smart Hydro Power (Hrsg.) (2021a): Hybrid system for productive use. Abrufbar unter: <https://www.smart-hydro.de/decentralized-rural-electrification-projects-worldwide/india-hybrid-system-productive-use-2/#project>, abgerufen am: 26.10.2021

Smart Hydro Power (Hrsg.) (2021b): Energy Management Systems. Abrufbar unter: <https://www.smart-hydro.de/renewable-energy-systems/energy-management-systems/>, abgerufen am: 26.10.2021.

Smart Hydro Power (Hrsg.) (2021c): Prices Hydrokinetic Photovoltaic. Abrufbar unter: <https://www.smart-hydro.de/renewable-energy-systems/prices-hydrokinetic-photovoltaic/>, abgerufen am: 26.10.2021.

Smart Hydro Power GmbH (Hrsg.) (2021): Hydrokinetic in-stream Turbines. Abrufbar unter: <https://www.smart-hydro.de/renewable-energy-systems/hydrokinetic-turbines-river-canal/>, abgerufen am: 19.08.2021.

Sokratherm GmbH (Hrsg.) (2021a): BHKW-Kompaktmodule der 100 kW-Klasse. Abrufbar unter: <https://www.sokratherm.de/blockheizkraftwerke/blockheizkraftwerk-100-kw-klasse/>, abgerufen am: 01.10.2021.

Sokratherm GmbH (Hrsg.) (2021b): BHKW-Kompaktmodule der 500 kW-Klasse. Abrufbar unter: <https://www.sokratherm.de/blockheizkraftwerke/blockheizkraftwerk-500-kw-klasse/>, abgerufen am: 01.10.2021.

Sokratherm GmbH (Hrsg.) (2021c): Mobiles BHKW für den Betrieb an mehreren Standorten. Abrufbar unter: <https://www.sokratherm.de/blockheizkraftwerke/ausstattungsvarianten/mobiles-bhkw-fuer-den-betrieb-an-mehreren-standorten/>, abgerufen am: 01.10.2021.

Stadtwerke Villingen-Schwenningen GmbH (Hrsg.) (2023): Eigenschaften von Erdgas. Abrufbar unter: https://www.svs-energie.de/fileadmin/user_upload/Netze/Installateure/Gas/Eigenschaften_von_Erdgas.pdf, abgerufen am: 06.06.2023.

Statista (Hrsg.) (2012): Wirkungsgrade verschiedener Stromspeicher im Jahr 2012. Abrufbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156269/umfrage/wirkungsgrade-von-ausgewaehlten-stromspeichern/>, abgerufen am: 07.10.2021.

Statista (Hrsg.) (2021a): Sonnenschein pro Monat in Deutschland 2020/2021. Abrufbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5578/umfrage/durchschnittliche-monatliche-sonnenscheindauer-in-deutschland/>, abgerufen am: 07.10.2021.

Statista (Hrsg.) (2021b): Elektromobilität in Deutschland. Abrufbar unter: <https://de.statista.com/themen/608/elektromobilitaet/#dossierKeyfigures>, abgerufen am: 01.10.2021.

Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2021): Bruttostromerzeugung 2020. Abrufbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/_Grafik/_Interaktiv/bruttostromerzeugung-erneuerbare-energien.html, abgerufen am: 28.08.2021.

Steinbuch, K. und Rupprecht, W. (1982): Nachrichtentechnik – Band 1: Schaltungstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer.

Steinhart, C., Finkel, M., Gratza, M., Witzmann, R., Kerber, G., Uhrig, M., Schaar-schmidt, K., Baumgartner, S., Wackerl, H., Wopperer, T., Nagel, T., Kreißl, M., Mücke, M., Maschmann, C. und Remmers, G. (2019): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben LINDA – Verbundprojekt „Lokale Inselnetzversorgung und beschleunigter Netzwiederaufbau mit dezentralen Erzeugungsanlagen bei groß-flächigen Stromausfällen“. Augsburg: LEW Verteilnetz GmbH.

Tank und Apparate Barth GmbH (Hrsg.) (2017): Brutto-Preisliste DIN-Tanks 2017. Abrufbar unter: https://www.barth-tank.de/down/uploads/bruttopreisliste-firma-barth-2017-compl_650_1527061739.pdf, abgerufen am: 27.04.2023.

Töppler, J. und Lehmann, J. (Hrsg.) (2017): Wasserstoff und Brennstoffzelle – Technologien und Marktperspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Trina Solar Co. Ltd. (Hrsg.) (2022): Vertex – Bifacial Dual Glass. Monocrystalline Module. Abrufbar unter: https://static.trinasolar.com/sites/default/files/Datasheet_Vertex_DEG21C.20_EN_2022_A_0.pdf, abgerufen am: 07.06.2023.

TÜV Rheinland (Hrsg.) (2021): Zertifizierungen für Energiespeichersysteme und -komponenten. Abrufbar unter: <https://www.tuv.com/germany/de/energiespeichersysteme.html>, abgerufen am: 13.10.2021.

TÜV Süd AG (Hrsg.) (2021a): Eigenschaften von Wasserstoff. Abrufbar unter: <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff/eigenschaften-von-wasserstoff>, abgerufen am: 14.10.2021.

TÜV Süd AG (Hrsg.) (2021b): PEM-Brennstoffzelle. Abrufbar unter: <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/brennstoffzellen/pem-brennstoffzelle>, abgerufen am: 18.10.2021.

TÜV Süd AG (Hrsg.) (2021c): Prüfzeichen Brennstoffzellensysteme Druckgeräterichtlinie. Abrufbar unter: <https://www.tuvsud.com/de-de/branchen/energie/erneuerbare-energien/brennstoffzellen-wasserstoffzellen/pruefzeichen-brennstoffzellensysteme-dgrl>, abgerufen am: 18.10.2021.

TÜV Süd AG (Hrsg.) (2021d): Power-to-X (PtX / P2X). Abrufbar unter: <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/klima-und-energie-info/power-to-x>, abgerufen am: 01.10.2021.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2021): Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren>, abgerufen am: 19.10.2021.

Uprise Energy (Hrsg.) (2021): Portable Wind Turbine. Abrufbar unter: <https://upriseenergy.com/specifications>, abgerufen am: 18.08.2021.

Vattenfall GmbH (Hrsg.) (2023): Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal - das größte Pumpspeicherkraftwerk Deutschlands. Abrufbar unter: <https://powerplants.vattenfall.com/de/goldisthal/>, abgerufen am: 09.06.2023.

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.) (2005): Stromerzeugungsaggregate mit Hubkolben-Verbrennungsmotoren – Teil 11: Dynamische, unterbrechungsfreie Stromversorgung – Leistungsanforderungen und Prüfverfahren. Berlin: VDE VERLAG GmbH.

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.) (2006): Errichten von Niederspannungsanlagen: Begriffe. Berlin: VDE VERLAG GmbH.

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.) (2009): Errichten von Niederspannungsanlagen: Teil 1: Allgemeine Grundsätze, Bestimmungen allgemeiner Merkmale, Begriffe. Berlin: VDE VERLAG GmbH.

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.) (2012): Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 7-710: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – Medizinisch genutzte Bereiche. Berlin: VDE VERLAG GmbH.

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.) (2018a): Anwendungsregel: Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz: Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. Berlin: VDE VERLAG GmbH.

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.) (2018b): Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme (USV) – Teil 3: Methoden zum Festlegen der Leistungs- und Prüfungsanforderungen. Berlin: VDE VERLAG GmbH.

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.) (2019): Anwendungsregel: Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Niederspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Niederspannung). Berlin: VDE VERLAG GmbH.

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.) (2020): VDE 0558-510: Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) – Teil 1: Sicherheitsanforderungen. Berlin: VDE VERLAG GmbH.

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.) (2021a): VDE 0100-551-2: Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-55: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Andere Betriebsmittel – Abschnitt 551: Niederspannungstromerzeugungseinrichtungen – Einspeisung in ersatzstromberechtigte Anlagen oder Anlagenteile. Berlin: VDE VERLAG GmbH.

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.) (2021b): Stationäre elektrische Energiespeichersysteme vorgesehen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz. Berlin: VDE VERLAG GmbH.

VERBIO Vereinigte BioEnergie AG (Hrsg.) (2021): verbiogas. Abrufbar unter: <https://www.verbio.de/produkte/verbiogas/>, abgerufen am: 01.10.2021.

Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2021): Löhnen sich Batteriespeicher für Photovoltaikanlagen? Abrufbar unter: <https://www.verbraucherzentrale.nrw/wissen/energie/loehnen-sich-batteriespeicher-fuer-photovoltaikanlagen-24589>, abgerufen am: 01.08.2021.

Vestas Deutschland GmbH (Hrsg.) (2021): Anlagentechnologie. Abrufbar unter: <https://www.vestas.de/anlagentechnologie#!eventus-plattform>, abgerufen am: 12.10.2021.

Völler, K. und Reinholz, T. (2019): dena-ANALYSE – Branchenbarometer Biomethan 2019. Abrufbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-Analyse_Branchenbarometer_Biomethan_2019.pdf, abgerufen am 02.05.2023.

Wang, W., Huai, L., Wu, S., Shan, J., Zhu, J., Liu, Z., Yue, L. und Li, Y. (2021): Ultra-high-Volumetric-Energy-Density Lithium-Sulfur Batteries with Lean Electrolyte

Enabled by Cobalt-Doped MoSe₂/Ti₃C₂T_x MXene Bifunctional Catalyst. In: ACS Nano, Band 15, Heft 7. S. 11619–11633.

Weka Business Medien GmbH (Hrsg.) (2019): Fernüberwachung im Wasserkraftwerk. Abrufbar unter: <https://www.baugewerbe-magazin.de/it-am-bau/fernueberwachung-im-wasserkraftwerk.htm>, abgerufen am: 02.05.2023.

Wirth, H. (2021a): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Abrufbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>, abgerufen am: 06.08.2021.

Wirth, H. (2021b): Recent Facts about Photovoltaics in Germany. Abrufbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>, abgerufen am: 04.05.2023.

Wolf-Schumann, U. und Dumont, U. (2012): Klimafolgen für die Wasserkraftnutzung in Deutschland und Aufstellung von Anpassungsstrategien. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Wolfe, P. (2021): The world's largest solar parks. Abrufbar unter: <https://www.pv-magazine.com/2021/09/23/the-worlds-largest-solar-parks/>, abgerufen am: 02.05.2023.

Zeit Online (Hrsg.) (2020): Windkraft – Bundestag legt Mindestabstand für Windräder fest. Abrufbar unter: https://www.zeit.de/politik/deutschland/2020-06/windkraft-abstandsregel-windraeder-bundestag-solardeckel-energiewende?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.startpage.com%2F, abgerufen am: 02.05.2023.

Anhang

12

Datum: 09.09.2021

Interviewer: Johannes Schröder (HSU), Dennis Hamann (HSU)

Experte: Manuel Geiger

- Wie hoch ist der Leistungsbedarf eines Krankenhauses?

Der Leistungsbedarf eines Krankenhauses lässt sich nicht pauschalisieren. Beim Bedarf elektrischer Leistung eines Krankenhauses betrachtet man ein sehr heterogenes Feld von kleineren Krankenhäusern der Grundversorgung auf dem Land, die kaum eine Notfallversorgung bereithalten können, bis hin zu großen Unikliniken mit über 1.000 Betten. Im Bereich des Wasserbedarfs wird eine relative Vergleichbarkeit durch den Kennwert des Verbrauchs in Litern pro Bett und Tag geschaffen, eventuell existiert ein ähnlicher Kennwert auch für den Strombedarf. Wobei dieser Wert immer noch eine große Bandbreite bereithält zwischen den einzelnen Krankenhäusern. Darüber hinaus muss zwischen verschiedenen Netzen (Normalbetrieb, Notstromnetz, welches teilweise auch nochmal unterteilt wird in technisches, medizinisches und USV-versorgtes Notstromnetz und einem Netz zum Betrieb von Anlagen für Sicherheitszwecke, welche zusätzlich über eine USV verfügen) unterschieden werden, deren Ausprägung und Ausplanung zu weiterer Heterogenität zwischen den Krankenhäusern führt. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der monetäre Haushalt von Krankenhäusern dazu führt, dass solche Pflichtvorgaben wie das Vorhalten einer Notstromversorgung in manchen Fällen nur soweit ausgeführt werden, wie die Vorschriften es verlangen, da ein direkter Nutzen im operativen Geschäft keinen Mehrwert liefert.

- Normalbetrieb:
- Notstromnetz:
- Netz mit Anlagen für Sicherheitszwecke:

ganz unterschiedlicher Standard, Leistungsdatenweitergabe als Beispiel für einzelne Krankenhäuser wird geprüft, als Richtwert für den Leistungsbedarf könnte die VDI-Norm 3807 dienen (Verbrauchskennwerte von öffentlichen Einrichtungen)

- Gibt es krankenhausspezifisch räumliche Vorgaben zu beachten, unabhängig von Vorgaben in Normen für Technologien?

Das Platzangebot kann sich von Krankenhaus zu Krankenhaus deutlich unterscheiden. Grundsätzlich dürften Krankenhäuser in Stadtgebieten deutlich schärfere Anforderungen aufweisen als ein großes Uniklinikum oder ein Krankenhaus auf dem Land. Für jedes einzelne Krankenhaus muss dann auch geprüft werden, welche statischen und räumlichen Vorgaben aufgrund der Bestandsgebäude gemacht werden müssen. Zu klären wären zum Beispiel die Traglast des Daches, falls ein Notstromaggregat hier aufgestellt werden soll, oder die Gefahr des Ausfalls einer Notstromanlage aufgrund von Überschwemmung. Darüber hinaus muss standortabhängig geprüft werden, welche kommunalen Vorgaben gemacht werden, was den Bebauungsplan betrifft. Inwieweit Aspekte der Gefahrstofflagerung sowie der Störfallrichtlinie anzuwenden sind, sollte unter Umständen geprüft werden.

Ebenfalls bedeutend bei der Betrachtung der vorhandenen Räumlichkeiten ist die Lagerung von Kraftstoff. Oft wird Heizöl statt Diesel verwendet. Dieses kann durch die Zugabe von Additiven bis zu schätzungsweise einem Jahr bevorratet werden und das in Mengen für 24-stündige Versorgung. Für den Fall, dass darüber hinaus Kraftstoff benötigt wird, schließen einige Krankenhäuser Verträge mit Zulieferern ab. Die Möglichkeiten für zum Beispiel Stadtkrankenhäuser oder aber Landkrankenhäuser können unterschiedlich ausfallen, was unter anderem die Anzahl der möglichen Zulieferer betrifft. Eine Versorgungssicherheit für sämtliche Szenarien und vor allem über 24 oder 48 Stunden hinaus kann daher teilweise angezweifelt werden.

Und zuletzt sollten in jedem Fall Extremwetterereignisse bei der Planung von Notstromanlagen und der vorgesehenen Räumlichkeiten mit berücksichtigt werden.

- Wie sind die Verwaltung und die Bevorratung von Energieträgern in Krankenhäusern geregelt? (Personal, Logistik, extern eingekauft)

Sehr unterschiedlich, in der Regel sollte die Kraftstoffbevorratung von Krankenhäusern so ausgelegt sein, dass sie Kraftstoff für einen 24-stündigen Betrieb bevorraten (vgl. DIN VDE 0100 710). Dabei wird versucht, die Lagermenge immer so gering wie möglich zu halten, da der Kraftstoff nur für eine gewisse Zeit gelagert werden kann und dann unbrauchbar wird (unter Umständen Ausflockungen oder Auskristallisieren). Für den Bedarf darüber hinaus existieren teilweise Lieferverträge mit Zulieferern. Da eine solche Verfügbarkeitsgarantie Kosten verursachen kann, werden allerdings in vielen Fällen nur Verträge mit einem Zulieferer geschlossen. Es kann also dazu kommen, dass mehrere Einrichtungen mit demselben Zulieferer Verträge abgeschlossen haben, wodurch bei einem größeren Unglück

nicht unbedingt die Versorgung aller Kunden gesichert ist. Ob bei einer räumlichen Großschadenslage die Versorgung gesichert werden kann, ist unabhängig davon jedoch zusätzlich fraglich. Der Lieferant muss für diesen Fall ja auch notstromversorgt sein (oder eine Tankstelle).

- Findet in regelmäßigen Abständen eine Reevaluierung des Notstromkonzepts statt (zum Beispiel in einem bestimmten Zeitturnus oder nach der Anschaffung neuer größerer Anlagen)?

Auch hier ist die Umsetzung in den Krankenhäusern sehr heterogen. Es gibt Krankenhäuser, welche ein dauerhaftes Monitoring der Leistungsbedarfe ihrer unterschiedlichen Netze durchführen und diese anpassen. Allerdings sieht die Realität oft auch so aus, dass irgendwann bei der Planung eines Krankenhauses die Notstromversorgung mitgeplant wurde und dann nie mehr Anpassungen vorgenommen wurden. Es ist bereits vorgekommen, dass durch mehrfache Umnutzung von Räumlichkeiten Notstromnetze vom Netz genommen wurden oder die Stromlaufpläne der Krankenhäuser bei Renovierungen unbekannt waren.

- Habt ihr Zugriff auf Daten zu vorhandenen, eingesetzten Notstromversorgungsanlagen (als Benchmark, NEA und USV)?

Genau wie die Krankenhäuser sich unterscheiden, so unterscheiden sich auch die eingesetzten Notstromversorgungsanlagen. Eine Weitergabe von konkreten Daten zur Notstromversorgung der im Projekt NoWater betrachteten Krankenhäuser wird geprüft.

- Gibt es weitere Punkte aus Sicht des Rettungsingenieurwesens?

Welcher Punkt zuletzt immer wieder in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt ist, ist die Frage nach den Schnittstellen. Damit ist die Vernetzung der Krankenhäuser mit den Händlern, aber auch mit anderen Behörden oder der Bundeswehr, zur Versorgung mit Kraftstoff gemeint und auch die Vernetzung mehrerer Krankenhäuser einer Region, um sicherzustellen, dass auch im Falle eines flächendeckenden Stromausfalls eine zuverlässige medizinische Versorgung, bspw. durch Verteilung der Patienten, sichergestellt ist. Neben den organisatorischen Schnittstellen sind auch immer technische Schnittstellen anzupassen. Diese sind bei einer stationären Notstromversorgung kein Problem, bei einer mobilen Versorgung müssen jedoch Einspeisestellen vorhanden sein.

Eine grüne Notstromversorgung könnte vor allem bei einer Subventionierung oder anderweitigen Schaffung von monetären Vorteilen interessant für Krankenhäuser sein. Bei der Neuanschaffung von Anlagen spielt das vermutlich im Rahmen der

aktuellen politischen Situation auch eine Rolle (Klimawandel). Es ist vorstellbar, dass die Kombination von Notstrom mit der Produktion von Strom für den Regelbetrieb finanziell ansprechender sein könnte als die „reine N+1 Vorhaltung“ ohne Mehrwert.

- Wie schätzen Sie die Bedeutung der einzelnen Bewertungskriterien in Bezug auf die Notstromversorgung eines Krankenhauses ein?

Energetische Anforderungen		
Leistungsbereitstellung		k.A.
Regel- und Skalierbarkeit		k.A.
Energiekapazität		k.A.
Wirkungsgrad		k.A.
Energieträger-Verfügbarkeit		k.A.
Technische Anforderungen		
Größe und Gewicht	+	Die Anforderung an Größe und Gewicht der Notstromversorgung ist stark lageabhängig. In der Innenstadt könnte eine zu große Anlage ein größeres Problem darstellen als bei einem großen Uniklinikum mit Campus oder auf dem Land. Zudem auch Aufstellorte auf Dächern oder in Kellern etc.
Notwendige konstruktive Anlagenstruktur und Peripherie	-	Interessante Frage, die auch schon gestellt wurde, welche allerdings aus Zeitgründen noch nicht beantwortet wurde. Es ist durchaus vorstellbar, dass es Vorgaben in Vorschriften gibt. Diese sind wahrscheinlich sehr standortabhängig (Wohngebiet, Mischgebiet oder Industriegebiet). In der Presse wurde berichtet: Bei dem Klinikum in Leverkusen kam es zu einem Stromausfall, weil zunächst das Trafohaus und dann im Anschluss die Notstromanlage überschwemmt wurden. https://www.sueddeutsche.de/panorama/wetter-leverkusen-kurzschluss-durch-hochwasser-klinik-wird-geraemt-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-210715-99-389251 https://www.radioleverkusen.de/artikel/stromausfall-sorgt-fuer-chaos-1039217.html

Komplexität des Energiespeichers		k.A.
Anlaufzeit	+++	Für Krankenhäuser ist die Anlaufzeit in Normen und gesetzlichen Vorgaben geregelt. Die Vorgabe für Krankenhäuser liegt bei 15 s (vgl. DIN 6280-13: 1994-12).
Robustheit	++	Die Kraftstoffqualität kann bei hochmodernen Anlagen zu einem Problem werden, da moderne Motoren „schlechten Sprit“ nicht mehr so gut vertragen (Vergleich mit KFZ-Motoren alter Mercedes vs. neuer Euro 6d). Zudem können Erfordernisse an Additiven oder besonderen Betriebsstoffen zu Problemen führen. Da der Punkt der Lagerung von Kraftstoff ohnehin schon ein sehr verhalten behandeltes Thema darstellt, sollten Anlagen idealerweise in der Lage sein, auch mit Kraftstoff geringerer Qualität zurechtzukommen (Verwendung überalterter Kraftstoffe).

Organisatorische Anforderungen

Transport und Aufbau	-	In Krankenhäusern werden nur stationäre Systeme eingesetzt. Für diese spielt das Kriterium der Transportierbarkeit und des Aufbaus eine untergeordnete Rolle. Sollten darüber hinaus mobile Geräte benötigt werden, liegt die Bereitstellung dieser bei öffentlichen Einrichtungen wie dem THW, der Feuerwehr oder dem Energieversorger. Hier müssen Kompatibilität der Anlagen und der LKW-Plattform beachtet werden.
Versorgungsaufwand für den laufenden Betrieb	++	Dieser Punkt ist sehr wichtig bei der Planung einer ausfallsicheren Notstromversorgung. Je nach Kraftstoffart (Wasserstoff) müssen unter Umständen strenge Vorgaben (Gefahrgut) beachtet werden. Es muss in der Region auch einen Zulieferer für den Kraftstoff (bspw. Wasserstoff) geben. Oft wird die Zulieferung über Verträge mit Drittanbietern abgesichert, allerdings muss für eine Mindestlaufzeit von 24 h Kraftstoff auch im Krankenhaus vorgehalten werden (vgl. VDE 0100 710).
Wartungsaufwand	+	Die Notstromanlagen sollten möglichst einfach und unkompliziert zu warten sein.

Personal- und Qualifikationsbedarf		Die meisten Krankenhäuser verfügen über technische Abteilungen. Dass diese Leistung ausgegliedert wird, ist nicht bekannt, kann aber auch nicht ausgeschlossen werden. Die investierten Ressourcen (Zeit und Geld) zur Bereitstellung von Notstrom fallen aber deutlich unterschiedlich aus.
Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen	+++	Ersatzteile sollten möglichst einfach und schnell zu beschaffen sein. Die Beschaffung und der Austausch von defekten Bauteilen hat in der Vergangenheit zu einem längeren Ausfall der Notstromversorgung geführt. Eine solche Wartezeit im Notfall ist nicht zweckmäßig.
Genehmigungsaufwand		k.A.
Sicherheitsanforderungen		
IT-Sicherheitsstandards	0	Hier ist zu unterscheiden, ob die Überwachungs- und Steuereinheit mit anderer Infrastruktur vernetzt ist oder autark ist. Autarke Systeme sind in der Regel nicht als gefährdet zu betrachten.
Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung		k.A.
Vandalismus & Sabotage	---	Vandalismus spielt vermutlich in der Betrachtung von Notstromversorgungsanlagen keine wirkliche Rolle, da zunächst keine direkte Auswirkung zu erwarten ist. Erst im Notstromfall wird die Anlage benötigt und der Schaden würde zum Problem. Eine realistischere Gefahr wäre die Zerstörung durch Extremwetter. Konkrete Fälle von Vandalismus oder Sabotage der Notstromversorgung in Krankenhäusern sind nicht bekannt.
Marktorientierte Anforderungen		

Investitionskosten	+++	<p>Da Notstromanlagen in der Regel nur Kosten erzeugen und keinen monetären Mehrwert im operativen Geschäft liefern, ist es vorstellbar, dass nur der Pflichtteil, und das so günstig wie möglich, erfüllt wird. Es sind jedoch auch Krankenhäuser bekannt, die einen sehr hohen Standard an die Notstromversorgung setzen und die Thematik sehr ernst nehmen. Im Hinblick auf Business Continuity Management ist dies auch sehr zu begrüßen und ein kluger Zug.</p> <p>Bei der Verwendung von „neuen“ grünen Kraftstoffen sollte die Möglichkeit der Umrüstung von bestehenden Anlagen (BHKWs auf Wasserstoff) geprüft werden, um die Kosten niedriger zu halten.</p>
Operative Kosten		k.A.
Netzintegration	+	<p>Die Netzintegration und damit die Möglichkeit der Monetarisierung im Normalbetrieb könnte ein schlagkräftiges Verkaufsargument sein. Zu klären wäre die Frage, ob die aktuellen Vorschriften im Bereich der Notstromversorgung eine separate Anlage fordern und damit immer noch eine zusätzliche Anlage benötigt wird, oder nicht. Bei entsprechender Dimensionierung und Auslegung (n-1, n-2) würde zumindest technisch nichts dagegensprechen, solange die Notstromversorgung sichergestellt werden kann. Eine zusätzliche Nutzung der Notstromanlage im Normalbetrieb oder eine größere grüne Stromerzeugungsanlage zusätzlich als Notstromversorgung wäre sinnvoll.</p>

Datum: 15.09.2021

Interviewer: Patrick Möbius (HSU), Johannes Schröder (HSU)

Experten: Carsten Roth (THW), Frank Lahme (THW), Valentin Wiepcke (THW)

- Was für Anlagen stehen Ihnen als E-Gruppe zur Notstromversorgung zur Verfügung?

Das THW Bergedorf verfügt über kleinere Notstromaggregate bis 20 kVA und über einen 20-Fuß-Anhänger mit einem 200-kVA-Dieselaggregat. Zusätzlich betreut die E-Gruppe des THW Bergedorf einen weiteren 200-kVA-Generator der Feuerwehr. Alle Anlagen verwenden Synchrongeneratoren zur Stromerzeugung. Diese können bei Bedarf auch parallel betrieben werden und somit eine Last bis 600 kVA versorgen. Es ist angedacht, eine weitere Anlage mit 630 kVA anzuschaffen.

Neben den Generatoren verfügt die Einheit über diverse Anschlüsse, Leitungen, Sammelschienen und Widerstände. Dies ist notwendig, da keine einheitlichen Vorgaben bezüglich der Notstromeinspeisung existieren und das THW sich immer wieder neu auf die Situation vor Ort einstellen muss. Die drei Wärmewiderstände sind dreistufig einstellbar zwischen jeweils 10 und 30 kW. Damit lässt sich also eine Gesamtlast von 90 kW einstellen. Diese dient dazu, eine gewisse Grundlast bereitzustellen und Lastsprünge, welche nicht selten bis zu 100 kW entsprechen können, auszugleichen. An dem 200-kVA-Dieselgenerator ist eine 25 m lange Anschlussleitung vorgesehen, zusätzlich stehen weitere 25 m Leitungen zur Verlängerung zur Verfügung.

- Für welche Einsatzdauer sind Sie im Normalfall gerüstet?

Anders als die Feuerwehr, die bereits nach wenigen Minuten vor Ort ist und die Schadensursache bekämpft und den Einsatz dann beendet, ist der zeitliche Rahmen eines Einsatzes des THW ein anderer. Die meisten Einsätze sind nach 12 h abgeschlossen, wobei die eigentliche Bereitstellungsphase oft nur drei bis vier Stunden andauert. Größere Einsätze, wie der Hochwassereinsatz im Ahrtal, können aber auch schon mal mehrere Tage oder Wochen dauern. Am Einsatzort ist das THW

üblicherweise ein bis drei Stunden nach dem Ereignis. Für ein solches Einsatzszenario sind auch Kraftstoffreserven für den Dieselgenerator im Tank vorhanden. Bei längeren Einsatzzeiten muss der Kraftstofftank nachbetankt werden.

Die E-Gruppe des THW besteht aus neun Personen. Durch die modulare Struktur des THW innerhalb einer Einheit, aber auch bundesweit, kann aber je nach Einsatzbedingungen die Personalstärke angepasst oder weitere Gruppen zur Unterstützung hinzugezogen werden. Bei längeren Einsätzen wird im Schichtbetrieb gearbeitet.

- Unter welchen Rahmenbedingungen finden Ihre Einsätze statt?

Die Fahrzeuge und Ausrüstung stehen abfahrbereit in der Halle des THWs. Die Alarmierung findet in der Regel über die Regionalstelle vom THW-HH oder der Feuerwehreinsatzzentrale statt, welche dann das betroffene Personal alarmiert. Die E-Gruppe besteht aus sechs bis neun Personen. Die meisten davon sind elektrische Fachkräfte, welche zusätzlich auf Lehrgängen für die Anlagen geschult wurden. Mit den LKW (in der Regel 18-Tonner) wird der Dieselgenerator zum Einsatzort gebracht. Grundsätzlich kann dieser überall eingesetzt werden, wo ein Zugang mit dem Fahrzeug möglich ist. Um auch in sensiblen Gebieten, wie Wohngebieten oder Umweltschutzzonen, arbeiten zu können, verfügt der Aufbau über entsprechende Anlagen, wie Schallisolierung des Dieselmotors und -generators und eine Auffangwanne unter dem gesamten Tank und Motor. Da die meisten Einsätze unter ungünstigen Umweltbedingungen stattfinden, da eben diese Bedingungen oft mitursächlich für den Einsatz sind, befindet sich die gesamte Notstromanlage innerhalb eines Korpus mit mehreren seitlichen Zugangsklappen auf dem Anhänger. Dadurch sind die Anlagen gegenüber den Umwelteinflüssen geschützt.

Der Aufbau und Anschluss vor Ort benötigt ca. 30-45 Minuten. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Ausführungen der Einspeisepunkte und teilweise unklaren Situationen vor Ort, kann dieser Prozessschritt auch schonmal ein wenig länger dauern. Wir kooperieren bei Anschlüssen an einem Verknüpfungspunkt immer mit den Verantwortlichen, z. B. Stromnetz Hamburg, oder bei Inselnetzen mit dem jeweiligen Anlagenbetreiber.

- Wie geeignet ist die Ausrüstung für Ihre Aufgaben?

Zu den Aufgaben gehört beispielsweise die Bereitstellung des BR500, wie er aktuell auch im Ahrtal zum Einsatz kommt. Dabei sind Dieselgeneratoren eine Technologie, die sehr zuverlässig ist. Kleinere technische Defekte kommen vor. Grundsätzlich sind aber keine besonderen Ausfälle bekannt. Allerdings steigen die Leistungsanforderungen immer weiter an und größere Anlagen mit mehr Leistung wären

von Vorteil. Vor allem in Großstädten werden immer wieder die Leistungsgrenzen erreicht.

Als umweltfreundlichere Alternative zum herkömmlichen Dieselgenerator würde eine Lösung favorisiert werden, bei der die bestehenden Anlagen nicht ersetzt, sondern durch technische Maßnahmen, wie beispielsweise die Umrüstung auf den Betrieb mit synthetischen Kraftstoffen oder Wasserstoff, weiter als grüne Anlagen betrieben werden können. Die Verwendung einer mobilen grünen Notstromanlage während der Bereitstellungsphase ist eher kritisch zu bewerten, da weder die Fläche zur Verfügung steht noch sichergestellt werden kann, dass im Notstromfall alle Anlagen (vor allem der Batteriespeicher) sofort voll einsatzfähig sind. Bei beispielsweise einer stationären PV-Anlage auf dem Dach, welche zusätzlich als Notstromanlage eingesetzt werden soll, müssten die entsprechenden Anlagenteile wie Speicher entsprechend redundant, n-1 oder n-2 ausgelegt werden.

- Wie schätzen Sie die Bedeutung der einzelnen Bewertungskriterien in Bezug auf die Notstromversorgung ein?

Energetische Anforderungen

Leistungsbereitstellung	+++	Mehr Leistung ist immer besser. Besonders in Großstädten kam es bereits zu Engpässen in der Leistungsbereitstellung. Neben den Generatoren fehlt es aber auch an geeigneten Anschlüssen und Übertragungswegen, um die Leistung zum Verbraucher zu bringen. Mehrere Anlagen können an Sammelschienen parallel betrieben werden, aber den Strom von der Sammelschiene an das Notstromnetz zu bekommen, stellt teilweise eine Herausforderung dar.
Regel- und Skalierbarkeit	++	Es ist sehr wichtig, schnell und unkompliziert auf die Bedingungen vor Ort reagieren zu können. Dazu zählt auch, Lastsprünge bis zu 100 kW sauber durchfahren zu können.
Energiekapazität	+	In der Regel reicht eine Versorgungsdauer von 10-12 Stunden für die meisten Einsätze völlig aus. Darüber hinaus kann relativ zeitunkritisch und ohne Versorgungsunterbrechung nachgetankt werden.

Wirkungsgrad	-	<p>Der Wirkungsgrad spielt in der Notstromversorgung eine eher untergeordnete Rolle. Im Notstromfall ist dieser sogar egal. Allerdings wirkt sich der Wirkungsgrad in der Dimensionierung auf andere Kriterien aus, wie die Leistungsbereitstellung, die Größe und das Gewicht der Anlage, welche wiederum von Bedeutung sind.</p>
--------------	---	--

Energieträger-Verfügbarkeit	+	<p>Die Anlage sollte unabhängig von Umwelteinflüssen immer funktionieren. Im Einsatzfall kann nicht auch noch Rücksicht auf die Verfügbarkeit der Energiebereitstellung genommen werden.</p> <p>Darüber hinaus verfügt das THW nur über begrenzten Lagerplatz. Daher ist es wichtig, dass die zum Betrieb der Notstromanlage benötigten Ressourcen auch von anderen Stellen (z. B. Tankstellen) bezogen und beispielsweise mit Fahrzeugen zum Einsatzort transportiert werden können. Hierbei sind vor allem die maximalen Gefahrgutmengen und die StVO-Zulassungen zu beachten.</p>
-----------------------------	---	--

Technische Anforderungen

Größe und Gewicht	++	<p>Hier gilt es vor allem die transportablen Größen nicht zu überschreiten. Typische Fahrzeuge des THW sind 18-Tonnen-LKW. Grundsätzlich gilt aber je kleiner, desto besser, um auch an schwerer zugängliche Einsatzorte zu gelangen.</p>
-------------------	----	---

Notwendige konstruktive Anlagenstruktur und Peripherie	++	<p>Besonders für kleinere, kürzere Aufträge wäre eine umfangreiche notwendige Peripherie ein Ausschlusskriterium. Die Anlagen sollten möglichst schnell, idealerweise im verladenen Zustand, einsatzbereit sein. Selbst für eine Zeltstadt, die für einen längeren Zeitraum aufgebaut wird, ist sofort Strom notwendig.</p>
--	----	---

Komplexität des Energiespeichers	+	<p>Der Energiespeicher sollte möglichst einfach einsetzbar sein. Es kann nicht für jeden Einsatz garantiert werden, immer besondere Schutzanforderungen, wie ständige Bewachung durch Personal oder Absperrungen der Notstromanlage, zu gewährleisten.</p>
----------------------------------	---	--

Anlaufzeit	-	Die Anlaufzeit, also die Zeit zum Hochfahren des Dieselgenerators, spielt in der Regel keine bedeutende Rolle bei der Planung des Einsatzes, da diese Zeit im Verhältnis zur benötigten Aufbau- und Anschlusszeit (ca. 15 bis 20 Minuten) zu vernachlässigen ist. Generell sind der Anfahrtsweg und die Alarmierungsverzögerung oft um Größenordnungen länger.
Robustheit	++	Da die Erfahrung zeigt, dass die meisten Einsätze unter überwiegend schlechten Wetterbedingungen stattfinden, sollte die Notstromanlage auch bei schlechten Bedingungen ohne Einschränkungen einsatzbereit sein und bleiben.
Organisatorische Anforderungen		
Transport und Aufbau	+	Für Transport und Aufbau stehen der E-Gruppe üblicherweise 6-9 Leute zur Verfügung. Der Aufbau dauert üblicherweise nicht länger als 30 Minuten.
Versorgungsaufwand für den laufenden Betrieb	++	Die Versorgung im laufenden Betrieb gestaltet sich zurzeit recht einfach. Dieseldieselfkraftstoff ist in Deutschland überall einfach zu beschaffen. Sobald die Anlage läuft, sind in der Regel keine aktiven Maßnahmen notwendig. Prinzipiell ist eine einfache Versorgung im laufenden Betrieb ein relevantes Kriterium zur Bewertung von Notstromanlagen, da sich hieraus der Personalaufwand und ggf. die Schichtstärke bestimmen lassen.
Wartungsaufwand	+	Einfache Instandhaltungsarbeiten sollten selbst und ohne Fachbetriebe möglich sein und könnten auch monatlich gewährleistet werden. Für größere Wartungsarbeiten stehen im THW zentrale Werkstätten der Regionalverbände zur Verfügung.
Personal- und Qualifikationsbedarf	+	Qualifiziertes Personal ist rar. Das Personal des THW besteht fast vollständig aus Freiwilligen. Die Mitglieder der E-Gruppe sind fast alle Elektrofachkräfte und werden auf Lehrgängen zum Betrieb der Notstromanlagen geschult. Zusätzlich benötigte Schulungsmaßnahmen, mit einem größeren zeitlichen Aufwand darüber hinaus, wären nur sehr schwierig umzusetzen.

Beschaffungsaufwand von Ersatzteilen und Betriebsstoffen	+	Es sollten Ersatzteilgarantien existieren und diese müssten schnell verfügbar sein. Aktuell werden nur einzelne Verschleißteile bevorratet.
--	---	---

Genehmigungsaufwand		k.A.
---------------------	--	------

Sicherheitsanforderungen

IT-Sicherheitsstandards	0	Die Dieselgeneratoren des THW verfügen über keine IT-Schnittstellen. Diese sind weder nötig noch gewollt.
-------------------------	---	---

Anlagensicherheit und Gefährdungsbetrachtung	0	Das Einsatzgebiet der E-Gruppe befindet sich üblicherweise nicht im Epizentrum der Gefahrensituation. Allerdings sind die Anlagen allen Wetterlagen ausgesetzt und sollten diesen auch standhalten, ohne zu Schaden zu kommen oder für Personen gefährlich zu werden. Aufgrund der großen Anzahl von Einsatzkräften mit unterschiedlichen Ausbildungen, Einsatzschwerpunkten und Schulungen kann nicht immer ein großer Sicherheitsabstand zur Notstromanlage gewährleistet werden. Es sollte ohne Schäden möglich sein, die Anlage zu passieren.
--	---	---

Vandalismus & Sabotage	0	Vandalismus kann nicht ausgeschlossen werden. Die Anlagen des THW sind aber abschließbar.
------------------------	---	---

Marktorientierte Anforderungen

Investitionskosten		k.A.
--------------------	--	------

Operative Kosten		k.A.
------------------	--	------

Netzintegration	--	Lösungsansätze wie die Netzintegration mobiler Notstromanlagen in der Bereitstellungsphase stellen einen Zielkonflikt mit der Aufgabe einer Notstromstromversorgung dar und sind daher nicht sinnvoll.
------------------------	----	--

Datum: 14.10.2021

Interviewer: Daniel Apenbrink (HSU), Robert Hankers (HSU),
Dennis Hamann (HSU)

Experte: Carsten Büddig

- Welche Anforderungen müssen bei der Planung einer Notstromversorgung beachtet werden?

Bei der Planung einer Notstromversorgung sind unterschiedliche Punkte zu beachten. Hierbei muss zunächst geprüft werden, für welchen Zweck die Versorgung gedacht ist. Je nachdem, ob es sich um eine Versorgung fürs Krankenhaus, um eine Notstromversorgung für Sicherheitszwecke oder für andere Zwecke handelt, sind unterschiedliche Vorgaben zu erfüllen. Im Falle des Krankenhauses müssen alle Verbraucher 15 Sekunden nach dem Ausfall der Stromversorgung wieder versorgt werden. Zudem ist für einige Bereiche auch eine USV nötig. Eine Sicherheitsstromversorgung muss die Stromquelle auch im Brandfall zur Verfügung stellen und darf dabei nicht ausfallen. Dann müssen weitere Punkte betrachtet werden, die allerdings auch von der Art der Verbraucher und deren Verhalten beeinflusst werden. Hierzu zählen beispielsweise das Lastzuschaltverhalten der Aggregate, die Aufrechterhaltung der Spannungs- und Frequenzstabilität, Ausregelzeiten und Lastübernahmezeiten. Zudem muss das Notstromaggregat auch die nötige Kurzschlussleistung aufbringen, damit die Sicherung im Notfall auslösen kann. Ansonsten gibt der Bitkom-Leitfaden zur Betriebssicherheit in Rechenzentren gute Anhaltspunkte für die Notstromversorgung.

- Sie haben bei der Planung der Notstromversorgung im Bundeswehrkrankenhaus Hamburg mitgewirkt. Welche Notstromaggregate sind im Bundeswehrkrankenhaus vorhanden?

Für das Bundeswehrkrankenhaus sind vier Dieselaggregate mit jeweils 2,1 MW Leistung geplant.

- Für wie viele Stunden haben Sie Kraftstoff bevorratet?

Die Kraftstoffversorgung ist für einen Zeitraum von 72 Stunden sichergestellt. Für diesen Zeitraum wird die Brennstoffbevorratung eigentlich immer ausgelegt.

- Gibt es auch Probleme, die bei Dieselgeneratoren auftreten?

Bei modernen turboaufgeladenen Dieselmotoren ist es nicht möglich, beliebig hohe Lasten gleichzeitig zuzuschalten. Die Zuschaltung muss gestaffelt erfolgen. Beispielsweise darf der erste Laststoß nicht höher ausfallen als 50 % der maximalen Leistung des Dieselgenerators. Die maximale Höhe der weiteren Laststöße ist dann vom Motor abhängig, fällt allerdings in jedem Fall geringer aus als beim ersten. Trotzdem müssen im Falle von Krankenhäusern nach 15 Sekunden sämtliche Lasten durch das Aggregat versorgt werden.

- Inwiefern wird die Einbindung von nachhaltiger Technologie in Betracht gezogen?

Die meisten Betreiber von Notstromanlagen wollen Dieselaggregate haben und betrachten Alternativen kaum bis gar nicht. Gelegentlich gibt es auch Anfragen bezüglich nachhaltiger Technologien. Dies sind allerdings Einzelfälle.

- Können/dürfen die Aggregate netzdienlich verwendet werden?

Notstromaggregate können prinzipiell auch netzdienlich verwendet werden oder andere Aufgaben bei der Stromversorgung übernehmen. So gibt es in manchen Bereichen auch Notstromanlagen, die zum Abfangen von Lastspitzen genutzt werden. Dies muss allerdings mit dem Netzbetreiber abgesprochen werden. Bei Netzparallelbetrieb sind noch weitere Schutzeinrichtungen nötig und der Netzbetreiber kann steuernd auf die Anlage wirken. Teilweise werden auch BHKWs zur Nullbezugserzeugung genutzt.

- Ist eine Erweiterung des Geschäftsmodells eines Krankenhauses um netzdienliche Aspekte sinnvoll?

Bei Krankenhäusern werden netzdienliche Aspekte eigentlich nicht betrachtet.

- Gibt es aus ihrer Sicht Technologien, die besonders interessant sind?

Aus meiner Sicht können rotierende Energiespeicher für die Notstromversorgung, insbesondere für die USV von Verbrauchern mit Blindleistungsanteil, sehr interessant sein, da diese auch die nötige Blindleistung umschaltfrei bereitstellen können. Es gibt Firmen, die solche Energiespeicher im Verbund mit Dieselaggregaten bereits anbieten.

Experteninterview Sebastian Birk, Technischer Leiter Agaplesion Kliniken

Datum: 21.10.2021

Interviewer: Patrick Möbius (HSU), Daniel Apenbrink (HSU)

Experte: Sebastian Birk (Technischer Leiter, AGAPLESION FRANKFURTER
DIAKONIE KLINIKEN)

- Wie hoch ist der Leistungsbedarf eines Krankenhauses?

Der Leistungsbedarf im Krankenhaus lässt sich aus den aufgezeichneten Stromlastprofilen nachvollziehen. Im Jahr 2020 wurde die höchste Leistung mit ca. 900 kW aufgezeichnet. Für die Notstromversorgung können ca. 400 kW angenommen werden.

Eine zukünftige Vergrößerung des Notstrombedarfs kann nicht prognostiziert werden. Der Hintergrund ist, dass die Notstromversorgung als letzte Möglichkeit der elektrischen Energieversorgung zu verstehen ist. Das heißt, dass akute Notfälle weiter versorgt und der grundlegende Betrieb des Krankenhauses aufrechterhalten wird. Anlagenteile wie Lüftung, Wasserversorgung und Brandschutzsysteme können weiter betrieben werden. Dennoch wird der normale, medizinische Betrieb auf ein Minimum reduziert.

- Welche Leistung hat das verwendete Notstromsystem?

Es wird ein 16-Zylinder-Diesellaggregat von Heinkel eingesetzt. Der angetriebene Generator von AVK hat eine Leistung von 1.000 kVA.

Eine USV mit einer Kapazität von 65 Ah kann über den Zeitraum von drei Stunden eingesetzt werden.

- Für wie viele Stunden haben Sie Diesel bevorratet, bzw. wie viele Liter?

Insgesamt werden 11.000 l Diesel bevorratet. Davon sind 1.000 l in unmittelbarer Nähe zum Dieselgenerator und weitere 10.000 l in einem separaten Tank bzw. Raum gelagert. Im Vollastbetrieb reicht der Tank für 50 Stunden und bei normaler Belastung für 72 Stunden.

- Wie wird bei einem Versorgungsbedarf darüber hinaus die Versorgung sichergestellt (vertragliche Liefergarantien)?

Leider gibt es keine Lieferverträge. Die Versorgung mit Diesel außerhalb der Geschäftszeiten der Lieferanten gestaltet sich schwierig, da Gefahrstofftransporte beispielsweise am Wochenende und an Feiertagen ohne Erlaubnis eine Ordnungswidrigkeit darstellen.

- Was für einen Kraftstofftank haben Sie?

Es handelt sich um einen Kunststofftank, welcher in einer gemauerten Wanne aufgestellt ist.

- Wo im Gebäude ist die Notstromanlage untergebracht?

Notstromaggregat und Tank befinden sich im Untergeschoss des Krankenhauses. Die Räume wurden für Tank und Aggregat entsprechend angepasst. Die Abgase des Aggregates werden über einen Schornstein nach draußen abgeführt. Dieselmotor und der Raum werden luftgekühlt. Eine spezielle Klimatisierung ist nicht vorhanden.

- Besitzt das Krankenhaus eine PV-Anlage auf dem Dach oder andere erneuerbare Energieerzeuger?

Eine PV-Anlage auf dem Dach gibt es nicht. Generell ist der Platz auf dem Dach und auf dem Krankenhausbereich bereits verplant.

- Wie viel Personal ist für den Betrieb und die Wartung der Notstromanlage zuständig, mit welcher Qualifikation?

Mitarbeitende der Haustechnik (Elektrik und Sanitär) führen zwei bis drei Mal pro Woche eine Sichtprüfung sämtlicher Gebäudetechnik durch. Dazu gehört auch das Notstromaggregat. Einmal im Monat wird darüber hinaus ein Testlauf durchgeführt.

Einmal im Jahr wird ein sogenannter Blackout-Test durchgeführt und die Wartung der Anlage durch eine externe Firma durchgeführt. Beim Blackout-Test wird der Ausfall der primären Energieversorgung simuliert. Dabei wird entweder der Trafo abgeschaltet oder der Hauptschalter getrennt.

- Wie wird die Notstromanlage im Notstrombetrieb überwacht?

Die Anlage ist digital in die Gebäudeleittechnik integriert. Diese Funktion ist auch im Notstromfall gegeben. Auch im Notstromfall agiert die Anlage automatisch und muss nicht überwacht werden.

- Weitere Informationen

Der Einsatz alternativer Notstromerzeugungsanlagen durch beispielsweise BHKW scheitert derzeit an steuerrechtlichen Hemmnissen beispielsweise durch die EEG-Umlage.

Datum: 14.10.2021

Interviewer: Dennis Hamann (HSU)

Experte: Emanuel Graser

- Wie hoch sind die Anschaffungskosten, welche für Ihre Anlagen mit einer Leistung von 50 kW und 75 kW ungefähr anfallen?

Ich kann nur Erfahrungswerte und keine genauen Preise für Anlagen nennen, die in der Schweiz aufgestellt werden. Aber hier belaufen sich die Preise für Anlagen mit 50 kW auf ungefähr 85.000 € und die für Anlagen mit 75 kW auf ungefähr 110.000 €.

- Fallen weitere Kosten an und wenn ja, in welcher Höhe müssen diese kalkuliert werden?

Es fallen weitere Kosten für Infrastruktur, Planung, Inbetriebnahme und Weiteres an. Hierbei sollte zusätzlich mit 30 % der Anschaffungskosten geplant werden.

- Wie häufig müssen Ihre Anlagen gewartet werden?

Für die meisten Anlagen werden Wartungen nach 4000 Betriebsstunden fällig. Für die größeren Anlagen reduzieren sich diese. Bei den Anlagen mit 50 kW Leistung stehen nach 2000 und bei Anlagen mit 75 kW nach 1500 Betriebsstunden Wartungen an.

Datum: 02.10.2021

Interviewer: Dennis Hamann (HSU)

Experte: Robin Wenk

- Wie werden die aufgestellten BHKWs mit Gas versorgt?

Die Anlagen können sowohl aus einem Tank als auch aus dem öffentlichen Netz versorgt werden. Es besteht allerdings auch die Möglichkeit, BHKWs mit Biogas zu betreiben und das Gas direkt aus einer Biogasanlage zu beziehen.

- Gibt es häufig Störungen, die an den BHKWs auftreten?

Eigentlich laufen die Anlagen sehr stabil und störungsfrei. Anfällig sind die Anlagen nur, wenn diese nur unregelmäßig in Betrieb sind. Dann treten vor allem beim Anfahren Fehler auf. Idealerweise sind BHKWs durchgehend in Betrieb.

- Gibt es BHKWs, die als Notstromaggregate betrieben werden?

Ja, die gibt es. Allerdings ist das nur sehr selten der Fall. Dies war auch lange vonseiten der Netzbetreiber nicht erlaubt. Die Anlagen, die als Notstromanlagen laufen, sind Inselanlagen, die komplett vom Stromnetz getrennt sind.

- Gibt es Anlagen, die parallel laufen.

Ja, das gibt es.

- Können BHKWs gut auf Lastsprünge reagieren?

Das funktioniert ganz gut. Wir haben einige Anlagen, die stromgeführt fahren, also nach dem jeweiligen Stromverbrauch geregelt werden.

- Gibt es auch BHKWs, die nur zur Stromproduktion gedacht sind?

Das Problem hierbei ist, dass die Wärme als Abfallprodukt abgeführt werden muss, um ein Überhitzen zu vermeiden. Aber es gibt Anlagen, die eigentlich nur zur Stromproduktion eingesetzt werden. Beispielsweise nutzt ein Kunde die Anlage, um seinen Pool zu heizen, weil nur der Strom gebraucht wird. Der Pool dient somit quasi als Wärmetauscher.

- Was für Motoren sind bei BHKWs eingebaut?

Bei den meisten sind Ottomotoren eingebaut. Es gibt auch welche, die Sterlingmotoren nutzen, welche sich aus meiner Erfahrung allerdings als sehr anfällig erwiesen haben.



Bisherige Publikationen

Unter www.bbk.bund.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Mediathek/Mediathek_Formular.html?cl2Categories_FormatMediathek=reihenforschungimbevoelkerungsschutz finden Sie, zusätzlich zu den Internetveröffentlichungen, die meisten Bände als PDF zum Download. Die Printversion können Sie im Internet oder über die Adresse Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Postfach 1867, 53008 Bonn bestellen.

Forschung im Bevölkerungsschutz

- 27 **Katastrophenkommunikation und soziale Medien im Bevölkerungsschutz – Kommunikation von Lageinformationen im Bevölkerungsschutz im internationalen Vergleich (KOLIBRI)**
S. Wahl und L. Gerhold
ISBN: 978-3-949117-02-2
-
- 28 **Definition von Schutzzielen für Kritische Infrastrukturen (DESKRIS)**
L. Gerhold und A. Schuchardt (Hrsg.)
ISBN: 978-3-949117-03-9
-
- 29 **Sozialwissenschaftliche Aspekte der Warnung der Bevölkerung (SAWaB)**
L. Künzer und S. Tomczyk (Hrsg.)
ISBN: 978-3-949117-05-3
-
- 30 **PSNV für Kinder und Jugendliche in komplexen Schadenslagen (KIKAT)**
H. Karutz, A.-K. Fegert und V. Blank-Gorki
ISBN: 978-3-949117-06-0
-
- 31 **Vulnerabilität und Kritikalität des Bildungswesens in Deutschland
Eine Betrachtung aus Sicht des Bevölkerungsschutzes (BeKRITIS)**
H. Karutz, C. Posingies und J. Dülks
ISBN: 978-3-949117-11-4

-
- 32 **Schnelle und mobile Detektion von gasförmigen Gefahrstoffen mittels GC-IMS für die zivile Sicherheit (GC-IMS ZS)**
S. Liedtke, W. Vautz, S. Sielemann, L. Hartmann und M. Erve
ISBN-13: 978-3-949117-16-9
-
- 33 **Identifizierung Kritischer Infrastrukturen und Entwicklung einer Methodik zur räumlichen Kritikalitätsanalyse für die leitungsgebundene Trinkwasserversorgung.**
M. Riegel, D. Bethmann, F. Brauer, S. Sturm und F. Sacher
ISBN 978-3-949117-18-3
-
- 34 **Das Lagebild Bevölkerungsschutzverhalten in der Stabsarbeit**
M. Mähler, G. Hofinger, C. Becker und L. Künzer
ISBN: 978-3-949117-22-0
-
- 35 **Einsatz erneuerbarer Energieanlagen und -speicher zur mobilen und stationären Notstromversorgung**
P. Möbius, J. Schröder, D. Apenbrink, D. Hamann, R. Hankers und D. Schulz
ISBN: 978-3-949117-19-0

Kongressbände

-
- I **Forschung für den Bevölkerungsschutz. Fachkongress vom 12.–14. Januar 2023**
ISBN: 978-3-949117-25-1

Sonderveröffentlichungen

-
- 2023 **Ethische Reflexion im Bevölkerungsschutz – Leitfaden für eine ethisch reflektierte Entscheidungsfindung im Sanitäts- und Betreuungsdienst**
2023/ISBN: 978-3-949117-17-6

