

Facharbeit

gemäß § 21 VAP2.2-Feu NRW

Auswirkungen von zunehmend dezentraler Energieversorgung auf die Einsätze der Feuerwehr

von

Ing. **Carsten Mohr, M.Sc.**

Brandreferendar

Berliner Feuerwehr

Ausgabe Thema: Bruchsal, den 24.09.2021

Abgabe Facharbeit: Münster, den 20.12.2021

Aufgabenstellung

Die Energiewende ist mit dem immer weiter voranschreitenden Klimawandel eine der größten Herausforderungen für unsere Zukunft. Mit unseren aktuellen Möglichkeiten zur klimaneutralen Energieerzeugung wird die Speicherung der gewonnenen Energie immer wichtiger.

Erörtern Sie, welche Auswirkungen die zunehmenden Energieerzeugungs- und Versorgungssysteme zur dezentralen Energieversorgung auf Einsätze der Feuerwehr haben werden. Beurteilen Sie, inwieweit sich die Einsatztaktik der Feuerwehr hierauf anpassen muss und stellen Sie dar, welche neuen Vorgehensweisen oder Einsatzmittel zukünftig erforderlich werden.

Kurzfassung

In dieser Facharbeit werden die Auswirkungen der sich ändernden Energieversorgung auf die Einsätze der Feuerwehr beschrieben und diskutiert.

Es wird zunächst auf den fachlichen Hintergrund eingegangen. Dabei werden auch die strukturellen Änderungen im Energieversorgungssektor skizziert. Sodann wird zwischen dezentraler Energieversorgung und dezentraler Energieerzeugung differenziert sowie auf die Sektorenkopplung und die möglichen Entwicklungen bei der Stromversorgung eingegangen. In diesem Abschnitt wird auch erörtert, warum die Entwicklungen der nächsten Jahre nicht vollends abzusehen sind und interdisziplinär sehr kontrovers diskutiert werden.

Anschließend werden Einsatzszenarien erläutert, Problemstellungen beschrieben und technische sowie taktische Möglichkeiten aufgetan. Mit Betrachtung finden - falls nötig - zusätzlich anzuschaffende Einsatzmittel. Die Einsatzszenarien und ihre Relevanz sind auf Grundlage diverser geführter Fachgespräche abgeleitet worden. Im Vordergrund steht der Umgang mit Speichermedien, die in der Fachwelt der Feuerwehr für erhebliche Diskussionen gesorgt haben. Auf die Blackout-Problematik, die eine der größten Einflüsse auf das Risikomanagement der Feuerwehren hat, wird nur am Rande eingegangen.

Schlussfolgernd kann Wissen und Ausbildung als Hauptanforderung für die Bewältigung der Einsätze im Zusammenhang mit dezentraler Energieversorgung genannt werden. Eine notwendige flächendeckende Einführung zusätzlicher Einsatzmittel oder ein eklatantes technisches oder taktisches Defizit konnte nicht aufgetan werden. Um den Unsicherheiten bei vielen Feuerwehrangehörigen (insbesondere bei Führungskräften) zu begegnen, sollten die Themen vor allem in der Aus- und Fortbildung aufgegriffen werden. Technische und taktische Herangehensweisen sind bereits vielseitig vorhanden. Es wird davon ausgegangen, dass viele dieser Einsätze in Zukunft zu Routineeinsätzen gehören werden. Was Feuerwehren weiterhin vor Probleme stellt, ist das technisch-spezifische Wissen z. B. bei Fahrzeugen, da hier einheitliche Kennzeichnungen, Datenbanken und Wissensbereitstellung als defizitär anzusehen sind.

Abstract

This paper describes the impact of the changing energy supply on the incidents of fire departments.

At first the technical background is discussed. The paper distinguishes between decentralized energy supply and decentralized energy generation and discusses integrated energy and possible developments in power supply. It also shows why the developments of the next few years cannot be predicted and are subject of highly controversial interdisciplinary debates.

Based on operational scenarios problems are described and technical as well as tactical solutions are identified. If necessary, additional resources are considered. The given information is based on literature research and professional discussions. The blackout problem, which has one of the greatest influences on the risk management of fire departments (and on our society), is discussed in passing.

In conclusion, knowledge and training are outlined as the main requirements to face future incidents related to the changing energy supply and decentralized energy generation. Many technical and tactical approaches are already available and need to be trained and imparted. Specific technical knowledge (e.g. special knowledge about vehicles) needs to be rehashed and provided properly for daily use.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	VI
SYMBOLVERZEICHNIS.....	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VIII
TABELLENVERZEICHNIS	VIII
1 EINLEITUNG	1
1.1 KOMPLEXITÄT UND RELEVANZ.....	1
1.2 ABGRENZUNG DES THEMAS	2
1.3 METHODIK	3
1.4 AUFBAU DER ARBEIT	4
2 HINTERGRUND.....	5
2.1 DEZENTRALE ENERGIEERZEUGUNG.....	5
2.2 STROMNETZAUFBAU	6
2.3 ENTWICKLUNGEN IN DER ENERGIEVERSORGUNG.....	9
3 ERÖRTERUNG.....	10
3.1 GEFÄHRENDISKUSSION ANHAND VON EINSATZSzenariEN.....	10
3.1.1 <i>Stromausfall</i>	10
3.1.2 <i>Lithium-Ionen-Akkumulatoren</i>	11
3.1.3 <i>Hausspeicher</i>	14
3.1.4 <i>Großbatteriespeicher und Quartierspeicher</i>	14
3.1.5 <i>Elektrofahrzeuge</i>	15
3.1.6 <i>Brennstoffzellen</i>	17
3.1.7 <i>Dezentrale Kraftwerke und Heizungssysteme</i>	17
3.1.8 <i>Power-to-X</i>	17
3.1.9 <i>Biogasanlagen</i>	18
3.1.10 <i>Photovoltaik-Anlagen</i>	18
3.1.11 <i>Windenergieanlagen</i>	18
3.1.12 <i>Unwetter</i>	19
3.1.13 <i>Hochspannungsgleichstromübertragung</i>	19
3.2 SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	19
3.2.1 <i>Einsatztaktik</i>	19
3.2.2 <i>Einsatzmittel</i>	19
4 FAZIT UND AUSBLICK.....	20
4.1 LIMITATION	20
4.2 AUSBLICK	20
LITERATURVERZEICHNIS.....	21
ANHÄNGE	I
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	III

Abkürzungsverzeichnis¹

IIC	Gefahrengruppe 2 C nach Feuerwehrdienstvorschrift 500 ²
AC	<i>Alternating Current</i> (Wechselstrom bzw. Wechselspannung)
AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren
BMA	Brandmeldeanlage(n)
C-Gefahr	Chemische Gefahr
CNG	<i>Compressed Natural Gas</i> (unter Druck stehendes Erdgas)
DC	<i>Direct Current</i> (Gleichstrom bzw. Gleichspannung)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
Ex-Bereich	Explosionsbereich
FwDV	Feuerwehrdienstvorschrift
HV	Hochvolt
KRITIS	Kritische Infrastrukturen
Li-Ion	Lithium-Ionen(-Akkumulatoren)
LNG	<i>Liquefied Natural Gas</i> (druckverflüssigtes Erdgas)
LPG	<i>Liquefied Petroleum Gas</i> (druckverflüssigtes Butan-Propan-Gemisch)
PV	Photovoltaik

¹ Abkürzungen innerhalb von Quellenangaben, bspw. Gesetzesabkürzungen oder Firmen- oder Gruppennamen, sind hier nicht aufgeführt. Sie werden im Text direkt und im Literaturverzeichnis aufgeführt und erläutert.

² (FwDV 500, 2012)

Symbolverzeichnis

Formelzeichen

E	Wh	(Elektrische) Energie (bei Akkumulatoren oft als <i>Kapazität</i> bezeichnet)
f	Hz	Frequenz
U	V	(Elektrische) Spannung
ϑ	°C	Temperatur

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Methodische Vorgehensweise.....	3
Abbildung 2.1: Teilnetzbildung im Jahr 2006.....	7
Abbildung 3.1: Flussdiagramm Li-Ionen-Akkumulatoren	13
Abbildung 3.2: Vorschlag Kennzeichnung Li-Ion	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Abstände bei elektrischen Anlagen.....	12
---	----

Anmerkung: *Die Verwendung von geschlechtsgerechter Sprache ist dem Autor sehr wichtig - dazu gehört es nach Meinung des Autors auch, in Texten genannt zu werden. Der Autor verwendet weitestgehend geschlechtsneutrale Sprache. Falls ihm dies nicht möglich erscheint, greift er auf das sog. Gender-Sternchen (*) zurück, das männliche, weibliche, queere, intersexuelle, transsexuelle, transgender als auch andere Geschlechtsidentitäten umfasst.*

1 Einleitung

Viele öffentliche Personen beschreiben sie als die größten Herausforderungen unserer Zeit: Gegenwärtig vollziehen sich große Strukturänderungen in den Bereichen Digitalisierung, Verkehr und Energieversorgung. Das Thema der vorliegenden Arbeit betrifft alle diese Themen. Der Autor vermag es nicht Prognosen in der Entwicklung zu entwerfen, gerade vor dem Hintergrund, dass selbst hochkarätige Expertinnen und Experten eklatant unterschiedlicher Meinungen in Bezug auf die Zukunft sind. Mit dieser Arbeit versucht der Autor zum einen aktuelle und mögliche Entwicklungen zu skizzieren und zum anderen die Auswirkungen auf die Feuerwehren zu diskutieren. (Vgl. Kapitel 2)

1.1 Komplexität und Relevanz

Um die Komplexität des Themas greifbar zu machen, sollen im Folgenden vier Dimensionen dieses Strukturwandels beschrieben werden, die jeweils in Wechselwirkung zueinander stehen:

Klimatische und politische Dimension Für die Stromerzeugung wurden bislang zum größten Teil fossile Energieträger genutzt. Dabei entsteht zumeist aufgrund von Verbrennung eine erhebliche Menge verschiedener Treibhausgase. Politischer Wille in Deutschland und aus den Klimawissenschaften formulierte Notwendigkeit ist eine massive Dekarbonisierung in den drei großen Emissionsbereichen Mobilität (Verkehr), Stromerzeugung und Wärmegewinnung (Heizen). Dabei ist eine zunehmende Elektrifizierung der angrenzenden Bereiche (Mobilität und Wärmegewinnung) zu verzeichnen. Die Abkehr von zentraler und konventioneller Energieerzeugung (und damit von einer Monopolisierung der Energieerzeugung) hat weitreichende Folgen auch auf die folgenden Dimensionen. (Vgl. Kapitel 2.3)

Bedarf Die technische Entwicklung ermöglicht zwar auf der einen Seite eine erhöhte Effizienz in der Erzeugung und Nutzung von Strom, andererseits wird mit fortschreitender Digitalisierung und Elektrifizierung der Bedarf an Strom immer größer. Hierzu zählt Elektromobilität ebenso wie intelligente Vernetzung, Kryptowährungen oder der zunehmende Datenverkehr mit seinem Serverbedarf. (Vgl. Kapitel 2.1)

Stromerzeugung Die Entwicklung weg von einer zentralen Energieerzeugung hin zu einer dezentralen ist vor allem den erneuerbaren Energien geschuldet. Statt weniger zentraler großer Kraftwerke werden es mehr dezentrale Anlagen, wie Photovoltaik (PV) auf Hausdächern oder Windenergieanlagen. (Vgl. Kapitel 2.1)

Netzaufbau Diese dezentralen Anlagen sind meist als Kleinsterzeuger an das Netz angeschlossen, das bisher auf zentrale Großenerzeuger ausgelegt war. Daraus ergeben sich Problematiken, die Auswirkungen auf die Netzstabilität, den Netzausbau und die notwendigen Speicher- und Steuermöglichkeiten haben. (Vgl. Kapitel 2.2)

Diese vier Dimensionen haben gesamtgesellschaftliche Auswirkungen und werden als Energiewende als eine der größten Aufgaben unserer Zeit beschrieben. Die Feuer-

wehr wird in allen gesellschaftlichen Bereichen tätig. So muss sich die alltägliche Gefahrenabwehr mit Elektroautos befassen, ebenso wie mit PV-Anlagen, Großbatteriespeichern, Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, Smart-Homes oder Kleinkraftwerken.

Und auch eine Ebene höher, bei nicht-alltäglichen Einsatzlagen, wird sich die Feuerwehr auf veränderte Bedingungen vorbereiten müssen. Bezogen auf die Stromversorgung zeigt sich, dass im gegenwärtigen Umbauprozess sich zum einen eine hohe gesellschaftliche Abhängigkeit entwickelt hat und zum anderen das Versorgungssystem selbst von einem hohen Störungspotential betroffen ist (zunehmende Instabilität und eminente flächendeckende Auswirkungen bei einer Störung). Ein Zustand, der sich sicherheitswissenschaftlich als höchst vulnerabel bezeichnen lässt. Fehlende Resilienz der Gesellschaft im Umgang mit den verschiedenen Infrastrukturen bei gleichzeitiger Zunahme von Unwettern und Naturereignissen zeigt die Notwendigkeit von Vorbereitung im Bevölkerungsschutzsektor. Die Feuerwehr ist hier integraler und oft sogar Hauptbestandteil und muss sich deshalb konzeptionell für die kommenden Herausforderungen aufstellen. (Telefongespräch, 2021b)

1.2 Abgrenzung des Themas

Der beschriebene Umfang des Themenkomplexes macht es nötig, die Behandlung in dieser Facharbeit zu begrenzen. Daher wird vorrangig auf das mögliche Einsatzspektrum der täglichen Gefahrenabwehr und ihrer Begegnung inklusive ihrer Konsequenzen eingegangen. Weniger werden die strukturellen Auswirkungen und strategische Notwendigkeiten³ betrachtet. Demnach wird auf folgende Bereiche nur bedingt eingegangen:

Blackout Ein großflächiger und langanhaltender Stromausfall (engl. *Blackout*) hätte weitreichende Auswirkungen auf die Feuerwehr nicht nur in Bezug auf ihre Einsätze. In dieser Arbeit wird auf den Aspekt der Notstromversorgung und auf die Rettungsdiensteinsätze im Falle eines Stromausfalls nur bedingt eingegangen. Die Aspekte, die den Bevölkerungsschutz und das Risikomanagement der Feuerwehren betreffen, haben vor allem strategische und weniger einsatztaktische Fragestellungen. Dies umfasst auch das interne Krisenmanagement, also u. a. die Bevorratung, den Schutz und die Stromversorgung über eine längere Zeit um die eigene Dienstfähigkeit aufrechtzuhalten. Es betrifft aber auch die Aspekte des allgemeinen Risikomanagements, das neben den Maßnahmen zur Vorsorge auch die Vorbereitung umfasst, wie beispielsweise Warnung der Bevölkerung, Einsatzleitung, Beratung und Besetzung von Stäben,

³ Als eine *Strategie* (bei der Feuerwehr) wird in dieser Arbeit eine grobe Handlungsrichtung für die Abarbeitung von Einsätzen, eine strukturierte und ganzheitliche Vorbereitung sowie ein umfangreiches Risikomanagement verstanden. Die in der Aufgabenstellung genannte *Einsatztaktik* hingegen ist hierarchisch darunter anzusehen und beschreibt die konkrete Umsetzung von Maßnahmen im Einsatzfall (siehe unten).

Koordinierung von Spontanhelfenden, Unterstützung im Katastrophenschutz, Inbetriebnahme von sog. Katastrophenschutzleuchttürmen und die Durchführung prosozialer Krisenkommunikation. Alle diese Maßnahmen sind wichtiger Bestandteil einer solchen Einsatzlage, gehen aber über den Umfang dieser Facharbeit und nach Verständnis des Autors auch über die Fragestellung hinaus.

Energieeffizienz Teile der klimabedingten Veränderungen umfassen Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz. Hier seien vor allem technische Möglichkeiten zur Steigerung des Wirkungsgerades bzw. zur Reduktion von Verlusten genannt. Verschiedene Brändeinsätze mit Wärmedämmverbundsystemen zur Gebäudeisolierung haben dabei im Brandschutzbereich für erhebliche Diskussionen gesorgt. Auch die gewaltsame Öffnung von Wohnungstüren und Fenstern wird gerade bei Passivhäusern immer komplizierter. Die Auswirkungen auf die Einsatztaktik und die Bearbeitung in den Brandschutzdienststellen findet in dieser Arbeit keine weitere Beachtung, da sie nur indirekt mit Stromerzeugung und -versorgung zu tun haben.

Diese Arbeit befasst sich vorrangig mit den direkten und technischen Auswirkungen auf die Einsätze der Feuerwehr.

1.3 Methodik

Diese Arbeit basiert auf einer umfangreichen Literaturrecherche und diversen Telefongesprächen mit Expert*innen in den Bereichen Energieversorgung, kritische Infrastrukturen (KRITIS), klimabedingte Einsätze und Umgang der Feuerwehr mit elektrischen Anlagen. Diese Fachgespräche folgen der Systematik einer qualitativen Erhebung; auf Leitfadeninterviews wurde aber in Anbetracht des Umfangs verzichtet. Die Gesprächspartner sind im Anhang auf Seite ii und als Quellennachweis aufgeführt. Neben der Erläuterung von Hintergrundinformationen zum Thema werden konkrete Einsatzbereiche dargestellt und anschließend die Problemstellung und Gefahren erörtert und die empfohlene Strategie und Einsatztaktik der Feuerwehr erläutert sowie notwendige Einsatzmittel skizziert. Diese Herangehensweise folgt aus der Aufgabenstellung und hat sich gerade auch in den Gesprächen als strukturierte Vorgehensweise erwiesen. Sie ist in Abbildung 1.1⁴ dargestellt. In den jeweiligen Unterkapiteln von Kapitel 3.1 sind die erörterten Einsatztaktiken und Einsatzmittel gelb bzw. grün markiert.



Abbildung 1.1: Methodische Vorgehensweise

Der in dieser Arbeit verwendete Taktik-Begriff geht über die taktischen Möglichkeiten Angriff, Verteidigung, In-Sicherheit-bringen und Rückzug hinaus und versteht darunter

⁴ Eigene Grafiken des Autors werden in dieser Arbeit mit keinem Quellenverweis versehen. Alle externen oder modifizierten Grafiken werden als solche gekennzeichnet.

wie in Slaby & Wirsching (2016) beschrieben „das geordnete Denken und Handeln des Einheitsführers, um die richtigen Mittel zur richtigen Zeit am richtigen Ort einzusetzen“.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Facharbeit umfasst vier Kapitel, die sich in Einleitung, Hintergrund, Erörterung und Fazit und Ausblick aufteilen.

Im Einleitungsteil wird zunächst die Komplexität und Relevanz des Themas erläutert und notwendige Abgrenzungen der Themen zur Konkretisierung der Facharbeit im Sinne der Aufgabenstellung skizziert. In diesem Abschnitt werden Methodik und Forschungsdesign umrissen.

Im zweiten Kapitel werden Hintergrundinformationen zum Themenbereich dargestellt. Hierbei handelt es sich vor allem um die Erläuterung von Entwicklungen in der aktuellen und zukünftigen Energieversorgung in Deutschland. Diese sind als Grundlage und Hinleitung für den folgenden Abschnitt anzusehen.

Im dritten Kapitel findet die Erörterung der Einsatztaktiken und -mittel für die Feuerwehr im Rahmen der definierten Einsatzszenarien statt. Hierbei wird ein besonderer Wert auf die praktische Anwendung in den Einsätzen der Feuerwehr gelegt und erörterte Ergebnisse (in Abschnitt 3.2) zusammengefasst.

Abschließend wird ein Fazit gezogen und weiterer Forschungsbedarf beschrieben.

Im Anhang sind weitere Grafiken und Informationen zu finden. Auf diese wird in der Arbeit verwiesen.

2 Hintergrund

Im Vordergrund der Energiewende steht die Dekarbonisierung⁵ des Energiesektors, um den fortschreitenden Klimawandel zu bekämpfen. Dafür wird in Deutschland vor allem auf erneuerbare Energien gesetzt⁶.

2.1 Dezentrale Energieerzeugung

Die Nutzung von erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung wird in Deutschland vor allem durch Photovoltaik- und Windenergieanlagen sichergestellt. Im April 2000 hat sich das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) etabliert, das erneuerbare Energieerzeugung fördert und privilegiert. Das sind vorwiegend Photovoltaik-, Windenergie- und Solarthermieanlagen. Außerdem werden verschiedene Wasserkraftwerke, Geothermie-, Biogas- und Biomasseanlagen verwendet und gefördert (vgl. Wikipedia, 2021b). In der Diskussion werden diese Anlagen meist als dezentrale Energieerzeugungsanlagen bezeichnet, da sie zum einen quantitativ höher und zum anderen in der Fläche verteilt vorkommen. So sind beispielsweise Solaranlagen meist als Kleinstanlagen⁷ auf Hausdächern verbaut, gehören den Besitzer*innen selbst und speisen in das Verteilernetz ein. Sie unterscheiden sich damit grundlegend von konventioneller Energieversorgung: Wenige große Energieversorgungsunternehmen betreiben verhältnismäßig wenige Großkraftwerke, die den Strom zentral in ein überörtliches Übertragungsnetz einspeisen. (acatech, 2020)

Aus wenigen großen Stromerzeugern die zentral einspeisen, werden viele kleine, die dezentral angeschlossen werden. Daraus ergibt sich die oftmals bezeichnete Dezentralisierung in der Energieversorgung. Dass erneuerbare Energieerzeugungsanlagen aber mitnichten mit dezentraler Energieerzeugung gleichgesetzt werden kann, zeigen folgende Beispiele:

- Photovoltaik- und Windenergieanlagen können in sog. Solar- oder Windparks zusammengefasst werden und als große Energieerzeugungsanlage in das Übertragungsnetz angeschlossen werden. Auch einige Wasser- oder Pumpspeicherkraftwerke können mit der Leistungserbringung von Großerezeugern mithalten und sind deshalb den zentralen Anlagen zuzuordnen.
- Kleinkraftwerke wie Blockheizkraftwerke (BHKW) oder Netzersatzanlagen sind dezentrale Anlagen, die auf Verbrennungstechnik beruhen. Dabei werden oft

⁵ Unter Dekarbonisierung versteht man die Reduktion von Kohlendioxidemissionen.

⁶ Auf die fossile aber kohlenstoffdioxid-freie Energieerzeugung der Kernenergie wird in Deutschland nicht gesetzt. Das hat politische sowie wirtschaftliche Gründe und bezieht sich vor allem auf Sicherheit undendlagerung, aber auch auf Wasserverbrauch, Erwärmung und Folgekosten.

⁷ In Deutschland werden Kleinkraftwerke (auch Kleinerzeuger) meist bis ein Megawatt (MW) Leitung zusammengefasst. Großkraftwerke (Großerzeuger) haben einige hundert MW. (Siehe Wikipedia, 2021a)

fossile Energieträger verwendet, weshalb diese Anlagen nicht zu den erneuerbaren Energien gezählt werden können.

Diese Beispiele zeigen, dass der Dekarbonisierungsprozess innerhalb der Energieerzeugung nicht zwingend mit einer Dezentralisierung einhergeht. (Telefongespräch, 2021b; acatech, 2020)

Die Entscheidung, welche Anlagen gebaut und verwendet werden, ist nicht zuletzt eine politische und wirtschaftliche. Wechselwirkung hat die Ausgestaltung vor allem mit der Netzinfrastruktur, welche im folgenden Kapitel skizziert wird. Dafür ist noch ein weiterer Aspekt relevant: die Momentanreserve. Großkraftwerke wie Gas- oder Kohlekraftwerke erzeugen in der Regel Wärme, die in mechanische Energie und anschließend mit Hilfe eines Generators in Strom umgewandelt wird (vgl. Elias Brunken et al, 2020). Dieser wiederum ist an das Netz angeschlossen und dreht mit der gleichen Frequenz wie alle anderen an das Netz angeschlossenen Generatoren und Verbraucher⁸. Durch die Größe der verbauten Generatoren wirken die drehenden Körper als Schwungmasse stabilisierend auf das System. Hier zu schreibt Tennet (2014):

„[Die] systemstützende Eigenschaft der direkt an das Netz gekoppelten Synchrongeneratoren ergibt sich aus den synchron mit der Netzfrequenz umlaufenden Schwungmassen der Turbosätze: Leistungsungleichgewichte in Folge von Störungen werden durch Abbremsen (Ausspeicherung kinetischer Energie) bzw. Beschleunigen (Einspeicherung kinetischer Energie) der Schwungmassen verzögerungsfrei ausgeglichen.“

Diese Schwungmassen der Großkraftwerke dienen demnach als Momentanreserve, die zur Stabilisierung des Netzes notwendig ist und erfüllt so netzrelevante Aspekte. Alternative Arten von Momentanreserven ohne die Schwungmassen der Großkraftwerke werden in Kapitel 2.3 erläutert.

2.2 Stromnetzaufbau

Das Stromnetz verbindet über mehrere Ebenen alle Verbraucher und Stromerzeuger und synchronisiert sie mit einer einheitlichen Netzfrequenz von 50 Hz. Bei einer Lastvergrößerung, also weiteren zugeschalteten Verbrauchern, sinkt die Frequenz bei gleicher Einspeisung. Andersherum steigt die Frequenz bei vergrößerter Einspeisung. Je größer das Netz, desto weniger Einfluss darauf haben kleine Veränderungen. Das Stromnetz in Deutschland ist in ein europäisches Verbundnetz integriert und daher sehr stabil. Kleinere Schwankungen werden durch die Trägheit des Systems (Momentanreserve) kompensiert. Bei steigendem Verbrauch sinkt die Frequenz und zusätzliche Generatoren müssen zugeschaltet werden. Dafür hält man die sog. Regelleistung vor, die im Bedarfsfall innerhalb kürzester Zeit hinzugeschaltet werden kann (siehe dazu Abbildung A.2 im Anhang auf Seite i). Fällt die Netzfrequenz trotzdem weiter ab,

⁸ Hiermit sind stromverbrauchende Geräte und Anlagen gemeint, keine menschlichen Konsument*innen.

so gibt es die Möglichkeit, einen Lastabwurf herbeizuführen, also große Verbraucher vom System zu trennen. Ursachen für eine Instabilität können neben Kurzschlüssen und Laststößen auch wetter- oder unfallbedingte Beschädigungen an der Strominfrastruktur oder menschliche Manipulation sein. Bei einer zu starken Unterefrequenz bricht ein Netz zusammen. Dem kommt man mit einem *System-Split* zuvor, also einem Aufspalten des Verbundnetzes in mehrere Teilnetze, die sich dann getrennt voneinander stabilisieren sollen. Zu einer solchen Systemauftrennung kam es im Jahr 2006 (siehe Abbildung 2.1), bei der das Netz in drei Teilnetze aufgeteilt wurde. (Spyra, et al., 2018; Elias Brunken et al, 2020)

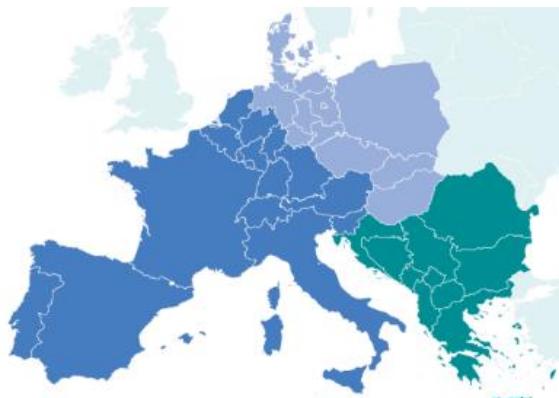


Abbildung 2.1: Teilnetzbildung im Jahr 2006 (aus Elias Brunken et al, 2020)

Je größer⁹ das Netz, desto stabiler die Netzfrequenz. Ein weiterer Vorteil für ein europäisches Verbundnetz ist die Ökonomie. Ein europaweiter Handel mit Strom, gerade im Zuge der Liberalisierung des Strommarkts, wird dadurch erst möglich. Zu den großen Nachteilen des Verbundnetzes zählt die Vulnerabilität. Ist das System einmal außerhalb des stabilen Bereichs, so ist es (zeit-) aufwendig wieder zurückzuführen. Dabei wäre ein flächendeckender Stromausfall (engl. *Blackout*) im europäischen Verbundnetz eines der folgenschwersten Probleme. Zum einen, weil ein Netz dieser Größe nicht innerhalb kurzer Zeit wiederherzustellen ist. Viele Kraftwerke sind nicht schwarzstartfähig, d. h. sie können ohne eine fremde Stromeinspeisung oder konstante Netzspannung nicht hochfahren. Schritt für Schritt sind Teilnetze aufzubauen, zu stabilisieren und zu erweitern. Dies dauerte vermutlich viele Tage. Zum anderen war die Gesellschaft nie abhängiger von einer stabilen Stromversorgung, wie sie es heute ist. Durch die Digitalisierung und Elektrifizierung gibt es heute kaum noch Prozesse, die im Blackout-Fall ohne Strom möglich wären. Das betrifft alle Bereiche des gesellschaftlichen Zusammenlebens darunter auch KRITIS. (Elias Brunken et al, 2020)

Dieses vorhandene Verbundnetz ist historisch für eine zentrale Energieversorgung ausgelegt worden. Großkraftwerke speisen auf Übertragungsnetzebene ein, der Strom wird über lange Strecken transportiert und alle Verbraucher sind auf Verteilnetzebene

⁹ Die Größe eines Netzes bezieht sich vor allem auf die Menge an Verbrauchern und Erzeugern und deren Leistung und weniger auf die Flächenausdehnung.

angeschlossen. Die Stromerzeugung und deren Nutzung kann weit auseinanderliegen. Dieses Netz ist auf die zunehmende Einspeisung auf Verteilnetzebene durch dezentrale Energieerzeugung ursprünglich nicht ausgelegt (Leistungsflussumkehr). Das betrifft vor allem die Transportkapazität (Netzadäquanz), aber auch die dadurch zunehmend fehlende Momentanreserve. (Elias Brunken et al, 2020; acatech, 2020)

Diesem Verbundnetz gegenüber stehen dezentrale Netzansätze. Hierbei wird der Strom dort produziert, wo er genutzt wird und nur dort lokal verteilt. Abhängig vom Grad der Dezentralität wird ein Haus, Quartier, Block, Bezirk oder Dorf als eine Einheit gesehen und vernetzt. Gespeist wird dieses Netz von dezentraler Energieerzeugung wie Photovoltaik, Wind oder Kleinkraftwerken. Um Schwankungen von Wind und Sonne auszugleichen, sind Ergänzungskraftwerke und Energiespeicher notwendig. Durch ein innovatives Netzmanagement soll eine Energie- und Leistungsautonomie ermöglicht werden. Dabei muss mit einer höheren Störanfälligkeit (kleine Fehler - große Auswirkungen auf lokales Netz) gerechnet werden, die dann aber lokal begrenzt blieben und weniger Menschen beträfen. (acatech, 2020; Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes, 2014)

Diese sehr konträren Ansätze werden bis heute wissenschaftlich und gesellschaftspolitisch kontrovers diskutiert und haben neben der reinen netztopographischen Dimension auch eine technische, räumliche, Integrations- und Koordinationsdimension (siehe dazu Abbildung A.1 im Anhang auf Seite i). Eine Studie aus dem vergangenen Jahr (acatech, 2020) zeigt auf, dass diese Diskrepanz letztlich nicht entscheidend ist. Eine Kombination sei möglich. So wird ein Ausbau regionaler Netze gefordert, die verbrauchsnahe Stromerzeugung ermöglichen und durch eine Kombination (z. B. aus Photovoltaik, Speicher und *Power-to-Gas*) Verbrauch und Erzeugung innerhalb des Verteilernetzes auszupendeln. Dafür sei eine Digitalisierung der Stromversorgung notwendig. Der Ausbau des Verbundnetzes müsste ebenso mit einhergehen, da eine komplette Autarkie vor allem aufgrund saisonaler aber auch regionaler Schwankungen von Wind und Sonne in Deutschland nicht möglich sei¹⁰. Auch wenn dabei noch viel Forschungsbedarf proklamiert wird, scheinen die meisten Modelle zu zeigen, dass die „[Kosten] in zentralen Systemen niedriger als in dezentralen“¹¹ zu sein scheinen. Ein rein zentrales Netz hingegen wird vermutlich im Umbau zu lange brauchen und abgesehen davon zu vulnerabel bei einem *Blackout* sein. (acatech, 2020; Brauner, 2009; Spyra, et al., 2018; Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2016)

¹⁰ Ebd.

¹¹ Ebd.

2.3 Entwicklungen in der Energieversorgung

Würfel (2017) umschreibt diese Aspekte als ein magisches Dreieck aus Wirtschaftlichkeit, Umweltschutz und Versorgungssicherheit. Letzteres umfasst vor allem die Verfügbarkeit von Primärenergie, die Stromerzeugung, den Transport des Stroms und die Stabilität des Systems sowie die Speicherung. Im Folgenden werden mögliche Entwicklungen und Lösungen skizziert, die im Themenbereich an Bedeutung gewinnen könnten und dann für die Energiewende und die Feuerwehr an Bedeutung gewinnen:

- **Mircogrid** Das Konzept umfasst kleinräumige Leistungsnetze, die als Mikronetz autark über PV, Batterien, BHKW und intelligentes Lastmanagement im Inselbetrieb funktionieren (können), im Regelfall aber an das übergeordnete Netz angeschlossen sind.
- **Momentanreserve** Bisher wurde die Momentanreserve über die Trägheit der Schwungmassen von Großkraftwerken gewährleistet. Als alternative Möglichkeiten zur inhärenten Speicherung können die künstliche Beibehaltung von Schwungmassen ehemaliger Großkraftwerke (Redipatch), rotierende Phasenschieber, Batteriespeicher oder netzbildende Umrichter dienen. (Elias Brunken et al, 2020)
- **Smartgrid** Einige Forscher*innen sehen die Möglichkeit durch Digitalisierung des Stromnetzes Momentanreserve kompensieren zu können. Im Zentrum des Konzepts steht eine softwarebasierte Netzsteuerung zum Ausgleich von Erzeugungs- und Bedarfsschwankungen. (Brauner, 2009)
- **Sektorenkopplung** In zunehmenden Maße kommt es zu einer Verschmelzung zwischen den Sektoren Stromversorgung, Wärme und Verkehr. Mit einer Einbindung in ein Smartgrid können Netz- und Lastmanagement damit optimiert werden. (Würfel, 2017)
- **Vehicle-to-grid** Teil dieser Sektorenkopplung ist die Integration der Akkumulator-Kapazitäten von Elektroautos um Schwankungen auszugleichen. (Mönch-Tegeder, 2017)
- **Power-to-X** Technologien zur Speicherung überschüssiger elektrischer Energie (z. B. als Gas). Hierzu siehe Kapitel 3.1.8.

3 Erörterung

Die sich aus der Energiewende und dem Umbau der Stromversorgung ergebenden Neuerungen werden im Folgenden hinsichtlich der Auswirkungen auf die Einsätze der Feuerwehr erörtert. Auch angrenzende Bereiche, die aufgrund der Sektorenkopplung den Themenbereich tangieren, sind inkludiert.

3.1 Gefahrendiskussion anhand von Einsatzszenarien

Wie in Kapitel 1.3 beschrieben wird exemplarisch auf einzelne Themengebiete eingegangen, auf deren Gefahrenpotential (Problemstellung) und auf die strategischen, taktischen und technischen Auswirkungen hin untersucht. Dabei wird mit aufgeführt, ob nach aktuellem Wissensstand weitere Einsatzmittel dafür erforderlich werden. Die Eigensicherung und Auswirkungen auf den internen Betrieb werden dabei ebenso berücksichtigt.

3.1.1 Stromausfall

Das Spektrum im Bereich Stromausfall reicht von vorübergehenden kleinen Ausfällen von einzelnen Straßen und Gebäuden, über den ganzer Stadtteile, bis hin zu langanhaltenden und großflächigen Stromausfällen (*Blackout*).

Eine weitergehende Betrachtung der Thematik *Blackout* findet in dieser Arbeit nicht statt (vgl. Kapitel 1.2). Es werden initiale Probleme und Maßnahmen beschrieben, die nicht das Risiko- und Krisenmanagement eines Blackouts umfassen.

Problemstellung: Erfahrungen aus München zeigen, dass lokale Stromausfälle initial vor allem drei Einsatzspektren hervorbringen: Personen sind in Aufzügen eingeschlossen, BMA (Brandmeldeanlagen) lösen (fälschlicherweise) aus und die Batteriepufferungen von Beatmungspatient*innen neigen sich dem Ende. KRITIS haben in der Regel nur zeitlich begrenzte Möglichkeiten der Notstromversorgung. (Telefongespräch, 2021a)

Strategie: Die Gefahrenabwehr muss im Falle eines Stromausfalls ein umfangreiches Krisenmanagement betreiben, das im Rahmen des Risikomanagements vorgeplant und mit allen beteiligten Akteur*innen im Bevölkerungsschutz und KRITIS abgestimmt und aktuell gehalten ist. Die eigene Dienstfähigkeit mit allen dazugehörigen Strukturen muss aufrechterhalten und einem höheren Einsatzaufkommen angepasst werden. Bei einem Ausfall von zentralen Strukturen (Verkehr, Wasser, Kommunikation) muss auch die Feuerwehr in der Lage sein, sich zunehmend dezentral zu organisieren.

Taktik und Technik: Schnellstmögliche Wiederherstellung bzw. Aufrechterhaltung der Dienstfähigkeit. Je nach Konzept ist die Feuerwehr in das Notstromkonzept für KRITIS eingebunden. Dezentrale Informations-, Melde- oder Versorgungsstrukturen können notwendig werden, dazu bieten sich sog. Katastrophenschutz-Leuchttürme an und je nach Situation, Prognose und auch Jahreszeit können Notunterkünfte nötig werden. Beatmete und pflegebedürftige Personen müssen ggf. versorgt oder transportiert werden. (Telefongespräch, 2021d)

Eine genaue Erörterung bleibt an dieser Stelle aus (vgl. Kapitel 1.2)!

Mittel: Allein für die beschriebenen Maßnahmen sind umfangreiche Vorplanungen und Vorhaltungen wie Erkundungsfahrzeuge, Räumlichkeiten, alternative Alarmierungseinrichtungen, eine Vielzahl von unterschiedlichen Aggregaten etc. nötig. Eine genaue Erörterung bleibt an dieser Stelle aus (vgl. Kapitel 1.2)!

3.1.2 Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Li-Ion) kommen in sehr unterschiedlichen Kontexten, Mengen und Größen vor. So finden sie sich in alltäglichen Elektrogeräten wie Handys und Laptops ebenso wie in Pedelecs oder Elektro-Rollern. Von größerer Bedeutung für die Feuerwehr kommen zunehmend Elektro- und Hybridfahrzeuge vor (vgl. Kapitel 3.1.5). Auch Großbatterien oder Großspeicher als Momentanreserve für Netzbetreiber (vgl. Kapitel 3.1.4) oder stationäre Speicher als Haushalts- oder Quartierspeicher (vgl. Kapitel 3.1.3 und 3.1.4) ggf. in Kombination mit PV-Anlagen (vgl. Kapitel 3.1.10) nehmen in Anzahl, Komplexität und Größe zu. Die folgende Erörterung zu Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist allgemein gehalten und wird in den folgenden Kapiteln nach den verschiedenen Vorkommen und Spezifika ergänzt und differenziert.

Problemstellung: Lithium-Ionen-Akkumulatoren (auch oft -Batterien genannt) beinhalten eine hohe Brandlast, verbunden mit einer brandfördernden Wirkung durch chemisch gebundenen Sauerstoff, wodurch es zu einer heftigen exothermen Reaktion mit freiwerdenden brennbaren Gasen kommen kann (sog. *thermal runaway*). Hierbei kann es zu einem Austritt von Elektrolytflüssigkeit, Fluorwasserstoff oder Schwermetallen sowie brennbaren, giftigen Gasen kommen. Die Ursachen für einen thermal runaway sind vielfältig und können zusammengefasst werden mit Blitzschlag, Überspannung, Überschwemmung, mechanischen oder thermischen Einwirkungen (vgl. Maiworm, et al., 2020). Im Feuerwehreinsatz kann das zu einer Gefahr der Brandausbreitung, der Atemgifte, einer chemischen Gefahr bis hin zu einer Explosionsgefahr führen. Außerdem besteht nach DIN VDE 0132 (2018) weiterhin die Gefahr der Elektrizität (Rückspannung) an der Einsatzstelle. (Bundesverband Energiespeicher Systeme, 2021; Telefongespräch, 2021a)

Strategie: Prinzipiell kann die Reaktion kaum beendet, sondern eher begrenzt oder verzögert werden. Gerade bei größeren Anlagen oder in geschlossenen Räumen ist demnach die Verhinderung der Brandausbreitung auf (andere) Batterien, Brandlasten oder Räume zu gewährleisten. Die thermische Einwirkung soll so gering wie möglich gehalten und die Ausbreitung auch von Chemikalien und der Kontakt mit diesen verhindert werden. Im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes ist vornehmlich die Gefahr der Brandentstehung und -ausbreitung zu minimieren. Dafür sind je nach Größe und Ort (siehe dazu Kapitel 3.1.3) ggf. Abstände einzuhalten oder erhöhte Bauanforderungen zu stellen. (DIN VDE 0132, 2018; Maiworm, et al., 2020; AGBF, 2018; Telefongespräch, 2021a)

Taktik und Technik: Für den Einsatz der Feuerwehr bedeutet dies eine Kühlung der entsprechenden Batterie und ein Verhindern der Brandausbreitung mittel Wasser

(ggf. mit Zusätzen)¹². Es sind die Strahlrohrabstände und Annäherungsbeschränkungen nach DIN VDE 0132 (2018) zu beachten (dazu siehe

Tabelle 3.1: Abstände bei elektrischen Anlagen) und umluftunabhängiger Atemschutz zu tragen. Ein Freilegen oder Ausbauen ist in der Regel nicht Aufgabe der Feuerwehr und daher zu unterlassen. Bei Chemikalienaustritt oder Kontakt ist ggf. nach Feuerwehrdienstvorschrift FwDV 500 (2012) vorzugehen. Im weiteren Verlauf ist der Akkumulator zu kühlen und fortwährend zu überwachen (z. B. mittels Wärmebildkamera). Sie ist gekühlt dem Entsorgungsunternehmen oder Betreiber*in zu übergeben. Ein *Feuer aus* kann in der Regel nicht gegen werden, da eine zeitverzögerte Erwärmung möglich ist. Als kritische Temperatur kann hierbei nach DIN VDE 0132 (2018) 80 °C angenommen werden. Bei der Entwicklung von weißem (brennbaren) Rauch ohne Abbrand, kann es zu einer explosiven Atmosphäre kommen. Zur Einschätzung der Maßnahmen kann Abbildung 3.1 herangezogen werden. (AGBF, 2018; DIN VDE 0132, 2018; Telefongespräch, 2021a)

Bei Elektrofahrzeugen, größeren Anlagen oder Installationen in Gebäuden sind ggf. weitere Maßnahmen nötig (siehe Kapitel 3.1.3 bis 3.1.5).

Tabelle 3.1: Abstände bei elektrischen Anlagen nach DIN VDE 0132 (2018)

	Annäherung	Sprühstrahl	Vollstrahl
Bis 1.000 V AC bzw. 1500 V DC	1 m	1m	5 m
Oberleitungen bis 25 kV (nur bei Menschenrettung)	1,5 m		
110 kV	3 m	3 m	6 m
220 kV	4 m	4 m	7 m
380 kV	5 m	5 m	8 m
Unbekannte Spannung		5 m	10 m
Verwendung eines BM-Strahlrohr		5 m	10 m
bei mehr als 5 bar Ausgangsdruck		+ 2 m	+ 2 m
Freileitung am Boden	20 m		
Fahrleitung am Boden	10 m		

Mittel: Für die beschriebenen taktischen und technischen Möglichkeiten werden keine besonderen¹³ Einsatzmittel als notwendig angesehen.

Bemerkung: Nach Aussage zweier Experten (siehe unten) scheint der feuerwehrtechnische Umgang mit Lithium-Ionen-Akkumulatoren weniger an den technischen Möglichkeiten zu scheitern, sondern vielmehr die Gefahrenbeurteilung in Verbindung

¹² Nach der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF, 2018) ist dabei wegen der mangelnden Kühlwirkung prinzipiell auf Metallbrandpulver, ABC-Pulver, Sand oder CO₂-Löschen zu verzichten.

¹³ Damit sind keine über die Standardbeladung von gängigen Feuerwehrfahrzeugen hinausgehenden Einsatzmittel gemeint.

mit dem taktischen Wissen defizitär zu sein. Beide Experten vergleichen die Situation mit der früheren Airbag-Problematik, bei der die Gefahren durch zeitverzögert auslösende Airbags überschätzt wurden. Der Umgang mit Risiken sei Teil der Aufgabe der Feuerwehr. Auch eine Propangasflasche könne zu einer erheblichen Gefahr werden und in großen Mengen auslaufendes Benzin aus einem PKW eine Explosionsgefahr darstellen (aus Telefongespräch, 2021a). Beide Experten kommen zu dem Ergebnis, dass neue Einsatzmittel für die öffentlichen Feuerwehren nicht notwendig seien, sondern eine verbesserte Ausbildung und Sensibilisierung mit dem Thema zielführend sei. Dazu siehe auch Abbildung 3.1. Ein Experte (aus Telefongespräch, 2021a) geht davon aus, dass die nächste Generation von Hochleistungsbatterien nicht mehr zu einem *thermal runaway* (siehe oben) neigen wird (vgl. Telefongespräch, 2021a; Telefongespräch, 2021c).

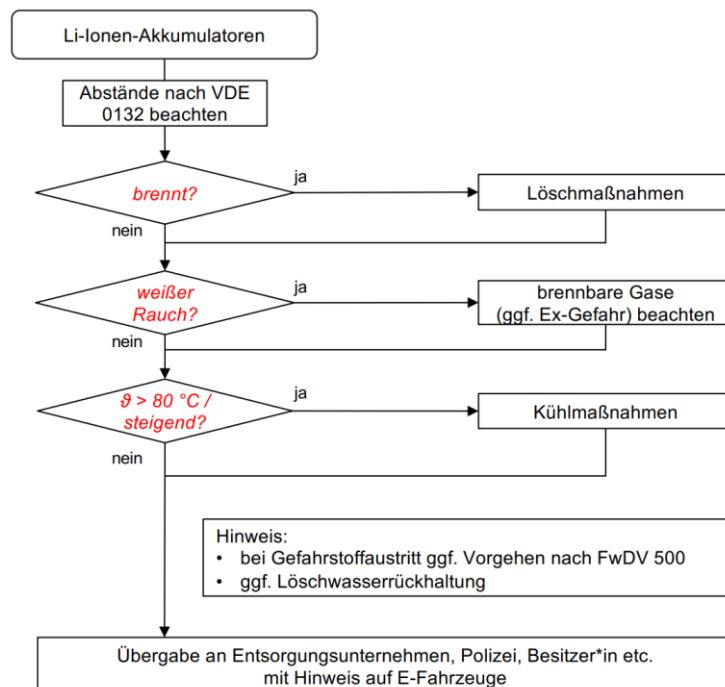


Abbildung 3.1: Flussdiagramm Li-Ionen-Akkumulatoren (modifiziert nach AGBF, 2021)

Die internationale Diskussion unter Forschenden zeigt beim Thema Lithium-Ionen-Akkumulatoren ebenfalls vor allem Wissensdefizite auf. Der klare Appell zur Forschung an die Wissenschaft, aber auch zu umfangreichen Messungen im Einsatz kommt aus den USA (vgl. Kerber & McKinnon, 2021).

Die zukünftige Entwicklung von Batteriespeichern in ihrem Umfang, Bauart und Gefahrenspektrum ist nicht abzuschätzen. Es kann davon ausgegangen werden, dass weitere Bereiche elektrifiziert werden und teilweise Entwicklungen schneller als deren Risikoanalyse stattfinden. Diverse Brände konnten zum Beispiel in den letzten Jahren auf die Ladung von sog. E-Scooter (elektrische Kleinstroller) in Privatwohnungen zurückgeführt werden.

3.1.3 Hausspeicher

In diesem Abschnitt werden Spezifika dieser Form ergänzend zum Kapitel 3.1.2 Lithium-Ionen-Akkumulatoren beschrieben. Die verschiedenen Aspekte sind demnach kumulativ und nicht fakultativ zu beachten.

Lithium-Ionen-Akkumulatoren kommen als Haus- oder Quartierspeicher zur Pufferung oder als Ausgleichsspeicher vor. Gerade in Kombination mit PV-Anlagen oder Wärmepumpen finden diese immer größere Verwendung in Neubauten.

Problemstellung: Im privaten Bereich wird oft mit sog. Second-Life-Batterien (wiederverwendete, aufbereitete Akkumulatoren) gearbeitet. Diese könnten ggf. stärker zu oben beschriebenen Gefahren neigen (aus Telefongespräch, 2021b). Durch den Einbau innerhalb des Hauses kann es zu einer Brandausbreitung und Gefährdung von Bewohner*innen kommen. Die Dimensionierungen von Hausspeichern stellen in der Regel ein vergleichbares Risiko wie andere elektrische Anlagen wie z. B. Elektrogeräte oder PV-Anlagen dar.

Strategie: Die strategische Herangehensweise hat vor allem Einfluss auf den vorbeugenden Brandschutz. Hier sind vor allem geeignete Räume oder Gehäuse zu nennen, die nach AGBF (2018) vor allem VDE AR E 2510-2 erfüllen müssen. Nach Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen, EltBauVO (ARGEBAU, 2021) müssen Zentralbatterieräume (ab 20 kWh Kapazität) mindestens feuerhemmend ausgeführt sein. Für den abwehrenden Brandschutz ist neben Erkennbarkeit (Kennzeichnung für Erkundungsphase, siehe Abbildung 3.2) vor allem die Sicherstellung der Löschmaßnahmen zu gewährleisten.

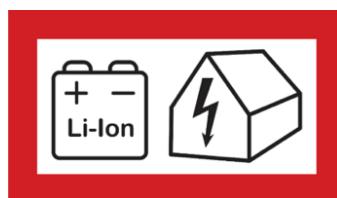


Abbildung 3.2: Vorschlag Kennzeichnung Li-Ion aus (Maiworm, et al., 2020)

Taktik und Technik: Die Einsatztaktik verfolgt drei Maßnahmen: ausreichend Wasser verwenden sowie die Ausnutzung von Deckung und Wurfweite. (AGBF, 2018)

Mittel: Hierfür sind keine besonderen Einsatzmittel notwendig.

Bemerkung: Bei kleineren Mengen austretenden Elektrolyts kann man von einer chemischen Pufferung des Fluorwasserstoffs durch die umgebenden Bauteile ausgehen.

Je nach Menge und Größenordnung müssen weitere Maßnahmen ergriffen werden, hierzu siehe Kapitel 3.1.4.

3.1.4 Großbatteriespeicher und Quartierspeicher

In diesem Abschnitt werden Spezifika dieser Form ergänzend zu den Kapiteln 3.1.2 und 3.1.3 beschrieben. Die verschiedenen Aspekte sind demnach kumulativ und nicht

fakultativ zu beachten.

Gerade größere Speicheranlagen wie die Bereitstellung von Momentanreserven seitens der Netzbetreiber, Speicher zur Primärregelung oder große Quartierspeicher stellen ein anderes Gefahrenpotential dar.

Problemstellung: Einige der Gefahren, die in Kapitel 3.1.2 beschrieben werden, vergrößern sich entsprechend der höheren Anzahl an Akkumulatoren und der dadurch steigenden Brandlast. Die Auswirkungen können gerade in Hinblick auf Brandausbreitung, Explosivität, Freisetzung von (ausgasender) Elektrolytflüssigkeit und Elektrizität eminent höher sein und sind demnach im Einsatz ernster zu nehmen.

Strategie: Vornehmlich ist die Brandentstehung und -ausbreitung zu minimieren. Dabei können je nach Größe verschiedene Anforderungen gestellt werden. So sollten Großspeicher mind. 5-10 m Abstand zu anderen Gebäuden aufweisen (Bundesverband Energiespeicher Systeme, 2021) und innerhalb von Gebäuden nach EltBauVO ab 20 kWh Kapazität mind. feuerhemmende Ausführungen der raumabschließenden Bauteile vorhanden sein (ARGEBAU, 2021). Ab 1.000 kWh ist sogar eine Feuerlöschanlage einzubauen¹⁴. Dies können nach Maiworm et al. (2020) Wassernebel- oder Gaslöschanlagen sein, welche vermutlich eher seitens der Sachversicherer gefordert würden. Bei größeren Anlagen kann mit einem Sonderbautatbestand argumentiert und ein Brandschutzkonzept erstellt werden. Hierbei kann ggf. mit einem Raum „mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr“ nach Musterbauordnung (ARGEBAU, 2020) argumentiert werden (vgl. BVES, 2021). Druckentlastungsöffnungen müssen ggf. vorgesehen werden und für Rauchableitung gesorgt werden (vgl. BVES, 2021). Eine Brandmeldeanlage (BMA) könnte höchstens zum Trennen oder zum Warnen von Personen zielführend sein¹⁵. Gerade bei größeren Anlagen muss bei einer Abschaltung oder Trennung bedacht werden, dass dadurch Stilllegung der Wasserversorgung, Unterbrechung von Betriebsabläufen, Festsetzen von Aufzügen oder Verdunklung von Straßen sowie weitere Gefährdungen von Personen folgen können (vgl. DIN VDE 0132, 2018). Im weiteren Verlauf ist mit einer Freisetzung der Elektrolytflüssigkeit zu rechnen, die insbesondere zu einer Freisetzung von Fluorwasserstoff führen kann. Dies hat Auswirkungen auf den vorbeugenden Brandschutz (Löschwasserrückhaltung), als auch auf den abwehrenden Brandschutz (Gefahrstoff). (Maiworm, et al., 2020; Telefongespräch, 2021a)

Taktik und Technik: Es ist für Löschwasserrückhaltung zu sorgen und bei Gefahrstoffaustritt nach Gefahrengruppe IIC vorzugehen und ggf. auf Fluorwasserstoff zu messen. (Maiworm, et al., 2020)

Mittel: Bereits vorhandene Messkomponenten und verschiedene Mehrgasmessgeräte sind in der Regel für die Messung von Fluorwasserstoff geeignet.

3.1.5 Elektrofahrzeuge¹⁶

¹⁴ Ebd.

¹⁵ Ebd.

¹⁶ Andere Alternative Antriebe welche mit CNG (Compressed Natural Gas) gasförmiges, komprimiertes oder LNG (Liquefied Natural Gas) tiefkaltverflüssigtes Erdgas, in der Regel Methan, LPG (Liquified

Die Anzahl von Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird in den nächsten Jahren vermutlich weiterhin enorm steigen. Die hier aufgeführten Aspekte gelten ergänzend zu jenen in Kapitel 3.1.2.

Problemstellung: Bei Unfällen geht von Elektrofahrzeugen zusätzlich die Gefahr der Elektrizität bei der technischen Unfallhilfe aus. Bei der Befreiung eingeklemmter Personen wird dabei ggf. in der Nähe von verformten Hochvoltkomponenten gearbeitet. Sie haben keinen Masseschluss mit der Karosserie und sind isoliert vom Bordnetzstromkreis zu betrachten. Zusätzlich könnte die Gefahr des Wegrollens bei elektrisch gesteuerter Handbremse herrschen. Hauptsächliche Schwierigkeit bleibt das Wissen um Gefahren und Technik und dessen Vermittlung in der Ausbildung. Es fehlen einheitliche Standards bei Herstellern bzgl. Kennzeichnung und Trennstellen. Dies führt zu einem Ausbildungs- und Informationsdefizit. (Georgiev, 2021; TÜV SÜD, 2021)

Strategie: Die meisten Aspekte bei Elektrofahrzeugen betreffen erst die Abschlepp- und Entsorgungsunternehmen. Diese müssen die Gefahr der Wiederentzündung und der Kontamination beachten. Eine Kühlung des gesamten Autos mittels Mulde oder einer besonderen Nadel zur injektiven Kühlung von Akkumulatoren ist für die alltägliche Gefahrenabwehr in der Regel nicht erforderlich. Vorbeugend sollte hier für Einheitlichkeit gesorgt werden und ggf. die Brandentstehung und Ausbreitung gestoppt werden (ggf. Feuerlöscherpflicht). Wichtigste Strategie für die Gefahrenabwehr stellt hier die Wissensvermittlung, Ausbildung und Informationssammlung und deren Aktualität und Verfügbarkeit dar. Ein Experte schlägt die ständige Erreichbarkeit von Spezialisten für die Feuerwehr vor. (Telefongespräch, 2021c; Georgiev, 2021; TÜV SÜD, 2021)

Taktik und Technik: Es gelten die Abstände nach DIN VDE 0132 (2018) und die angestrebte Kühlung bis unter 80 °C. Allgemeine Herangehensweise: Deaktivierung HV-System¹⁷ (bei Auslösung Rückhaltesystem i. d. R. schon automatisiert passiert), Abklemmen der Niedervoltbatterie oder fahrzeugspezifische Trennstelle, Vorsicht bei orangen oder mit Blitz gekennzeichneten Komponenten (vgl. Telefongespräch, 2021a; DIN VDE 0132, 2018). Für Rettungsarbeiten ist ggf. eine elektrisch-isolierende Abdeckung hilfreich (vgl. Hüsch, 2018).

Mittel: Für die alltägliche Gefahrenabwehr reichen zunächst aktuelle Informationsmittel aus. Für Abschleppunternehmen (oder spezielle Werkfeuerwehren) könnten „Brandbekämpfungsdecken“ (TÜV SÜD, 2021), Mulden, Quarantänemöglichkeiten und Löschnadeln (unter Beachtung der Gefahr der Ausbreitung und Verletzung) sinnvoll sein. (TÜV SÜD, 2021)

Anmerkung: Bei Einsätzen an Ladestationen sollte das Fahrzeug von der Ladestation getrennt werden. Es ist zu beachten, dass einige Ladestationen selbst mit Lithium-Ionen-Akkumulatoren zur Zwischenspeicherung und Schnellladung bestückt sind.

Petroleum Gas) druckverflüssigtes Propangas angetrieben werden, werden in dieser Arbeit nicht behandelt, da sie nicht als klimaneutral bezeichnet werden können. Der Themenbereich Wasserstoff und Brennstoffzelle wird in dieser Arbeit zusammenfassend in Kapitel 3.1.8 behandelt.

¹⁷ Hochvolt-System bezeichnet (in der Fahrzeugtechnik) den Wechselspannungsbereich zwischen 30 V und 1 kV und den Gleichspannungsbereich zwischen 60 V und 1,5 kV.

Diese können auch in Tiefgaragen verbaut sein. (Telefongespräch, 2021a; Hüsch, 2018)

3.1.6 Brennstoffzellen

Brennstoffzellen stellen Strom mittels Wasserstoff her. In Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb wird damit ein Elektromotor angetrieben. Sie sind demnach wie ein Elektrofahrzeug (inkl. Akkumulator, vgl. Kapitel 3.1.5) und ein Wasserstofffahrzeug (inkl. Druckgasbehälter) zu behandeln. Bei Wasserstoff ist zusätzlich die geringe Sichtbarkeit einer Flammenbildung, die geringe Luftvergleichszahl sowie der große Ex-Bereich zu beachten. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Wissensvermittlung und der -bereitstellung. Ein aktuelles und schnell zur Verfügung stehendes Rettungsdatenblatt ist unerlässlich. (Hüsch, 2018)

Taktik und Technik: Eine Deaktivierung des Antriebs ist erforderlich (geräuschloser Betrieb). Beachtung von Druckgasbehältern ggf. Kühlung. Je nach Einsatzort Messung der Ex-Atmosphäre. Beachtung von HV-Komponenten. (Hüsch, 2018)

3.1.7 Dezentrale Kraftwerke und Heizungssysteme

Dezentrale Stromerzeugungsanlagen können auch Kraftwerke in verschiedenen Größen sein. Gasmotorenkraftwerke können Strom u. a. aus Erdgas, Wasserstoff oder Biogas herstellen. Andere Verbrennungsmotoren stellen Strom bspw. aus Diesel- oder Pflanzenöl her. Bei einem Blockheizkraftwerk (BHKW) wird eine Sektorenkopplung hergestellt, sodass zusätzlich zum Strom auch Wärme gewonnen werden kann. Zur Wärmegewinnung wird abgesehen von Solarthermie und Fernwärme vor allem verbrennungsbasiert geheizt. Neben den klassischen Heizungen mit Erdgas und Erdöl kommen zunehmend Biomasseheizungen (mit Stückholz, Pallets oder Holzhackschnitzel) vor. Eine effiziente Art mit Strom zu heizen, stellen (Erd-)Wärmepumpen dar (Sektorenkopplung). Je nach Größe und Ausgestaltung müssen vorbeugende brandschutztechnische Maßnahmen ergriffen werden. Gerade für die Lagerung von Schüttgütern (z. B. Pallets) muss die Gefahr des Schwelens und Glimmens (ggf. Kohlenstoffmonoxidentwicklung) beachtet werden. Bei großen Stromerzeugungsanlagen sind Abschaltungen zu vermeiden oder mit dem Energieversorger abzusprechen. Andernfalls drohen durch Unterbrechung Gefährdungen für Personen, Stilllegungen der Wasserversorgung, Unterbrechung von Betriebsabläufen, das Steckenbleiben von Aufzügen oder die Verdunklung von Straßenzügen. Besondere Einsatzmittel oder spezielle Herangehensweisen wurden im Rahmen dieser Facharbeit nicht ausfindig gemacht. (DIN VDE 0132, 2018; Telefongespräch, 2021b)

3.1.8 Power-to-X

Als Power-to-X werden Technologien bezeichnet, die Strom in andere Energieformen umwandeln. Es dient zur Speicherung oder zur Sektorenkopplung (Verbrauch im Wärme- oder Transportsektor). Die bekannteste Form ist Power-to-Gas, wobei durch Elektrolyse Wasserstoff hergestellt wird. Dieses kann z. B. anschließend methanisiert werden und in das vorhandene Erdgasnetz eingespeist werden. Andere Möglichkeiten sind synthetische Kraftstoffe, Ammoniak oder Methanol. Spezifische Gefahren der

Umwandlung selbst, sind sicherheitstechnisch zu berücksichtigen und im Rahmen des vorbeugenden Brandschutzes zu behandeln. Synthetisch hergestellte Stoffe sind in der Regel feuerwehrtechnisch komplementär zu behandeln. (Würfel, 2017)

3.1.9 Biogasanlagen

Biogasanlagen finden zunehmend gerade bei landwirtschaftlichen Betrieben oder Kläranlagen Verwendung. Bei Planung und Errichtung müssen im Rahmen des vorbeugenden Brandschutzes u. a. Ex-Zonen, Löschwasserbereitstellung und Kennzeichnungen berücksichtigt werden. Für den abwehrenden Brandschutz sind folgende Gefahren zu beachten: Elektrizität, Atemgifte aufgrund von Gärgasen, C-Gefahr und Brand- sowie Explosionsgefahr, letzteres nach Ex-Zonenplan zum Beispiel an Ausgangsstelle. Für einen Brand des Gaslagers selbst und an Leitungen sollte die Wahl auf ein kontrolliertes Abbrennen fallen. Die Messung von Methan und Schwefelwasserstoff muss gewährleistet werden. Weitere Einsatzmittel oder eine über die übliche Taktik (u. a. umluftunabhängiger Atemschutz, Ex-Schutz, FwDV 500, Abstände und Löschmittel bei elektrischen Anlagen, vgl. Tabelle 3.1) hinausgehende Empfehlung konnten nicht erörtert werden. (Fachverband Biogas, 2010; Telefongespräch, 2021b; vfdb, 2014)

3.1.10 Photovoltaik-Anlagen

Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) haben in der Vergangenheit zu großer Verunsicherung bei Feuerwehreinsätzen geführt. Nach diversen Untersuchungen sind inzwischen die Gefahren, die von ihnen ausgehen, klar umrissen. Dabei ist festzustellen, dass Anlagen bis 10 kW mit der normalen persönlichen Schutzausrüstung keine Gefährdung darstellen. Auch sog. Guerilla-Solaranlagen¹⁸ stellen keine besondere Gefahr dar (vgl. Konertz, 2018). Dennoch und vor allem bei größeren Anlagen sollten Abstände nach DIN VDE 0132 (2018) eingehalten werden. Bei Bränden oder Beschädigungen der PV-Anlage¹⁹ sollten, falls vorhanden, Feuerwehrschatz und DC-Trennschalter betätigt werden sowie Abstände insbesondere zu den DC-Leitungen und Modulen eingehalten werden. Bei überflutetem Wechselrichter (oft in Kellerräumen verbaut) herrscht Lebensgefahr im Bereich. Ebenso kann es dabei zu ätzender und explosiver Gasbildung kommen. Zusätzlich geht gerade bei Bränden eine Gefahr des Herabstürzens von den Modulen aus. Besondere Einsatzmittel, technische oder taktische Vorgehensweisen können darüber hinaus nicht erörtert werden. Für die Feuerwehr hilfreich wäre eine einheitliche Kennzeichnung, die u. a. von TÜV Rheinland (2015) vorgeschlagen wurde. (Telefongespräch, 2021a; Telefongespräch, 2021b; Häberlin, et al., 2011; TÜV Rheinland, 2015)

3.1.11 Windenergieanlagen

Windenergieanlagen werden immer stärker, häufiger und höher. Das Einsatzspektrum der Feuerwehr reicht hier von einer Menschenrettung in großer Höhe bis zur Brandbekämpfung. Für die Menschenrettung sind Höhenrettungseinheiten heranzuziehen. Die Brandbekämpfung von Kleinbränden am oder im Turmfuß kann durchgeführt werden.

¹⁸ Kleinst-Solaranlagen, die direkt mit der Steckdose verbunden werden und somit Stromkosten sparen.

¹⁹ Dazu zählt neben den Modulen selbst die AC- und DC-Verkabelung, der Feuerwehrschatz, die Trennschalter, der Wechselrichter, alle dazugehörigen Anlagenteile und der Netzanschluss.

Bei großen Bränden oder Bränden in großer Höhe ist von einer Brandbekämpfung abzusehen. Hierbei überwiegt die Gefahr des Einsturzes und herumfliegender Trümmer. Lediglich die Brandausbreitung auf angrenzende Bebauung oder Vegetation kann verhindert werden. Hierbei ist ein ausreichender Absperrradius zu wählen und Absperrmaterial vorzuhalten. Details sind in einem besonderen Sonderalarmplan zu regeln. (DIN VDE 0132, 2018; Regierungspräsidium Darmstadt, 2020)

3.1.12 Unwetter

Die Auswirkungen von Unwettern steigen zum einen aufgrund von stärkeren und häufiger vorkommenden Wetterereignissen und zum anderen aufgrund zunehmender vulnerabler Infrastruktur. Lokale Stürme, Überschwemmungen oder Fluten sind zwar keine neuen Phänomene, müssen aber stets neu bemessen und deren Auswirkungen einer Risikoanalyse unterzogen werden. Lokale Starkregenereignisse nehmen zu. Schäden an Hochspannungsleitungen und Kraftwerken können in einem europäischen Verbundsystem flächendeckende Folgen haben. (Telefongespräch, 2021b)

3.1.13 Hochspannungsgleichstromübertragung

Der Autor hat keine Hinweise darauf, dass Hochspannungsgleichstromübertragungs-Systeme (HSG) gegenüber anderen Hochspannungs-Freileitungen für die Feuerwehr besondere Gefahren darstellen könnten. Es gilt die Beachtung der DIN VDE 0132 (2018) und die Einhaltung der darin genannten Abstände (siehe Tabelle 3.1). (Telefongespräch, 2021a)

3.2 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann bezüglich einer zunehmend dezentralen Energieerzeugung zwar von einem veränderten Einsatzspektrum gesprochen werden, in Bezug auf Einsatztaktik und Einsatzmittel konnten aber kaum Veränderungen ausfindig gemacht werden.

3.2.1 Einsatztaktik

Es zeigt sich, dass sich strategische Belange des Themenbereichs vor allem auf den vorbeugenden Brandschutz, die Ausbildung und das Wissensmanagement (Wissensbereitstellung und -übermittlung) beziehen. Grundlegende taktische Neuerungen konnten nicht erörtert werden. Einzelne Aspekte, Hinweise und Vorgehensweisen sind gelb hinterlegt in Kapiteln in Abschnitt 3.1 hervorgehoben.

3.2.2 Einsatzmittel

Auch ein Bedarf an besonderen Einsatzmitteln konnte nicht erhoben werden. Stromaggregate und Messkomponenten sollen vorgehalten werden. Spezialwerkzeug kann in bestimmten Fällen vorgehalten werden und sind in den Kapiteln grün hinterlegt.

4 Fazit und Ausblick

Die Literaturrecherche zu dieser Facharbeit zeigt klar, dass sich das Einsatzspektrum der Gefahrenabwehr in Zukunft an die veränderten Bedingungen in Zeiten eines grundlegenden Strukturwandelns ändern wird. Das betrifft klimabedingte Extremwetterbedingungen ebenso wie die menschliche Anpassung an diese. Einige Beispiele zeigten sich bereits in jüngster Vergangenheit. Auch die Energiewende birgt Chancen und Gefahren. Ein, ob durch Natur oder Mensch ausgelöster, *Blackout* hätte verheerende Folgen für die europäische Gesellschaft. Die in den Bevölkerungsschutz eingebundenen Strukturen müssen sich dem im Rahmen des Risikomanagements stellen und notwendige Vorbereitungen treffen.

In Hinblick auf die zunehmend dezentral organisierte Energieversorgung konnten bereits stattgefundene und mögliche folgende Entwicklungen umrissen werden. Die dadurch abgeleiteten Einsatzszenarien wurden einzeln erörtert. Es zeigt sich, dass weder die Taktik noch die Ausstattung der Feuerwehren als defizitär anzusehen sind. Vielmehr scheint hier die fehlende Routine eine gewisse Vorsicht und Irritation hervorzurufen, die vor allem durch Ausbildung und Wissensmanagement zu kompensieren ist. Auf strategischer Ebene könnten hier vor allem Standards für Hersteller und Bauherren sowie Forderungen seitens des vorbeugenden Brandschutzes den Einsatzkräften helfen.

4.1 Limitation

Die in der Diskussion aufgeführten Szenarien und Inhalte sind weder quantitativ noch qualitativ als abschließend zu betrachten. Die Entwicklungen der nächsten Zeit sind kaum abzusehen und auch inhaltlich stellen die spezifischen skizzierten Ergebnisse nur eine Momentaufnahme dar. Der Bereich *Blackout* wurde nur am Rande behandelt, auch wenn dieser das höchste Risiko für die Gesellschaft und Feuerwehr darstellt.

4.2 Ausblick

Zukünftig wird sich das Wissensmanagement der Feuerwehren auf die sehr heterogene Landschaft im Energiesektor einstellen müssen, gerade wenn Kennzeichnungen, Markierungen und Standards sich nicht vollends durchsetzen werden. Viele Teilesaspekte werden sich auch zunehmend der Zuständigkeit der Feuerwehr entziehen (bspw. Entsorgung von ausgebrannten Elektrofahrzeugen). Eine umfangreiche Marktbeobachtung, Anpassung und fortlaufende Reevaluation der Herangehensweisen und Mittel ist notwendig um den schnellen Entwicklungen gerecht zu werden. Ein umfangreiches Risiko- und Krisenmanagement, um den (potentiellen) aktuellen Gefährdungen zu begegnen, ist unabdingbar.

Literaturverzeichnis

acatech, 2020. *Zentrale und dezentrale Elemente im Energiesystem - Der richtige Mix für eine stabile und nachhaltige Versorgung*, München: Stellungnahme von Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (acatech), Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V.

AGBF, 2018. *Risikoeinschätzung Lithium-Ionen Speichermedien*, München: Empfehlung herausgegeben von Fachausschuss Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz der deutschen Feuerwehren in Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF).

AGBF, 2021. *Brandbekämpfung von Kraftfahrzeugen mit elektrischen Antrieben*, München: Empfehlung herausgegeben von Fachausschuss Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz der deutschen Feuerwehren in Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF).

ARGEBAU, 2020. *MBO*, s.l.: Musterbauordnung (MBO) erarbeitet von der Arbeitsgemeinschaft für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren (ARGEBAU) der Bauministerkonferenz.

ARGEBAU, 2021. *EltBauVO*, s.l.: Entwurf zum Muster einer Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen (EltBauVO) erarbeitet von der Arbeitsgemeinschaft für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren (ARGEBAU) der Bauministerkonferenz.

Asche, S., 2021. *Kein heißes Eisen*, s.l.: veröffentlicht in Fachzeitschrift "VDI-Nachrichten Nr. 39" herausgegeben von Verein Deutscher Ingenieure (VDI).

Brauner, G., 2009. *Perspektiven der dezentralen Energieversorgung*, s.l.: veröffentlicht in Fachzeitschrift "e & i Elektrotechnik & Informationstechnik" 126/3 im Springer Verlag.

Bundesverband Energiespeicher Systeme, 2021. *Vorbeugender und abwehrender Brandschutz bei Lithium-Ionen Großspeichersystemen*, Berlin: Fachveröffentlichung herausgegeben von Bundesverband Energiespeicher Systeme e. V. (BVES).

BVES, 2021. *Vorbeugender und abwehrender Brandschutz bei Lithium-Ionen Großspeichersystemen*, Berlin: Fachveröffentlichung herausgegeben von Bundesverband Energiespeicher Systeme e. V. (BVES).

Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2016. *Analyse: Momentanreserve 2030 - Bedarf und Erbringung von Momentanreserve 2030*, Berlin: Endbericht herausgegeben von Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

DIN VDE 0132, 2018. *Brandbekämpfung und technische Hilfeleistung im Bereich elektrischer Anlagen*, Berlin: herausgegeben von Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) und Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE).

Duman, M., 2018. *Konzept einer Messtechnik des Inselbetriebsexperiments der Versorgungsbetriebe Bordesholm*. Köln: Bericht herausgegeben von TH-Köln.

Elias Brunken et al, 2020. *Systemsicherheit 2050*, Berlin: Studie herausgegeben von Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

Fachverband Biogas, 2010. *Merkblatt M-001- Brandschutz bei Biogasanlagen*, Freising: Fachverband Biogas e. V.

FwDV 500, 2012. *Feuerwehrdienstvorschrift 500 - FwDV 500 - Einheiten im ABC – Einsatz*, s.l.: herausgegeben Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung des AK V der Innenministerkonferenz.

Georgiev, S., 2021. *Brandrisiko Elektroauto - Brandprävention und Brandbekämpfung bei Elektroautos*, Wien: Bericht herausgegeben von Kuratorium für Verkehrssicherheit (KfV).

Häberlin, H., Borgna, L. & Schäfer, P., 2011. *PV und Feuerwehr: Keine Panik, sondern realistische Einschätzung*, Burgdorf: 26. Symposium Photovoltaische Solarenergie Staffelstein.

Hüsch, F., 2018. *Einsatzhinweise für alternativ angetriebene Fahrzeuge und alternative Energieträger*, Bruchsal: Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg.

Kerber, S. & McKinnon, M., 2021. *Battery Safety Science Webinar Series: Advancing safer energy storage through science*, s.l.: Webimar vom 24.05.2021 der Underwriters Laboratories Inc. .

Konertz, M., 2018. *Solaranlagen für die Steckdose - Guerilla PV-Anlagen - Auswirkungen auf den Einsatz der Feuerwehr*, Brühl: Facharbeit (Brandreferendariat).

Maiworm, B., Menzinger, F. & Hanselmann, N., 2020. *Vorbeugender und abwehrender Brandschutz bei stationären Lithium-Ionen-Großspeichern*, Stuttgart: veröffentlicht in Fachzeitschrift "Brandschutz" 2/2020 im W. Kohlhammer Verlag.

Mönch-Tegeder, J., 2017. *E-Mobilität bei Einsatzfahrzeugen der Feuerwehren*, Hamburg: Facharbeit (Brandreferendariat).

Regierungspräsidium Darmstadt, 2020. *Merkblatt Windenergieanlagen*, Darmstadt: erstellt vom Fachausschuss Brandschutz beim Hessischen Ministerium des Innern und für Sport durch das Regierungspräsidium Darmstadt.

Slaby, C. & Wirsching, F., 2016. *Einsatztaktik*, Bruchsal: Lernunterlage der Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg.

Spyra, N. et al., 2018. *Großgasmotoren für die dezentrale Energieversorgung der Zukunft*, Wiesbaden: veröffentlicht in Fachbuch "Der Verbrennungsmotor - ein Antrieb mit Vergangenheit und Zukunft" herausgegeben von Tilo Roß & Antje Heine im Springer Verlag.

Staatliche Feuerwehrschulen Bayern, 2018. *Alternativ angetriebene Fahrzeuge*, Würzburg: Merkblatt für die Feuerwehren Bayerns herausgegeben von Staatliche Feuerwehrschule Würzburg.

Telefongespräch, 2021a. *Fachgespräch mit Björn Maiworm*, Münster: Per Telefon ohne Transkription am 08.10.2021 und 25.10.2021 mit Björn Maiworm und Carsten Mohr (Autor).

Telefongespräch, 2021b. *Fachgespräch mit Ulrich Cimolino*, Münster: Per Telefon ohne Transkription am 13.10.2021 mit Ulrich Cimolino und Carsten Mohr (Autor).

Telefongespräch, 2021c. *Fachgespräch mit Rolf-Dieter Erbe*, Münster: Per Telefon ohne Transkription am 13.10.2021 mit Rolf-Dieter Erbe und Carsten Mohr (Autor).

Telefongespräch, 2021d. *Fachgespräch mit Tim Schwarz*. Münster: Per Telefon ohne Transkription am 13.10.2021 mit Tim Schwarz und Carsten Mohr (Autor).

Tennet, 2014. *Auswirkungen reduzierter Schwungmasse auf einen stabilen Netzbetrieb*, s.l.: Bericht herausgegeben von 50hertz, Aamprion, Tennet und Transnet BW.

TÜV Rheinland, 2015. *Leitfaden: Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaik-Anlagen und Erstellung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung*, Köln: TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Branddirektion München, DGS – Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V., Berner Fachhochschule BFH, Energiebau Solarstromsysteme GmbH, Currenta GmbH & Co. OHG.

TÜV SÜD, 2021. *Impuls: Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge - Sicherheit und Risiken unter die Lupe genommen*, s.l.: Onlineseminar der TÜV Süd AG.

Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes, 2014. *Technischer Bericht - Die Zukunft der Feuerwehrtechnik - Teil 2 - Technische Entwicklung im Umfeld des Feuerwehrfahrzeuges*, s.l.: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb).

vfdb, 2014. *Merkblatt Empfehlung für den Feuerwehreinsatz bei Biogasanlagen*, Altenberge: Technisch-Wissenschaftlicher Beirat der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb).

Wikipedia, 2021a. *Kleinwasserkraft*. [Online]
Available at: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kleinwasserkraft>
[Zugriff am 02.11.2021].

Wikipedia, 2021b. *Erneuerbare-Energien-Gesetz*. [Online]
Available at: <https://de.wikipedia.org/wiki/Erneuerbare-Energien-Gesetz>
[Zugriff am 02.11.2021].

Wikipedia, 2021c. *Regelleistung (Stromnetz)*. [Online]
Available at: [https://de.wikipedia.org/wiki/Regelleistung_\(Stromnetz\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Regelleistung_(Stromnetz))
[Zugriff am 11.11.2021].

Würfel, P., 2017. *Unter Strom - Die neuen Spielregeln der Stromwirtschaft*, Heidelberg: Springer Verlag.

Anhänge

Im Folgenden sind Anhänge zur Veranschaulichung aufgeführt, die im Text erwähnt werden, inhaltlich und zum Verständnis aber nicht als notwendig erachtet wurden.

Anhang A: Zusätzliche Grafiken

		dezentral ← → zentral						
		Anschlussebene		Mittelpunkt		Hochspannung		Höchstspannung
Technische Dimension	Anlagengröße Erzeugung	Niederspannung		PV-Freiflächenanlage 1 MW	Windpark (klein) 5 MW	Solarpark (groß) 150 MW	Windpark (groß) 200 MW	Offshore-Windpark 5.000 MW
	Anlagengröße Flexibilität	Batteriespeicher (Haus) 15 kWh		Batteriespeicher 5 MWh	Speicherwasserkraftwerk			
Räumliche Dimension	Verbrauchsnähe der Erzeugung	innerhalb der Liegenschaft		innerhalb des Quartiers/Siedlung	innerhalb der Region	innerhalb des deutschen Übertragungsnetzes	außerhalb des deutschen Übertragungsnetzes	
		Haushalt: PV-Dachanlage	Industriebetrieb: KWK-Anlage	BHKW in Nahwärmenetz	Windkraft- und PV-Anlagen in Süddeutschland	Windkraft- und PV-Anlagen lastfern (Nord und Nordostdeutschland)	Offshore-Windpark	Stromimport EU
Integrations-dimension	Verbrauchsnähe der Flexibilität (kurzzeitig)	innerhalb der Liegenschaft		innerhalb des Quartiers/Siedlung	innerhalb der Region	innerhalb des deutschen Übertragungsnetzes	außerhalb des deutschen Übertragungsnetzes	
	Verbrauchsnähe der Flexibilität (langzeitig)	Batteriespeicher	DSM Wärmepumpe			Pumpspeicherwerke D	Speicherwasserkraftwerke (zum Beispiel Norwegen)	
Koordinations-dimension	Zellgröße	innerhalb eines Gebäudes	Arealnetz innerhalb eines Quartiers (ohne Nutzung des öffentlichen Netzes)	Peer-to-Peer Stromhandel mit Nutzung des öffentlichen Netzes	regionaler Stromhandel	Gasturbinkraftwerk		Kraftwerke im europäischen Verbund
							Strombörse	

Abbildung A.1: Dimensionen der Dezentralität (aus acatech, 2020)

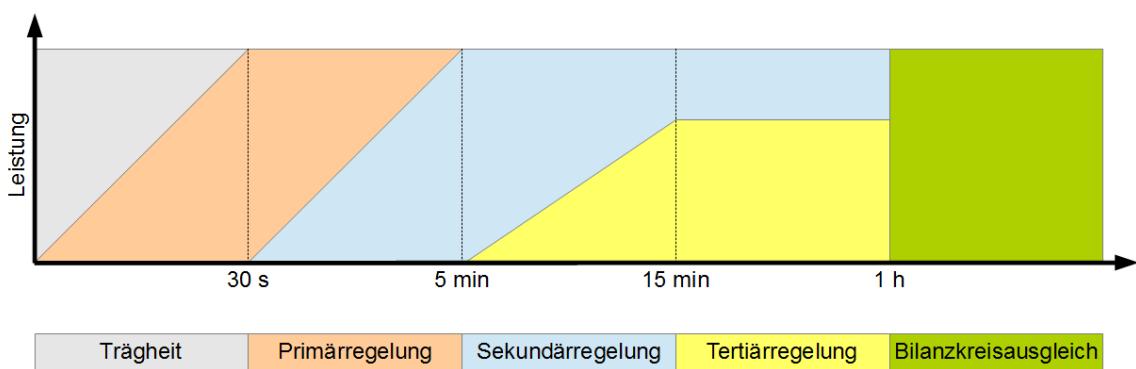


Abbildung A.2: Regelleistungen im Stromnetz (aus Wikipedia, 2021c)

Anhang B: Gesprächspartner

Im Rahmen der Facharbeit wurden mit verschiedenen Personen aus dem Themenbereich Fachgespräche geführt²⁰. Sie sind in Tabelle B.1 aufgeführt:

Tabelle B.1: Gesprächspartner

Name	Expertise
Dr. Cimolino, Ulrich	Stabsstelle für klimabedingte Großeinsätze, Autor
Dr. Erbe, Rolf-Dieter	Dozent und Referent im Bereich Elektrofahrzeuge
Fritzen, Benno	Experte im Bereich Resilienz und Bevölkerungsschutz
Maiworm, Björn	Fachautor und Referent im Bereich elektrische Anlagen
Schwarz, Tim	Experte im Bereich KRITS

Der Autor dankt den Gesprächspartnern für ihre Zeit und das Teilen ihrer Fachexpertise.

²⁰ Die Telefongespräche sind in der Arbeit mit folgenden Quellenangaben referenziert und im Literaturverzeichnis aufgenommen: (Telefongespräch, 2021a; Telefongespräch, 2021b; Telefongespräch, 2021c; Telefongespräch, 2021d)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Carsten Mohr, die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der von mir angegebenen Quellen angefertigt zu haben. Alle aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche gekennzeichnet.

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

Münster, 20.12.2021

.....

Carsten Mohr