

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences**

**Einsatz von Brennstoffzellen in der Notstromversorgung
Theoretische Analyse und Erhebung praxisrelevanter Anforderungen**

Bachelorarbeit

im Studiengang Gefahrenabwehr

vorgelegt von

Marvin Hamann

Matrikelnummer: [REDACTED]

Hamburg, am 13.04.2026

Gutachter: Prof. Dr. Udo van Stevendaal (HAW Hamburg)

Gutachter: M.Sc Markus Wiedemann (HAW Hamburg)

Abstract

Die Sicherstellung der Notstromversorgung ist für kritische Infrastrukturen sowie Feuerwehren und Katastrophenschutzbehörden essenziell, da langanhaltende Stromausfälle eine Gefahr für die moderne Gesellschaft darstellen. Während die Notstromversorgung nahezu ausschließlich über Diesellaggregate erfolgt, rücken wasserstoffbasierte Brennstoffzellen, insbesondere die Protonenaustauschmembranbrennstoffzelle, in den Fokus. Insbesondere ihr emissionsarmer und potenziell wartungsarmer Betrieb macht sie relevant. Unklar ist jedoch, ob diese Technologie die technischen und praxisrelevanten Anforderungen im Katastrophenschutz vollumfänglich erfüllen kann.

Ziel der Arbeit ist es, die Anforderungen an Notstromaggregate aus Anwendersicht systematisch zu erheben und mit den Eigenschaften abzugleichen. Grundlage ist eine schriftliche qualitative Expertenbefragung (E-Mail) mit $n = 23$ Funktionsträgern aus administrativen und operativen Ebenen des Katastrophenschutzes. Die Auswertung orientiert sich an einer inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Brennstoffzellen zentrale Anforderungen, wie Zuverlässigkeit, Lärmreduktion und Wartungsarmut überwiegend besser abdecken als konventionelle Diesellaggregate. Als wesentliche Einschränkung werden jedoch die geringe volumetrische Energiedichte von Wasserstoff, die fehlende logistische Infrastruktur sowie technische Herausforderungen beim Kaltstart unter Frostbedingungen identifiziert. Während im Leistungsbereich unter 20 kW bereits die Brennstoffzelle wirtschaftlich konkurrenzfähig ist, kann sie in größeren Leistungsbereichen aufgrund der Speicherlogistik und Systemkosten derzeit keine vollwertige Alternative zum Diesel bieten.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	2
2.1 Grundlagen der Sicherheits- und Ersatzstromversorgung	2
2.2 Funktionsprinzip und Klassifizierung der Brennstoffzelle.....	3
2.3 Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEMFC)	5
2.4 Betriebsrelevante Aspekte und Brennstoffversorgung	6
3. Methodik	8
3.1 Forschungsansatz und Begründung.....	8
3.2 Datenerhebung und Instrumente	8
3.3 Zielgruppe und Stichprobenziehung	9
3.4 Datenaufbereitung und Auswertung.....	10
3.5 Wissenschaftliche Gütekriterien.....	11
4. Ergebnisse	13
4.1 Überblick über das Kategoriensystem.....	13
4.2 Zentrale Anforderungen	14
4.3 Leistung.....	16
4.4 Spezifische Betriebsaspekte	17
4.5 Problemlagen der Bestandstechnik	18
4.6 Relevante Erfahrungen	20
4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse	21
5. Diskussion	23
5.1 Ergebnisse in Hinblick auf die Forschungsfrage.....	23
5.2 Abgleich mit normativen und technischen Parametern	24
5.3 Kritische Würdigung der Methodik	27
5.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse	28
5.5 Ausblick und Forschungsbedarf	29

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Energieumwandlung in einer Brennstoffzelle. ΔQ : Wärmeverluste (eigene Darstellung).....	3
Abb. 2: Schematische Energieumwandlung eines Diesellaggregats. ΔQ : Wärmeverluste (eigene Darstellung).....	3

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Eigenschaften der Brennstoffzellentypen (in Anlehnung an [9 S. 416].).....	4
Tab. 2: Übersicht der Stichprobenzusammensetzung.....	13
Tab. 3: Übersicht der Hauptkategorien und Häufigkeiten.....	14
Tab. 4: Top-5 Zentrale Anforderungen.....	14
Tab. 5: Aufteilung der Leistungsbereiche.....	16
Tab. 6: Übersicht der spezifischen Betriebsaspekte	17
Tab. 7: Übersicht Problemlagen in der Bestandstechnik.....	19
Tab. 8: Übersicht der relevanten Erfahrungen.....	20

Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMFC	Direktmethanol-Brennstoffzelle
EV	Ersatzstromversorgung
HT-PEMFC	Hochtemperaturpolymerelektrolytbrennstoffzelle
MEA	Membran-Elektroden-Einheit
NT-PEMFC	Niedertemperaturpolymerelektrolytbrennstoffzelle
PEMFC	Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle, auch Polymer- elektrolytbrennstoffzelle
SV	Sicherheitsstromversorgung
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

1. Einleitung

Die Versorgungssicherheit der deutschen Stromnetze gilt im internationalen Vergleich als sehr hoch. Dennoch ermittelte die Bundesnetzagentur für das Jahr 2024 eine durchschnittliche Netzunterbrechung von 11,7 Minuten je Letztverbraucher [1]. Dass diese statistischen Durchschnittswerte die tatsächliche Verwundbarkeit der modernen Infrastruktur nur bedingt abbilden, verdeutlichen Ereignisse wie der Stromausfall im Berliner Südwesten (Januar 2026) oder die Schneekatastrophe im Münsterland (November 2005). 2026 führte ein Brand an einer Kabelbrücke dazu, dass zehntausende Haushalte und Gewerbebetriebe tagelang von der Energie- und Fernwärmeversorgung abgeschnitten waren [2]. 2005 wiederum führten extreme Schneelasten zum Zusammenbruch zahlreicher Strommasten und zu Stromausfällen von bis zu einer Woche, die rund 250.000 Menschen betrafen [3,4]. Diese Ereignisse zeigen, wie schnell alltägliche Situationen in eine Krisenlage übergehen können, in der eine autarke Notstromversorgung erforderlich wird.

In der Praxis erfolgt die Notstromversorgung aktuell überwiegend über Dieselaggregate. Diese weisen jedoch einsatzrelevante Nachteile auf. Neben Lärm- und Abgasemissionen stellen insbesondere die Kraftstoffalterung bei langen Standzeiten ein erhebliches Zuverlässigkeitsrisiko dar. Vor dem Hintergrund zunehmender Anforderungen an Umweltverträglichkeit und Arbeitsbedingungen rücken wasserstoffbasierte Brennstoffzellen, insbesondere die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (kurz PEMFC) in den Fokus. Diese zeichnet sich durch ihren geräuscharmen und emissionsfreien Betrieb aus [5].

Unzureichend geklärt ist bislang, ob Brennstoffzellensysteme die technischen und praxisrelevanten Anforderungen von Feuerwehren und Katastrophenschutzbehörden erfüllen. Während normative Vorgaben (z. B. Umschaltzeit) einzelne Randbedingungen definieren, fehlt ein systematisch erhobenes anwenderbasiertes Anforderungsprofil, das Beschaffung und Bewertung der Brennstoffzelle im Katastrophenschutz belastbar unterstützt. Genau an dieser Schnittstelle aus Technik, Normen und Einsatzpraxis setzt die vorliegende Arbeit an. Die Arbeit beantwortet daher die Forschungsfrage:

„Erfüllen Brennstoffzellen die technischen und praxisrelevanten Anforderungen der Notstromversorgung aus der Sicht von Feuerwehren und Katastrophenschutzbehörden?“

Ziel ist es, die Anforderungen an Notstromaggregate aus Anwendersicht systematisch zu erheben und anschließend mit den technischen Eigenschaften der PEMFC abzugleichen. Dazu wird eine qualitative Expertenbefragung mit Funktionsträgern aus administrativen und operativen Ebenen des Katastrophenschutzes durchgeführt.

2. Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel definiert die technischen und normative Grundlage für die Bewertung der Brennstoffzellentechnologie. Dazu werden zunächst die regulatorischen Anforderungen und Rahmenbedingungen erläutert (z. B. Umschaltzeit), bevor die physikalisch-technischen Funktionsweise und die Speicherlogistik von Brennstoffzellensystemen dargestellt werden.

2.1 Grundlagen der Sicherheits- und Ersatzstromversorgung

Die Notstromversorgung dient als Oberbegriff für technische Systeme, die bei einem Ausfall des öffentlichen Netzes die elektrische Energieversorgung sicherstellen. Die DIN VDE 0100-200 differenziert grundlegend zwischen zwei Versorgungsarten, die für die Planung im Katastrophenschutz normativ von Bedeutung sind [6].

1. Ersatzstromversorgung (EV): Diese dient dem Weiterbetrieb von elektrischen Verbrauchern, die nicht zwingend sicherheitsrelevant sind [6].
2. Sicherheitsstromversorgung (SV): Sie ist Teil der elektrischen Anlage für Sicherheitszwecke und versorgt Verbraucher, die dem Schutz von Personen und Tieren sowie der Vermeidung von Umwelt- und Sachschäden dienen [6].

Ein entscheidendes Qualitätsmerkmal der SV ist die Umschaltzeit. Diese wird nach DIN VDE 0100-560 als die Zeitspanne definiert, die zwischen dem Ausfall der Stromversorgung und der Wiederherstellung der Versorgung durch die SV vergeht [7]. Die Norm unterteilt die automatische Versorgung in verschiedene Klassen anhand der Umschaltzeit t :

- Klasse A: $t = 0$ s (Keine Unterbrechung)
- Klasse B: $t < 0,15$ s sehr kurze Unterbrechung
- Klasse C: $t < 0,5$ s kurze Unterbrechung
- Klasse D: $t < 5$ s durchschnittliche Unterbrechung
- Klasse E: $t < 15$ s mittlere Unterbrechung
- Klasse F: $t \geq 15$ s lange Unterbrechung [7].

Für zeitkritische Anwendungen (z. B. Krankenhäuser) fordert DIN 6280-13, dass innerhalb von 15 s mindestens 80 % der Nennleistung zur Verfügung sind. Die vollständige Leistungsabgabe (100 %) müssen innerhalb weiterer 5 s bereitstehen [8]. Diese Zeitvorgaben dienen im weiteren Verlauf als Referenzrahmen zur Bewertung der Start- und Kaltstartfähigkeit von Brennstoffzellen.

2.2 Funktionsprinzip und Klassifizierung der Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle basiert auf der direkten Umwandlung der im Brennstoff gespeicherten chemischen Energie in elektrische Energie und Wärme [9]. In Abbildung 1 ist die Energieumwandlung dargestellt, ΔQ kennzeichnet dabei die Wärmeverluste.



Abb. 1: Schematische Energieumwandlung in einer Brennstoffzelle. ΔQ : Wärmeverluste (eigene Darstellung)

Im Gegensatz zu konventionellen Wärmekraftmaschinen, z. B. Dieselaggregaten, erfolgt die Umwandlung nicht über die verlustbehafteten Zwischenstufen der thermischen und mechanischen Energie [10]. Da dieser Prozess keinem Verbrennungsvorgang unterliegt, entfällt die Begrenzung durch den Carnot-Wirkungsgrad [11]. Als Alternative ergibt sich der thermodynamische Wirkungsgrad η_{rev} aus dem Verhältnis der freien Reaktionsenthalpie (Gibbs-Energie) ΔG zur gesamten Reaktionsenthalpie ΔH :

$$\eta_{\text{rev}} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

ΔG repräsentiert den maximalen Anteil der chemischen Energie, der theoretisch direkt in elektrische Arbeit umgewandelt werden kann. Die Differenz zwischen ΔH und ΔG entspricht dem Term $T \cdot \Delta S$, welcher die reversiblen Wärmeverluste aufgrund der Entropieänderung beschreibt. Da dieser reversible Wärmestrom mit steigender Temperatur T zunimmt, sinkt der thermodynamische Wirkungsgrad der Brennstoffzelle [12 S. 73–75, 13 S. 843].

In der Abbildung 2 wird der mehrstufige Umwandlungsprozess eines Dieselaggregats verdeutlicht, der mit höheren Wärmeverlusten und einem entsprechend niedrigeren Gesamtwirkungsgrad von ca. 40 % verbunden ist [14 S. 643].

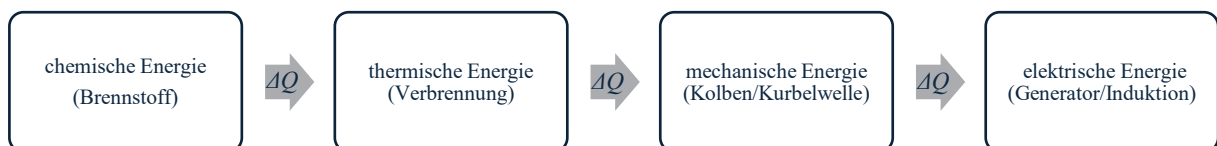


Abb. 2: Schematische Energieumwandlung eines Dieselaggregats. ΔQ : Wärmeverluste (eigene Darstellung)

Jede Brennstoffzelle besteht im Kern aus zwei porösen Elektroden, der Anode (negativ geladene Elektrode) und der Kathode (positiv geladene Elektrode), sowie einem ionenleitenden, aber elektrisch isolierenden Elektrolyten (zur Protonenübertragung) [9, 15]. An der Anode oxidiert der zugeführte Wasserstoff

wobei Protonen (H^+) und Elektronen (e^-) entstehen. Die Protonen diffundieren durch den Elektrolyten zur Kathode, während die Elektronen über einen äußeren Stromkreis abfließen und beim Verbraucher elektrische Arbeit verrichten. Bei der Kathode reagieren Sauerstoff, Elektronen und Protonen schließlich zu Wasser (H_2O) [12]. Die chemische Reaktion lässt sich wie folgt darstellen [16]:



Da die Zellenspannung einer einzelnen Zelle unter Last 0,5 bis 1,0 V beträgt, werden eine Vielzahl an Zellen elektrisch in Reihe zu einem Stack (Zellenstapel) geschaltet [12 S. 7].

Die unterschiedlichen Brennstoffzellentypen werden primär durch ihren Elektrolyt, aber auch den Temperaturbereich differenziert [9]. Die Bereiche werden dabei in Niedertemperatur- ($< 100\text{ °C}$), Mitteltemperatur- ($\sim 200\text{ °C}$) und Hochtemperaturbrennstoffzellen ($> 600\text{ °C}$) unterteilt [9 S. 407]. Tabelle 1 stellt die gängigen Brennstoffzellentypen mit ihren Elektrolyten, Brennstoffen und Zellentemperatur dar.

Tab. 1: Eigenschaften der Brennstoffzellentypen (in Anlehnung an [9 S. 416].)

Brennstoffzellentyp	Elektrolyt	Brennstoff	Oxidator	Temperatur
Alkalische Brennstoffzelle (AFC)	Kalilauge (KOH)	H_2	O_2	$60 - 100\text{ °C}$
Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEMFC)	Protonenleitende Membran	H_2 , Methanol (CH_3OH)	O_2 , Luft	$60 - 80\text{ °C}$
Phosphorsäure Brennstoffzelle (PAFC)	H_3PO_4	H_2 , Methan (CH_4)	O_2 , Luft	$160 - 220\text{ °C}$
Schmelzkarbonat Brennstoffzelle (MCFC)	$Li_2CO_3 + K_2CO_3$	H_2 , Methan (CH_4)	O_2 , Luft	$600 - 660\text{ °C}$
Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)	ZrO_2	H_2 , Methan (CH_4)	O_2 , Luft	$800 - 1000\text{ °C}$

Aufgrund der Betriebstemperatur eignen sich für zeitkritische Anwendungen mit schnellen Kaltstartanforderungen ausschließlich Niedertemperaturbrennstoffzellen [17]. Da die PEMFC zudem eine hohe Leistungsdichte aufweist und sich im Automobilsektor bereits bewährt hat, fokussiert die vorliegende Arbeit im Folgenden ausschließlich die PEMFC [18].

2.3 Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEMFC)

Die PEMFC (auch Polymerelektrolytbrennstoffzelle oder engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell) wird aufgrund ihrer Leistungsdichte und kompakten Bauart bereits in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt [13,19]. Das zentrale Element ist die Membran-Elektroden-Einheit (MEA) [20]. Die MEA der PEMFC setzt sich aus den nachfolgenden Komponenten zusammen:

- Elektrolytmembran: Eine gasdichte, jedoch protonenleitende Polymerfolie, welche die Reaktionsgase trennt und den internen Ionenfluss ermöglicht [10].
- Katalysatorschicht: Feinporige Elektrode (meist Platin oder Platinlegierungen), die beidseitig auf die Membran aufgebracht ist und an der die elektrochemischen Teilreaktionen ablaufen [12].
- Gasdiffusionslagen: Poröse Kohlefaserpapiere, die mit der MEA verbunden sind und für eine gleichmäßige Gasverteilung sorgen und das entstehende Produktwasser abführen [12]. Eine Hydrophobierung ist notwendig, um eine Verstopfung der Poren durch das flüssige Reaktionswasser zu verhindern [9].
- Bipolarplatten: Sie stellen die elektrische Verbindung zwischen den Zellen her und verteilen die Gase über eingearbeitete Kanalstrukturen (engl. Flow Fields) [9,20]. Zur Nutzung höherer technisch nutzbarer Spannungen wird eine Vielzahl von Einzelzellen elektrisch in Reihe über die Bipolarplatte zu einem Stack verschaltet [12].

Zusätzlich wird die PEMFC technisch nach dem verwendeten Elektrolyten und den damit einhergehenden Eigenschaften wie folgt differenziert:

- Hochtemperatur-PEMFC (HT-PEMFC): Arbeitet bei Temperaturen um 200 °C. Dabei wird eine Polybenzimidazol-Folie als Membran verwendet, in welche Phosphorsäure als Elektrolyt eingelagert ist [9]. Sie bietet eine hohe Toleranz gegenüber Verunreinigungen wie Kohlenmonoxid (CO) und benötigt kein aktives Wassermanagement, da der Protonentransport über die Phosphorsäure stattfindet [9,20]. Allerdings ist die Leistungsdichte durch die Phosphorsäure geringer als bei Wasser [20].
- Niedertemperatur-PEMFC (NT-PEMFC): Operiert im Bereich von 60 bis 80 °C mit einer befeuchteten Polymerfolie (meist Nafion) [12]. Da ihre Protonenleitfähigkeit vom Wassergehalt der Membran abhängt, ist ein präzises Feuchtmanagement erforderlich [21].

Aufgrund der höheren Leistungsdichte und der schnelleren Startzeit fokussiert die vorliegende Arbeit ausschließlich die NT-PEMFC [20]. Sofern nicht anders spezifiziert, wird der Begriff PEMFC daher synonym für die Niedertemperatur-Variante verwendet.

2.4 Betriebsrelevante Aspekte und Brennstoffversorgung

Im Folgenden werden technische Randbedingungen dargestellt, die eine Auslegung und den Betrieb von PEMFC in Notstromsystemen beeinflussen und später mit den statistisch erhobenen Anforderungen abgeglichen werden:

Wirkungsgrad und Lastabhängigkeit: Der Wirkungsgrad einer PEMFC ist unmittelbar von der jeweiligen Leistungsabgabe abhängig. Dabei ist zwischen Zellenwirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad zu unterscheiden, da die Peripherie (z. B. Luftversorgung oder Kühlung) den Wirkungsgrad reduziert. Der Zellenwirkungsgrad erreicht dabei im Teillastbereich rund 65 %, sinkt unter Volllast allerdings auf 55 % ab [22 S. 194]. Je geringere die Last desto höher ist der Wirkungsgrad [9]. Bei realen Anwendungsbeispielen (z. B. Pkw) werden Gesamtsystemwirkungsgrad zwischen 45 % (Volllast) und knapp 60 % (Teillast) erzielt [22 S. 194]. Dies ist für Notstromanwendungen relevant, da diese häufig im Teillastbereich betrieben werden.

Kaltstartverhalten: Ein Startvorgang bei Temperaturen unter 0 °C stellt eine Herausforderung dar, da das bei der Reaktion produzierte Wasser gefrieren kann [19,23]. Es bildet sich Eis in den Poren der kathodenseitigen Katalysatorschicht. Dies verhindert den Sauerstofftransport und reduziert die elektrochemisch aktive Fläche. Ein erfolgreicher Selbststart gelingt nur, wenn die durch die chemischen Prozesse erzeugte Abwärme die Zelle über den Gefrierpunkt erwärmt, bevor eine vollständige Eisblockade eintritt [23]. Strategien zur Sicherstellung der Startfähigkeit umfassen einen Spülvorgang (engl. Purge). Dadurch wird das Restwasser in der Membran reduziert. Alternativ bietet sich ein potentiostatischer Start bei niedriger Zellspannung an [23–25]. Letzterer erzwingt einen niedrigen Wirkungsgrad, wodurch die Wärmeentwicklung zulasten der elektrischen Leistung maximiert wird, um die Zelle schnellstmöglich aufzutauen [18].

Sensibilität gegenüber Verunreinigungen: Aufgrund der niedrigeren Betriebstemperatur reagieren die Platin-Katalysatoren empfindlich auf Fremdstoffe im Brenngas. Dies ist besonders relevant, wenn der Wasserstoff durch eine Reformierung von Methan oder Methanol erzeugt wird [9]. Bereits niedrige Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid von < 10 ppm können eine Katalysatorvergiftung herbeiführen. Während eine Vergiftung durch CO leicht reversibel ist, sind Vergiftungen der Anode durch H₂S oder NH₃ schwer reversibel [20 S. 276–277]. Ein stabiler Dauerbetrieb erfordert daher reinen Wasserstoff der Qualität 5.0 oder Filtersysteme zur Entfernung möglicher Verunreinigungen im Brenngas [12].

Speicherung von Wasserstoff: Sie stellt aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte sowie der spezifischen molekularen Eigenschaften eine technische Herausforderung dar [26]. Als kleinstes existierendes Molekül besitzt Wasserstoff ein hohes Diffusionsvermögen und eine geringe Viskosität, wodurch das Gas leicht durch Dichtungen oder Werkstoffe dringen kann [26]. Zur Lagerung haben sich die nachfolgenden drei Methoden etabliert:

1. Druckgasspeicherung: Lagerung in Hochdruckbehältern bis zu 1000 bar, typischerweise werden 350 oder 700 bar verwendet. Um das hohe Gewicht herkömmlicher Stahltanks zu reduzieren, kommen moderne Verbundtanks zum Einsatz. Daraus ergibt sich eine volumetrische Energiedichte von 1,6 kWh/L bei 700 bar, bei einem Verdichtungsverlust von 12 % [27 S. 779].
2. Flüssiggasspeicherung: Abkühlung des Wasserstoffes auf eine Temperatur von ca. -253 °C, dabei geht Wasserstoff in einen flüssigen Aggregatzustand über, was eine höhere volumetrische Energiedichte von 2,4 kWh/L ermöglicht. Der Verflüssigungsverlust variiert zwischen 28 - 46 % [27 S. 779–780]. Zudem treten durch Wärmeeinträge in den Tanks Boil-off-Verluste auf, bei denen verdampfendes Gas zur Druckbegrenzung kontrolliert abgelassen werden muss [18].
3. Metallhydridspeicher: Eine reversible chemische Bindung des Wasserstoffs in metallischen Gitterstrukturen, was eine Lagerung bei vergleichsweise geringen Drücken ermöglicht [12,28]. Wesentliche Nachteile sind das sehr hohe Systemgewicht, da die Metalllegierungen nur meist 1 - 3 % ihres Eigengewichts aufnehmen können. Zudem ist bei der Entnahme vom Wasserstoff eine aktive Wärmezufuhr notwendig [12 S. 244–246].

Diese beschriebene Randbedingungen bilden die Grundlage für den späteren Abgleich der von den Experten genannten Anforderungen.

3. Methodik

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen der Untersuchung beschrieben. Ziel ist es, die spezifischen technischen und praxisrelevanten Anforderungen an Notstromaggregate aus Expertenperspektive im Katastrophenschutz zu erfassen. Hierzu wurde ein qualitativ-explorativer Forschungsansatz ausgewählt, bei dem die Datenerhebung mittels schriftlicher Expertenbefragung erfolgt. Dieses Vorgehen schafft eine methodisch fundierte Grundlage für einen technischen Abgleich der Brennstoffzelle.

3.1 Forschungsansatz und Begründung

Die methodische Gestaltung dieser Arbeit ist unmittelbar aus der Forschungsfrage abgeleitet. Da die spezifischen Anforderungen an eine Notstromversorgung innerhalb der verschiedenen Organisationen im Katastrophenschutz stark variieren und bislang kein standardisiertes Anforderungsprofil für Brennstoffzellen vorliegt, ist ein qualitativ-exploratives Forschungsdesign erforderlich. Dieser Ansatz ermöglicht, über rein messbare Standardparameter (z. B. Spannung) auch die individuellen Rahmenbedingungen der Anwender (z. B. einsatztaktische Konzepte oder Erfahrungen aus der Praxis) systematisch zu erfassen [29]. Anstatt festgelegte Hypothesen statistisch zu prüfen, erlaubt das qualitative Vorgehen eine offene Suche nach den Faktoren, die eine Integration der Brennstoffzelle begünstigen oder behindern [29].

Als konkrete Erhebungsmethode wird eine schriftliche Expertenbefragung mit offenen Fragen angewandt. Die Datengewinnung erfolgt dabei per E-Mail, was eine zeitunabhängige Teilnahme ermöglicht und eine hohe regionale Bandbreite an Organisationen erschließt [30]. Diese Wahl begründet sich daran, dass die Befragten als Funktionsträger ihrer jeweiligen Organisation über technisches Fachwissen sowie prozessbezogene Kenntnisse zur Beschaffung von Notstromaggregaten verfügen. Das Ziel ist dabei die Gewinnung von Informationen über reale Einsatzbedingungen und technische Voraussetzungen, weshalb das Expertenwissen als Informationsquelle behandelt wird [31]. Die daraus erhobenen Daten stellen ein anwenderbasierte Anforderungsprofil und die Grundlage für den Abgleich mit den Eigenschaften der PEMFC dar.

3.2 Datenerhebung und Instrumente

Die Datenerhebung dieser Untersuchung erfolgte im Rahmen einer E-Mail-Befragung. Dieses Format wurde gewählt, um eine breite regionale Abdeckung innerhalb von Deutschland zu erreichen.

Durch die schriftliche Durchführung können Vorteile für die Datenqualität erzielt werden. Die mediale Distanz reduziert potenzielle Interviewer-Effekte (Bias) hinsichtlich Alter oder Status, während die

zeitversetzte Kommunikation den Experten einen zeitlichen Raum zum Antworten gibt. Da die Antworten originär in digitaler Textform vorliegen, werden Transkriptionsfehler und Informationsverluste verringert [30,32]. Gleichzeitig sind Nachfragen im Vergleich zu mündlichen Interviews nur eingeschränkt möglich. Bei unklaren Angaben wurde bewusst auf Rückfragen verzichtet, da dadurch für alle Teilnehmenden identische Bedingungen gewährleistet und eine Beeinflussung der Antworten vermieden werden sollte. Insbesondere sollte keine nachträgliche Schwerpunktsetzung durch den Forschenden entstehen.

Der Fragenkatalog umfasste fünf offene Fragen zu (1) Anforderungen an Notstromaggregate, (2) typischer Leistung, (3) Prioritäten/Betriebsaspekte, (4) Probleme bestehender Lösungen sowie (5) weiteren relevanten Punkten. Die vollständige E-Mail ist im Anhang A.1 dokumentiert.

Das offene Antwortformat ermöglicht den Befragten eine freie, eigenständige Darstellung. Die zugesicherte Vertraulichkeit und Anonymisierung dient dabei nicht nur der Förderung der Authentizität der Expertenberichte, sondern auch der Minimierung personenbezogener Einflüsse (z. B. aufgrund des Namens) [30,32].

3.3 Zielgruppe und Stichprobenziehung

Die Auswahl der Experten folgte dem Prinzip der kriteriengeleiteten bewussten Auswahl [33]. Als Zielgruppe wurden ausschließlich Funktionsträger innerhalb des Katastrophenschutzes definiert, die Verantwortung für Planung, Beschaffung oder Betrieb von Notstromlösungen tragen oder als operative Führungskraft Erfahrung mit Notstromlagen besitzen [31]. Um ein breites Spektrum an praxisrelevanten Anforderungen abzubilden, umfasst die Stichprobe sowohl die administrative Ebene (z. B. Katastrophenschutzbehörden der Landkreise) als auch die operative Ebene (z. B. Feuerwehr oder Technisches Hilfswerk).

Die Felderschließung erfolgte nach einem relevanzorientierten Priorisierungsschema. In einer ersten Phase wurden gezielt größere und strukturell komplexere Organisationen kontaktiert, da diese aufgrund ihrer Größe bereits über ein Anforderungsprofil verfügen können. In der nachfolgenden Welle wurde die Stichprobe gezielt um kleinere Organisationen ergänzt, um Anforderungen über unterschiedliche Organisationsgrößen darzustellen [31]. Damit wurde sichergestellt, dass sowohl die Bedarfe von Metropolregionen als auch die spezifischen Rahmenbedingungen im ländlichen Raum berücksichtigt werden. Eine mögliche Verzerrung durch die initiale Fokussierung auf große Organisationen wird als Limitierung berücksichtigt.

Das Sampling wurde als wiederholender Prozess gestaltet, bei dem die Rückmeldungen laufend geprüft wurden, um festzustellen, ob neue Anforderungen bzw. Kategorien generiert werden konnten. Dieser Prozess wurde abschließend beendet, sobald die theoretische Sättigung erzielt wurde. Als theoretische

Sättigung wurde der Zeitpunkt definiert, ab dem zusätzliche Rückmeldungen keine neuen Hauptkategorien bzw. Anforderungen mehr lieferten und sich die grundlegenden Anforderungen wiederholten [31].

Insgesamt wurden bundesweit 100 Organisationen kontaktiert. Die Erhebung wurde beendet als sich eine theoretische Sättigung zeigte. Aus den 29 eingegangenen Rückmeldungen (Rücklaufquote 29 %) wurden $n = 23$ verwertbare Berichte für die finale Analyse herangezogen, während die verbleibenden sechs Fälle als begründete Ausschlussfälle dokumentiert wurden (z. B. aufgrund von Zeitmangel).

3.4 Datenaufbereitung und Auswertung

Die Auswertung der Rückmeldungen orientiert sich an der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz. Diese Methode wurde gewählt, da sie ein regelgeleitetes Vorgehen mit einer für die explorativen Forschung notwendigen interpretativen Offenheit verbindet [29].

Vor der eigentlichen Analyse wurden die Daten in einem mehrstufigen Prozess aufbereitet, um den persönlich gesetzten datenschutzrechtlichen Anforderungen gerecht zu werden:

1. Extraktion: Die schriftlichen Antworten wurden aus den ursprünglichen E-Mails entnommen und in eine lokal gespeicherte Excel-Datei überführt.
2. Anonymisierung: In diesem Dokument wurden sämtliche personenbezogene Daten, wie Organisationsname sowie spezifische Ortsangaben konsequent entfernt. Ziel war eine bestmögliche Anonymisierung der Analysedaten (Entfernung identifizierender Angaben).
3. Zuordnung von IDs: Zur Sicherung der Nachvollziehbarkeit wurde jedem anonymisierten Expertenbericht eine eindeutige Fall-ID (z. B. Experte 01) zugeordnet. Eine separate Liste zur Entschlüsselung wurde zur internen Verwaltung angelegt, jedoch strikt getrennt von den Analysedaten aufbewahrt.

Um die Belege im Ergebnisteil eindeutig dem Fragenkatalog zuordnen zu können, erfolgte die Kennzeichnung nach dem Schema [Fall-ID: Fragen-ID]. Ein Verweis auf die Antwort von Experte 02 zu Frage 4 wurde demnach als [Fall 02: F4] dokumentiert.

Der eigentliche Analyseprozess gliederte sich in den folgenden fünf Phasen:

1. Initiierende Textarbeit: Zunächst erfolgte ein intensives Lesen aller 23 Expertenberichte, um ein Gesamtverständnis für die jeweiligen Kontexte zu entwickeln und auffällige Anforderungen zu markieren [29].
2. Kategorienbildung: Im Sinne eines deduktiv-induktiven Vorgehens wurden zunächst fünf Hauptkategorien direkt aus dem Fragenkatalog der E-Mail abgeleitet (deduktiv) [29 S. 102–103]. Diese wurden im weiteren Verlauf durch Unterkategorien ergänzt, die unmittelbar aus

dem Material der Experten entwickelt wurden (induktiv), um die spezifischen Anforderungen abzubilden [29 S. 71].

3. Erstellung eines Codebuchs: Zur Sicherung der Nachvollziehbarkeit und der Auswertungsqualität wurde ein Codebuch erstellt. Dieses enthält Definitionen jeder Kategorie, Abgrenzungsregeln sowie Ankerzitate, die als Beispiel für die korrekte Zuordnung dienen [29].
4. Codierung und Extraktion: Das gesamte schriftliche Material wurde durchgearbeitet, wobei 345 Segmente (inhaltlich geschlossene Sinneinheiten) identifiziert und den Kategorien zugeordnet wurden. Es wurden Kategorien so codiert, dass codierte Segmente auch ohne den unmittelbaren Kontext verständlich bleiben [29].
5. Einfache Quantifizierung: Zur Ergänzung der qualitativen Befunde wurden die Häufigkeiten der Kategoriennennung in Excel ermittelt. n bezeichnet die Anzahl der Fälle, die eine Kategorie mindestens einmal nennen. Mehrfachnennungen innerhalb eines Falls wurden nicht zusätzlich gezählt. Diese Aufzählungen dienen innerhalb der Untersuchung als Orientierungshilfe zur Identifikation von Schwerpunkten, ohne dabei statistische Repräsentativität zu beanspruchen [29].

3.5 Wissenschaftliche Gütekriterien

Die Qualität dieser Untersuchung bemisst sich nicht an statistischen Maßzahlen, sondern an der Nachvollziehbarkeit und Transparenz des gesamten Forschungsprozesses [31].

Methodisch folgt die Arbeit einem Kompromiss zwischen methodischer Strenge und der für qualitative Verfahren notwendigen Offenheit. Zur Beurteilung der internen und externen Studiengüte werden die folgenden vier Gütekriterien herangezogen [29]:

Bestätigbarkeit: Wird durch eine nachvollziehbare Trennung von Datenmaterial und Interpretation gestärkt. Dies wurde insbesondere durch die Dokumentation des Analyseprozesses sowie die Offenlegung der Abgrenzungsregeln und Ankerzitate im Codebuch unterstützt. Da die Codierung im Rahmen dieser Arbeit durch eine einzelne Person erfolgte, konnte keine Inter-Coder-Übereinstimmung geprüft werden. Diese Limitierung wird berücksichtigt [29,31].

Verlässlichkeit: Um die Stabilität der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde der gesamte Analyseprozess dokumentiert [29,34]. Wegen der Übersichtlichkeit ist lediglich das vollständige Codebuch (siehe Anhang A.2) beigelegt. Die anonymisierte Auswertungsmatrix (Excel) sowie bereinigte Expertenberichte können zur Sicherung der Nachvollziehbarkeit auf Anfrage in anonymisierter Form bereitgestellt werden.

Glaubwürdigkeit: Die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse wird durch die Verwendung eines dokumentierten Kategorienhandbuchs (Codebuch) sowie die Belegführung über Zitate verbessert. Dadurch kann der Leser die Interpretation unmittelbar am Material nachvollziehen [29].

Übertragbarkeit: Anstelle statistischer Repräsentativität wird die Übertragbarkeit der Befunde auf ähnliche Kontexte angestrebt. Dies wird durch die Beschreibung der Stichprobe und der Rahmenbedingungen der Notstromversorgung ermöglicht, sodass Leser die Relevanz der Anforderungen für ihre eigene Organisation einschätzen können [29].

4. Ergebnisse

Wie im Kapitel 3.3 dargelegt, bilden die Aussagen von $n = 23$ Experten die empirische Grundlage für die folgende Auswertung. Aus der Gesamtheit von $n = 100$ kontaktierten Organisationen resultierten insgesamt $n = 29$ Rückmeldungen (Rücklaufquote: 29 %), von denen $n = 23$ inhaltlich verwertbare Aussagen für die Analyse lieferten. Die verbleibenden $n = 6$ Rückmeldungen wurden als nicht verwertbare Aussagen dokumentiert. Darunter fielen Rückmeldungen aufgrund von fehlender Zeit oder weil notwendiges Fachwissen fehlte ($n = 5$). In einem der Fälle ($n = 1$) erfolgte eine Weiterleitung ohne nachfolgende Antwort.

Die nachfolgende Tabelle 2 stellt die Verteilung der Stichprobe dar:

Tab. 2: Übersicht der Stichprobenzusammensetzung

Aufteilung der Daten	Anzahl (n)
Versendete Mails	100
Rückmeldung erhalten	29
Verwertbare Aussagen	23
- Davon von Katastrophenschutzbehörden	14
- Davon von operativen Einheiten	9
Nicht verwertbare Aussagen	6
- Absage wegen Zeitmangel/fehlendes Fachwissen	5
- Weiterleitung an Fachbereich	1

4.1 Überblick über das Kategoriensystem

Zur systematischen Auswertung der Expertenrückmeldungen wurde ein hierarchisches Kategoriensystem entwickelt, das als Raster für die folgenden Ergebnisse dient. Auf Grundlage des Fragenkatalogs der E-Mail-Befragung (siehe Anhang A.1) wurden die fünf Hauptkategorien gebildet. Zur präzisen Abbildung der Anforderungen wurden die Unterkategorien direkt am Material entwickelt.

Insgesamt wurden im Datenmaterial 345 codierte Segmente identifiziert. Bei der Auszählung der Häufigkeiten ist zu berücksichtigen, dass eine einzelne Expertenantwort mehreren Kategorien zugeordnet werden konnte, sofern darin verschiedene Aspekte gleichzeitig adressiert wurden. Diese zulässigen Mehrfachcodierungen stellen sicher, dass die inhaltliche Komplexität der Expertenaussagen vollständig erfasst wird. In den nachfolgenden Unterkapiteln (4.2 bis 4.6) erfolgt die detaillierte Darstellung fokussiert auf die spezifischen inhaltlichen Schwerpunkte.

Die Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Hauptkategorien, deren inhaltliche Definition sowie die Segmenthäufigkeit, die als Indikator für die Schwerpunkte dient. Während Tab. 3 Segmenthäufigkeiten

aufweist, beziehen sich die n -Werte in den nachfolgenden Unterkapiteln (4.2 – 4.6) auf die Anzahl der Fälle (von $n = 23$ Fällen), in denen eine Unterkategorie mindestens einmal genannt wurde.

Tab. 3: Übersicht der Hauptkategorien und Häufigkeiten

Hauptkategorie	Definition (Inhaltliche Beschreibung)	Häufigkeit
Zentrale Anforderungen	Erfasst grundlegende technische und taktische Rahmenbedingungen für die Beschaffung und Vorhaltung.	104
Leistung	Spezifikation der benötigten elektrischen Parameter	44
Spezifische Betriebsaspekte	Anforderungen an den laufenden Betrieb, die Instandhaltung und das Personal	99
Problemlagen Bestandstechnik	Beinhaltet die gemeldeten technischen Probleme mit den aktuellen Notstromlösungen	51
Relevante Erfahrungen	Von dem Experten zugetragene Punkte die zusätzlich zur Notstromversorgung relevant sind	47
Gesamt		345

4.2 Zentrale Anforderungen

Diese Hauptkategorie bildet mit 104 codierten Segmenten den inhaltlichen Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung. Sie umfasst sowohl die technischen Parameter als auch die taktischen Anforderungen, die von den Experten für die Beschaffung und Vorhaltung von Notstromlösungen als relevant eingestuft wurden.

Um die Übersichtlichkeit zu wahren, konzentriert sich die Darstellung auf die fünf am häufigsten genannten Anforderungen (Häufigkeit $n \geq 6$). Weniger häufig genannte Aspekte wie die Fremdbetankung ($n = 5$) werden im Ergebnis nicht dargestellt. Sie sind zur Transparenz im Kategorienhandbuch (Anhang A.2) dokumentiert.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die fünf häufigsten genannten zentralen Anforderungen:

Tab. 4: Top-5 Zentrale Anforderungen

Unterkategorie	Häufigkeit	Taktische/Technischer Fokus
Mobilität	13	Flexible Verbringung und Bauform
Einsatzzweck	9	Multifunktionalität
Einspeiseart	7	Umschaltung zwischen Insel-/Gebäudebetrieb
Normkonformität	7	Einhaltung von DIN/VDE-Vorschriften
Autonomie	6	Betriebsdauer ohne zusätzliche Zufuhr von Kraftstoff

4.2.1 Mobilität ($n = 13$)

Eine der am häufigsten adressierten Anforderungen ist die Mobilität, die von 13 der 23 Experten als zentral eingestuft wurde. Die Experten betonen die Notwendigkeit, die Notstromaggregate je nach Lage

flexibel positionieren zu können. Dabei zeigt sich eine Differenzierung zwischen tragbaren Geräten für den Ersteinsatz und fahrbaren Anlagen (z. B. auf Anhängerfahrgeräten oder Containern) für die großflächige Versorgung.

Ein Experte unterstreicht die Wichtigkeit der Mobilität wie folgt:

„Die Anforderungen variieren stets nach Sachverhalt, jedoch ist eine zentrale Anforderung die Mobilität des Gerätes. [...]“ [Fall 06: F1].

4.2.2 Einsatzzweck ($n = 9$)

Der Einsatzzweck ist ein weiteres häufig genanntes Kriterium der Anforderungen. Die Aggregate sollen nicht nur punktuell unterstützen, sondern für diverse unterschiedliche Lagen eingesetzt werden können. Als Beispiele werden der Betrieb von Notbrunnen oder Katastrophenschutz-Leuchtturm (dient im Stromausfall als Anlaufstelle für Informationen und Hilfsangebote) genannt [Fall 21: F2; Fall 17: F1]. Die Technik muss somit flexibel auf unterschiedliche Einsatzlagen angepasst werden können.

4.2.3 Einspeiseart ($n = 7$)

Bei der Einspeiseart nannten die Experten häufig die Fähigkeit der Aggregate, zwischen dem Inselbetrieb (IT-Netz) und einer Gebäudeeinspeisung (TN-Netz) sicher umzuschalten [Fall 21: F1; Fall 22: F1].

4.2.4 Normkonformität ($n = 7$)

In sieben Rückmeldungen wurde die Einhaltung technischer Regelwerke wie DIN oder VDE als zentrale Anforderung genannt [Fall 03: F1; Fall 09: F1]. Neben allgemeinen DIN wurden auch spezifische Normen wie die DIN 14685 (Feuerwehrwesen - Tragbarer Stromerzeuger) oder DIN 14684 (Feuerwehrwesen – Ausstattung von mobilen Stromerzeugern zur Versorgung von elektrischen Betriebsmitteln und zur Gebäudeeinspeisung) genannt [Fall 18: F1; Fall 22: F1].

4.2.5 Autonomie ($n = 6$)

Die Autonomie beschreibt eine lange Betriebsdauer ohne externe Kraftstoffzufuhr am Einsatzort. Von den Experten wurden dabei unterschiedliche Zeiträume von zwischen 8 bis 72 h gefordert [Fall 01: F1; Fall 02: F1; Fall 23: F1]. Ein Experte führt das für Netzersatzanlagen wie folgt aus:

„[...] Netzersatzanlagen (NEA): Ortsfeste Anlagen ab 60 kVA müssen eine automatische Netzumschaltung sowie eine Kraftstoffautarkie von mindestens 48 Stunden bieten. [...]“ [Fall 22: F1]

4.3 Leistung

Bei der Leistung werden die elektrischen Parameter dargestellt, die von den Organisationen für einen Notstrombetrieb gefordert werden. Das Datenmaterial weist eine große Spannweite auf, die von kleinen tragbaren Geräten bis zu großen Netzersatzanlagen mit Leistungen weit über 100 kW reicht.

Um die Übersichtlichkeit zu sichern, konzentriert sich die Darstellung auf die fünf am häufigsten genannten Leistungsaspekte ($n \geq 6$). Weniger häufig genannte Spezifikationen sind zur Transparenz im Kategorienhandbuch (Anhang A.2) dokumentiert.

In den Expertenrückmeldungen wurde häufig die Scheinleistung in Kilovoltampere (kVA) anstelle der Wirkleistung in Kilowatt (kW) angegeben. Während kW die tatsächlich nutzbare Wirkleistung beschreibt, stellt kVA die Scheinleistung dar (Zusammensetzung aus Wirk- und Blindleistung) [22]. Um Angaben vergleichbar darzustellen, werden kVA-Angaben in diesem Abschnitt ergänzend in kW umgerechnet. Hierfür wird der übliche Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0,8$ ($1 \text{ kVA} = 0,8 \text{ kW}$) verwendet [35].

Einen Überblick über die identifizierten Leistungsbereiche und deren Häufigkeiten bietet die Tab. 5:

Tab. 5: Aufteilung der Leistungsbereiche

Unterkategorie	Häufigkeit	Leistungsbereich
Hoher Leistungsbereich	11	$\geq 100 \text{ kW}$
Bedarfsorientierte Dimensionierung	10	Dimensionierung nach konkreter Last
Breites Leistungsspektrum	7	Unterschiedliche Leistung
Mittlerer Leistungsbereich	7	20 - 100 kW
Kleiner Leistungsbereich	6	$< 20 \text{ kW}$

4.3.1 Hoher Leistungsbereich ($n = 11$)

Die am häufigsten genannte Unterkategorie der Leistung ist der hohe Leistungsbereich. Dieser wird primär für die Gebäudeeinspeisung oder die Versorgung ganzer Netzabschnitte verwendet. Die Hälfte der Antworten zu diesem Leistungsbereich ($n = 6$) gab den Bereich 250 kVA (200 kW) an. Bei besonderen Anlagen wie Krankenhäusern oder Wasserwerken wird laut einem Experten eine höhere Leistung erforderlich:

„[...] . Andere kritische Infrastrukturen, wie Krankenhäuser oder Wassergewinnungsanlagen der Stadtwerke, weisen hingegen einen deutlich höheren Bedarf im Bereich von ca. 200–500 kW auf. [...]“ [Fall 21: F2].

4.3.2 Bedarfsorientierte Dimensionierung ($n = 10$)

Zehn Experten lehnen pauschale Leistungsklassen ab und fordern stattdessen eine individuelle Lastberechnung, die sich an den realen Verbrauchern vor Ort orientiert [Fall 01: F2; Fall 23: F2]. Ein Experte konkretisiert die zu berücksichtigten Faktoren wie folgt:

„Dies ist von individuellen Faktoren abhängig. Leistungsaufnahme der gleichzeitig zu versorgenden Verbraucher (bspw. Kühlschrank, Licht, Wärmepumpe, Hebeanlage, Kompressor, medizinische Geräte, Klima-Anlagen, IT-Technik), Art der Warmwasserbereitung (Boiler, Durchlauferhitzer), Küchentechnik (Konvektomat, Spülmaschine). [...]“ [Fall 10: F2].

4.3.3 Breites Leistungsspektrum ($n = 7$)

In sieben Fällen wurde ein breites Leistungsspektrum erwähnt. Als breites Leistungsspektrum werden alle Leistungen betrachtet, die sich über mehrere Leistungsbereiche erstrecken. Als Beispiel nennt ein Experte Leistungen zwischen 2 kVA und 650 kVA [Fall 22: F2].

4.3.4 Mittlerer Leistungsbereich ($n = 7$)

Dieser Leistungsbereich umfasst Leistungen zwischen 20 und 100 kW. Diese Aggregate werden von den Experten meist als fahrbare Stromerzeuger beschrieben, die flexibel zur Einspeisung kleiner Gebäude, Notfalltreffpunkte oder als Katastrophenschutz-Leuchttürme eingesetzt werden können [Fall 10: F2; Fall 21: F2; Fall 22: F1].

4.3.5 Kleiner Leistungsbereich ($n = 6$)

Der kleine Leistungsbereich (< 20 kW) bezieht sich vorrangig auf tragbare Stromerzeuger. Diese dienen laut Experten der Versorgung fahrzeuggebundener Funktionen (z. B. Pumpen oder interne Elektronik) oder der punktuellen Stromversorgung an Einsatzstellen [Fall 01: F2; Fall 20: F1].

4.4 Spezifische Betriebsaspekte

Diese Hauptkategorie befasst sich mit den praxisnahen Anforderungen an den laufenden Betrieb, die Instandhaltung sowie personalrelevanten Aspekten.

Insgesamt wurden in diesem Themenfeld 99 Segmente codiert. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit konzentriert sich die Analyse auf die fünf am häufigsten genannten Betriebsaspekte ($n \geq 5$).

In der nachfolgenden Tabelle werden die Unterkategorien mit ihren Häufigkeiten sowie der inhaltliche Fokus zusammenfassend dargestellt:

Tab. 6: Übersicht der spezifischen Betriebsaspekte

Unterkategorie	Häufigkeit	Betrieblicher Fokus
Wartungsarmut	16	Reduzierung der Instandhaltung
Zuverlässigkeit	12	Funktionssicherheit nach langer Standzeit
Bedienbarkeit	8	Laienbedienbarkeit
Lautstärke	7	Lärmminderung im Betrieb
Brennstofflagerung	6	Langfristige Lagerfähigkeit

4.4.1 Wartungsarmut ($n = 16$)

In 16 Fällen stellt die Wartungsarmut die am häufigsten genannte Unterkategorie dar. Die Experten fordern primär einen geringen Wartungsaufwand, um personelle Ressourcen der Organisation zu schonen und besonders das Ehrenamt nicht weiter zu belasten [Fall 05: F1]. Damit eng verknüpft ist eine niedrige Wartungsintensität, die auf seltene Instandhaltungsintervalle zielt. Weiterhin wird eine hohe Wartungsfreundlichkeit genannt, die eine effiziente Durchführung notwendiger Instandhaltungsmaßnahmen ermöglicht [Fall 20: F3; Fall 23: F3].

4.4.2 Zuverlässigkeit ($n = 12$)

Die Zuverlässigkeit wird von einem großen Teil der Befragten als wichtig eingestuft. Gefordert wird eine unbedingte Funktionssicherheit selbst nach monatelangen Standzeiten sowie unter klimatischen Bedingungen in einem Bereich von -20 bis über 30 °C [Fall 11: F3; Fall 20: F3].

4.4.3 Bedienbarkeit ($n = 8$)

Hier steht die Laienbedienbarkeit im Vordergrund. Die Aggregate müssen intuitiv konstruiert sein, so dass sie von Einsatzkräften ohne elektrotechnische Spezialausbildung unter hoher psychischer Belastung (Stress) fehlerfrei bedient werden können [Fall 21: F3; Fall 22: F3].

4.4.4 Lautstärke ($n = 7$)

Experten betonen die Relevanz eines geräuscharmen Betriebs zur Reduzierung von Lärmemissionen besonders im Dauerbetrieb. Dies ist besonders bei langanhaltenden Einsätzen in der Nähe von Gebäuden oder Zelten von Bedeutung [Fall 03: F1; Fall 10: F3]. Ein Experte ergänzt, dass eine geringe Geräuschbelastung einen Betrieb innerhalb von Gebäuden ermöglichen soll [Fall 23: F1].

4.4.5 Brennstofflagerung ($n = 6$)

Die Anforderungen an die technische Bevorratung fokussieren eine ausreichende Dimensionierung der Kraftstofftanks, um Nachbetankungen im Dauerbetrieb zu vermeiden [Fall 13: F1]. Ein Experte nennt als pragmatische Lösung die Weiternutzung vorhandener Infrastruktur (z. B. ältere Öltanks) [Fall 16: F3].

4.5 Problemlagen der Bestandstechnik

In dieser Hauptkategorie werden die praktischen Hürden und Defizite der aktuell verwendeten Systemen identifiziert. Hierzu wurden 51 Segmente codiert. Im Fokus stehen dabei neben mechanischen Defekten insbesondere logistische und chemische Herausforderungen, die im Alltag der Experten auftreten.

Um die Analyse auf die wesentlichen Defizite zu fokussieren, werden Unterkategorien mit einer Häufigkeit von $n \geq 3$ detailliert erläutert. Weniger häufig genannte Aspekte (z. B. netztechnische Probleme) sind im Kategorienhandbuch dokumentiert.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die identifizierten Problemlagen:

Tab. 7: Übersicht Problemlagen in der Bestandstechnik

Unterkategorien	Häufigkeit	Inhaltliches Problem
Kraftstoffalterung	8	Chemischer Zerfall / Dieselpest
Störungsfreier Betrieb	6	Keine nennenswerte Probleme berichtet
Wartungsaufwand	5	Kosten und Instandhaltungsaufwand
Fehlende Einsatz-/Bedarfsplanung	3	Fehlende Konzepte/Dimensionierung

4.5.1 Kraftstoffalterung ($n = 8$)

Die Kraftstoffalterung, in der Fachpraxis oft als „Dieselpest“ bezeichnet, wird von den Experten als Schwachstelle von Diesellaggregaten genannt. Aufgrund des Bioanteils im Diesel und langer Standzeiten wird die Haltbarkeit des Kraftstoffs massiv herabgesetzt, was zu Filterverstopfungen und Motorschäden führen kann [Fall 11: F4]. Ein Experte konkretisiert die notwendigen Gegenmaßnahmen:

„Eine typische Schwachstelle stellte die Kraftstofflagerung dar. Je nach Kraftstofftyp (Diesel, Heizöl, etc.) besteht eine begrenzte Haltbarkeit der Kraftstoffe. Hier ist neben einer regelmäßigen Prüfung auch ein entsprechender Umsatz, Austausch oder Verbrennen des Kraftstoffes erforderlich.“ [Fall 23: F4].

4.5.2 Störungsfreier Betrieb ($n = 6$)

Insgesamt berichteten sechs Experten, dass bei ihren aktuellen Anlagen keine nennenswerte Probleme aufgetreten sind. Experte 17 äußerte zusätzlich, dass bei einer anderen konzeptionellen Ausgangslage (anders als Diesellaggregate) eine neue Bewertung des störungsfreien Betriebs notwendig wäre. Ein passendes Ankerzitat bietet die folgende Aussage:

„Technisch sind bei unseren Anlagen bislang keine nennenswerten Probleme aufgetreten.“ [Fall 02: F4].

4.5.3 Wartungsaufwand ($n = 5$)

Die Experten beklagen eine hohe Instandhaltungsintensität. Besonders die moderne Abgasnachbehandlung (AdBlue/Partikelfilter) wird als störanfällig bei langen Standzeiten identifiziert [Fall 20: F4]. Zudem wird die Durchführung zeitintensiver Lastläufe (oft bei 75 % Nennlast), die zur Vermeidung von Standschäden erforderlich sind, als erschwerender betrieblicher Faktor genannt [Fall 21: F3].

4.5.4 Fehlende Einsatz-/Bedarfsplanung ($n = 3$)

Diese Unterkategorie bündelt Berichte über die Defizite in der taktischen Vorbereitung. Kritisiert werden Unter- als auch Überdimensionierung, die zu einem ineffizienten Betrieb führen [Fall 15: F4].

Zudem führt das Fehlen von Einsatzkonzepten zu einer ineffizienten Verteilung der Stromerzeuger. Ein Experte erläutert, dass bei Einsatzstellen häufig viel zu starke Stromerzeuger benutzt werden, die in einer Krise an anderer Stelle fehlen würden [Fall 12: F4]. Ein weiterer Experte führte die Problematik mit einer überdimensionierten Stromversorgung wie folgt aus:

„[...] Überdimensionierte Notstromerzeuger und damit verbundene Fehler während des Einsatzauftrages (Abschaltung wegen „Unterforderung“)“ [Fall 19: F4].

4.6 Relevante Erfahrungen

In dieser letzten Hauptkategorie werden Erfahrungen der Experten abgebildet, die über technische Parameter hinausreichen und organisatorische sowie einsatztaktische Aspekte betreffen können.

Dieser Hauptkategorie wurden insgesamt 47 Segmente zugeteilt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nur Unterkategorien mit $n \geq 3$ dargestellt.

Tab. 8 gibt einen Überblick über die Häufigkeiten und inhaltlichen Schwerpunkte:

Tab. 8: Übersicht der relevanten Erfahrungen

Unterkategorie	Häufigkeit	Inhaltlicher Fokus
Brennstoffflexibilität	6	Nutzung in unterschiedlichen Szenarien
Brennstofflogistik	4	Nachversorgung im Einsatz
Wirtschaftlichkeit	3	Kosten im Lebenszyklus
Personalqualifikation	3	Ausbildung der Personen

4.6.1 Brennstoffflexibilität ($n = 6$)

Die Brennstoffflexibilität wird von den Experten als wesentliches Merkmal für eine Krisenresilienz thematisiert. Im Zentrum steht dabei die Multifunktionalität der Aggregate, um im Fall einer massiven Mangellage auf alternative Energieträger ausweichen zu können. In den Rückmeldungen wird deutlich, dass Experten in Extremszenarien eine höhere Robustheit älterer Technik gegenüber modernen Systemen sehen [Fall 12: F4]. Als praxisnahes Beispiel wird die Verwendung von Vielstoffdieselmotoren angeführt, die neben herkömmlichem Diesel auch Alternativen wie Raps- oder Salatöl sowie Heizöl nutzen können.

Ein Experte führt den Wunsch der Nutzung von verschiedenen Kohlenwasserstoffen wie folgt aus:

„[...] Für den absoluten Notfall (Mangellage) wäre es wünschenswert, wenn man einige wenige Aggregate besitzt, die mit verschiedenen Kohlenwasserstoffen (flüssig / flüssigwerdende oder gasförmig)

betrieben werden können (Altöl, Fette, Alkohol usw.) - wie früher z.B. der Vorkammerdieselmotor. [...]
“ [Fall 03: F5].

4.6.2 Brennstofflogistik ($n = 4$)

Im Fokus steht die Sicherung der Versorgungskette während andauernden Krisen. Zentrale Forderung ist der Aufbau einer vorgeplanten Tanklogistik, die nach einer definierten Zeit zur Verfügung steht [Fall 10: F5]. Während die Logistik für Diesel als weitgehend gesichert und eingespielt gilt [Fall 12: F4], wird die Einführung von alternativen Energieträgern wie Wasserstoff kritisch hinterfragt, da diese eine zusätzliche Bevorratungsinfrastruktur und spezielle Tankkapazitäten notwendig machen würden [Fall 01: F5].

4.6.3 Wirtschaftlichkeit ($n = 3$)

Diese Unterkategorie bündelt die ökonomische Bewertung über den gesamten Lebenszyklus der Stromanlage. Experten benennen die angespannte Haushaltslage und die Bindung an das öffentliche Vergaberecht als signifikante Hürden bei der Beschaffung [Fall 13: F5].

Ein Experte führt dabei die unterschiedlichen Kosten zwischen stationären und mobilen Aggregaten wie folgt aus:

„[...] Der Einsatz fahrbarer Großgeräte ist aufgrund des personellen Aufwands und der hohen Vorhaltekosten (ca. 100 % teurer als stationäre NEA bei gleicher Leistung) oft unverhältnismäßig. Eine ortsfeste NEA bietet hier das beste Verhältnis aus Kosten, Resilienz und Betriebssicherheit.“ [Fall 22: F5].

4.6.4 Personalqualifikation ($n = 3$)

Hinsichtlich des Personals werden Defizite bei den notwendigen Qualifikationen identifiziert. Kritisiert wird ein mangelndes Hintergrundwissen zu technischen Vorschriften sowie fehlende Anhängerführerscheine für den Transport mobiler Aggregate [Fall 10: F5; Fall 12: F5]. Da Aufbau und Inbetriebnahme mobiler Anlagen vor Ort durch das Personal erfolgt, wird Qualifikation als organisatorischer Aspekt genannt.

4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Auswertung der $n = 23$ Expertenberichte ergibt ein Anforderungsprofil für Notstromlösungen im Katastrophenschutz. Die Ergebnisse lassen sich in drei übergeordnete Bereiche bündeln:

1. Technisch-taktisches Anforderungsprofil: In den Rückmeldungen werden Leistungsbedarfe von tragbaren Kleingeräten (< 20 kW) bis zu Netzersatzanlagen (> 100 kW) genannt. Häufig genannt werden Mobilität ($n = 13$) sowie Autonomieanforderungen, die je nach Einsatzkontext von mehreren Stunden bis zu mehreren Tagen reichen ($n = 6$).

2. Betriebs- und Personalaspekte: Als häufig genannte Betriebsaspekte werden Wartungsarmut ($n = 16$), Zuverlässigkeit nach längeren Standzeiten ($n = 12$) und Bedienbarkeit ($n = 8$) genannt. Zudem wird ein geräuscharmer Betrieb ($n = 7$) adressiert.
3. Problemlagen der Bestandstechnik und ergänzende Aspekte: In den Problemlagen werden unter anderem Kraftstoffalterung ($n = 8$), Keine nennenswerte Probleme berichtet ($n = 6$) sowie Wartungs- und Instandhaltungsaufwand ($n = 5$) benannt. Ergänzend werden in den Rückmeldungen Aspekte wie Brennstoffflexibilität ($n = 6$), Brennstofflogistik ($n = 4$), Wirtschaftlichkeit ($n = 3$) sowie Personalqualifikation ($n = 3$) adressiert.

5. Diskussion

In diesem Kapitel werden die zuvor dargestellten Ergebnisse interpretiert und im Hinblick auf die Forschungsfrage sowie die technischen und normativen Rahmenbedingungen eingeordnet und bewertet.

Ziel ist es, die Eignung der PEMFC kritisch zu prüfen, die Befunde in einen theoretischen Kontext einzuordnen und die zentralen Stärken, Grenzen und offene Fragen herauszuarbeiten.

5.1 Ergebnisse in Hinblick auf die Forschungsfrage

Die Forschungsfrage dieser Arbeit, ob Brennstoffzellen die technischen und praxisrelevanten Anforderungen der Notstromversorgung aus Sicht von Feuerwehren und Katastrophenschutzbehörden erfüllen, lässt sich differenziert beantworten. Die Analyse der Expertenrückmeldungen zeigt, dass die PEMFC zahlreiche Anforderungen adressiert, jedoch unter bestimmten Rahmenbedingungen technische und logistische Einschränkungen bestehen.

Ein zentrales Ergebnis ist die hohe Bedeutung von Zuverlässigkeit und Wartungsarmut. Die Experten identifizieren die Kraftstoffalterung als wesentliche Schwachstelle konventioneller Diesellaggregate, da lange Standzeiten die Einsatzbereitschaft gefährden. Dieses Risiko betrifft die PEMFC in dieser Form nicht, da Druckwasserstoff chemisch stabil und keinen biologischen Zerfallsprozessen unterliegt [17]. Die Langzeittests des Schweizer Bundesamt für Energie (BFE) bestätigen diesen Vorteil. Über einen Zeitraum von sieben Jahren wurden Verfügbarkeiten zwischen 99,6 und 100 % nachgewiesen [36 S. 50]. Für Anwendungen im Katastrophenschutz, deren Systeme über Monate im Standby verblieben, stellt dies einen deutlichen Vorteil gegenüber der Bestandstechnik dar.

Bei der Mobilität ergibt sich ein geteiltes Bild. Der modulare Aufbau der PEMFC ermöglicht eine kompakte Bauform und eine flexible Skalierbarkeit der Leistung. Ein deutlicher taktischer Vorteil liegt im Teillastverhalten, während Diesellaggregate im Minderlastbetrieb zu Problemen durch „Unterforderung“ neigen, arbeiten PEMFC-Systeme bei geringer Last mit ihrem höchsten Wirkungsgrad [17]. In Kombination mit dem vibrations- und geräuscharmen Betrieb verbessern sich die Kommunikations- und Arbeitsbedingungen an der Einsatzstelle deutlich.

Die größte Einschränkung stellt die geringe volumetrische Energiedichte von Wasserstoff dar. Selbst unter hohem Druck besitzt Wasserstoff eine rund siebenfach geringere Energiedichte als Diesel [22 S. 186–189]. Für die von den Experten geforderte Autonomie von mehreren Tagen führt dies zu massiv erhöhten Anforderungen an die Tankgröße und Logistik. Besonders bei Netzersatzanlagen resultieren daraus erhebliche Nachteile der Mobilität.

Um die Expertenforderung nach Brennstoffflexibilität gerecht zu werden, können alternative Varianten der PEMFC wie die Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC) in Betracht gezogen werden. Durch die

Nutzung von flüssigem Methanol kann die Bevorratung in einfachen Kanistern erfolgen und die logistischen Herausforderungen reduziert werden. Wenngleich dies mit einem niedrigeren Wirkungsgrad einhergeht [12].

Abschließend lässt sich festhalten, dass die PEMFC wesentliche betriebliche Anforderungen wie Zuverlässigkeit, Wartungsarmut, Lärm und Teillastverhalten besser erfüllen als Diesellaggregate. Für kleine und mittlere Leistungsklassen ist die Technologie daher als prinzipiell geeignet einzustufen. Für größere Netzersatzanlagen (> 100 kW) bleibt sie aufgrund der Speicherlogistik und der Kosten unter den genannten Rahmenbedingungen begrenzt nutzbar [17]. Damit kann die Forschungsfrage insgesamt nur eingeschränkt positiv beantwortet werden.

5.2 Abgleich mit normativen und technischen Parametern

In diesem Abschnitt werden die identifizierten Praxisanforderungen mit den technischen Spezifikationen der PEMFC abgeglichen. Ergänzend werden die relevanten normativen Vorgaben berücksichtigt, um die technologische Reife der PEMFC im Kontext der Notstromversorgung kritisch zu bewerten.

5.2.1 Kaltstartdynamik und normative Einordnung

Ein Experte führte eine uneingeschränkte Einsatzfähigkeit im Temperaturbereich von -20 bis > 30 °C an [Fall 20: F3]. Diese Forderung deckt sich mit den Anforderungen der DIN 14684, welche für mobile Stromerzeuger bis ca. 87 kVA einen Funktionsbereich von -20 bis 40 °C vorschreibt [37].

Die technische Bewertung zeigt jedoch, dass die Anforderungen der Umschaltklassen nach DIN VDE 0100-560 insbesondere bei Frostbedingungen eine Herausforderung darstellen. Der limitierende Faktor ist die Eisbildung in den Poren der kathodenseitigen Katalysatorschicht. Dieses Eis behindert den Sauerstofftransport, solange die Zelle noch nicht durch die exotherme Reaktionswärme über den Gefrierpunkt erwärmt wurde [19,23].

Da die Literaturdaten zum Kaltstart den Zeitpunkt zu einem nutzbaren Leistungsniveau (z. B. 50 % Nennleistung) berichten, erfolgt die Einordnung näherungsweise über diesen Zeitpunkt. Die Vollständige Leistungsbereitstellung kann länger dauern. Basierend auf den Daten von Schröder [19] und Montaner Ríos et al. [24] ergibt sich die folgende Einordnung.

- Klasse D ($t < 5$ s): Bei -10 °C kann die PEMFC 50 % der Nennleistung bereits nach 3 Sekunden erreichen und erfüllt die Anforderung damit eingeschränkt [19,24].
- Klasse E ($t < 15$ s): Bei -20 °C kann durch eine auf Geschwindigkeit optimierte potentiostatische Startstrategie (niedrige konstante Zellspannung, hoher Wärmeanteil durch geringen Wirkungsgrad) die 50 % Nennleistung nach 10 s erreicht werden. [18,19]

- Klasse F ($t \geq 15$ s): Ohne optimierte Startstrategie oder bei Fokus auf maximale Lebensdauer können Startvorgänge bei -20 °C bis zu 15 Minuten dauern, bevor eine stabile Lastübernahme möglich ist [24].

Unausgereifte Startstrategien bergen zusätzlich das Risiko einer lokalen Unterversorgung der Membran. Dies kann ein sogenanntes „Rapid Oxidation Event“ provozieren und zu einer dauerhaften Systemschädigung führen [18 S. 86].

Aus diesen Befunden lässt sich ableiten, dass eine PEMFC die Temperaturbereiche der DIN 14684 abdeckt, für die Umschaltklassen A bis C zwingend zusätzliche Pufferspeicher (z. B. Batterien oder Kondensatoren) benötigt werden, um die Anlaufphase sicher zu überbrücken. Wird die PEMFC ohne Puffer betrieben, ist die Startzeit zu berücksichtigen. Die Umschaltklassen A – C können dann nicht erfüllt werden.

5.2.2 Lagerfähigkeit und Reduzierung des Instandhaltungsaufwands

Für die Brennstoffzelle entfällt die Kraftstoffalterung weitgehend, da Druckwasserstoff chemisch stabil ist und kein biologischer Zerfall stattfindet, anders als bei Diesel- oder Benzinkraftstoffen [17]. Die Langzeitdaten des BFE bestätigen diese Annahme. Die Systeme erreichten über sieben Jahre hinweg eine Verfügbarkeit von über 99 % und bleiben nach fünfmonatigen Standby-Phasen ohne Leistungseinbußen sofort betriebsbereit [36 S. 29, 45].

Ein technisches Risiko stellt jedoch die Katalysatorvergiftung durch polare Substanzen wie CO , H_2S oder NH_3 dar, welche die aktiven Adsorptionsstellen auf der Platinoberfläche blockieren. Eine CO -Vergiftung kann bereits bei Konzentrationen unter 10 ppm auftreten und ist reversibel, während Schwefelverbindungen und Ammoniak nur schwer reversibel und zu einer dauerhaften Leistungsabnahme führen [20 S. 266–267]. Die Verwendung von Wasserstoff der Qualität 5.0 (99,9995 % Reinheit) ist daher eine zwingende Voraussetzung für den langfristigen und zuverlässigen Betrieb [12].

Der Instandhaltungsaufwand verschiebt sich damit weg von der mechanischen Motortechnik. Da PEMFC weitgehend ohne bewegliche Teile auskommen, reduziert sich der mechanische Verschleiß erheblich [38]. Technisch erforderlich bleibt eine hochwertige Zuluftfilterung, insbesondere beim Einsatz von Reformersystemen, sowie ein präzises Feuchtemanagement, das sowohl im Betrieb als auch beim Stillstand sichergestellt werden muss [10,21].

5.2.3 Konflikt zwischen Mobilität und Autonomie

Eine mehrtägige Autonomie steht im deutlichen Konflikt zur geringen volumetrischen Energiedichte des gasförmigen Wasserstoffs. Ein technischer Abgleich zeigt, dass gasförmiger Wasserstoff bei 700 bar ein rund siebenfach größeres Tankvolumen benötigt als Diesel, um denselben Energiegehalt bereitzustellen [22 S. 188–189]. Die praktische Relevanz dieses Nachteils unterscheidet sich jedoch zwischen den Leistungsklassen.

Kleiner Leistungsbereich ($< 20 \text{ kW}$): Hier relativiert sich der Volumennachteil durch den hohen Wirkungsgrad der PEMFC, der im Teillastbereich über 60 % liegt [17 S. 164]. Während ein Diesellaggregat bei geringer Last ineffizient arbeitet („Unterforderung“) und in diesem Leistungsbereich eine Überdimensionierung stattfindet, benötigt eine PEMFC für die gleiche Nutzarbeit deutlich weniger Primärenergie. Da das System ohne schweren Motorblock ein geringeres Grundgewicht als ein vergleichbares Diesellaggregat aufweist, kann die geforderte Autonomie unter Einhaltung des Gewichtslimit von 200 kg (DIN 14685-1) durch Wechselgestelle mit 300 oder 700 bar Druckgasflaschen sichergestellt werden [35].

Hoher Leistungsbereich ($> 100 \text{ kW}$): Bei großen Netzersatzanlagen führt der notwendige Wasserstoffspeicher für einen 72- oder 96-stündlichen Betrieb zu Dimensionen, die eine mobile Verbringung als autarke Einheit massiv erschweren. Die folgende Abschätzung basiert auf Volllastbetrieb und der in der Quelle angegebenen Wirkungsgradannahme. Laut Möbius et al. verbraucht eine 75 kVA-Anlage pro Volllaststunde rund 6,43 kg Wasserstoff (Wirkungsgrad von 35 %) [38 S. 127]. Für 96 h resultiert dies in einem Gesamtbedarf von 617,28 kg Wasserstoff. Moderne Drucktanks weisen eine Tankmassenquote von 94,3 % auf, damit liegt die Masse des leeren Tanks bei 10,21 t. Mit dem benötigten Wasserstoff ergibt sich ein Gesamtgewicht von 10,83 t [22 S. 195]. Ein Diesellaggregat gleicher Leistung benötigt für den identischen Zeitraum ein Tankvolumen von 1.800 L ($1,8 \text{ m}^3$) [38 S. 107]. Dies entspricht einer Kraftstoffmasse von 1,49 t, die zusammen mit einem ca. 800 kg schweren Stahltank ein Gesamtgewicht von 2,29 t ergibt [22 S. 407, 38 S. 107].

Unter Annahme des siebenfach größeren Tankvolumens resultiert für Wasserstoff ein Volumen von 12.600 L ($12,6 \text{ m}^3$). Dies liegt in der Größenordnung eines 10-Fuß-Containers.

Sowohl Masse als auch Volumen sind damit Mobilitätshemmnisse. Bereits bei 75 kVA ist der Unterschied deutlich. Bei größeren Anlagen steigen das notwendige Volumen und die Masse entsprechend an und verstärken die Problematik. Für den mobilen Transport sind aber geringes Gewicht und Volumen entscheidend, dementsprechend ist die PEMFC dem Diesel in diesem Punkt derzeit unterlegen.

5.2.4 Teillastverhalten und einsatztaktische Emissionen

Die PEMFC besitzt durch ihr Teillastverhalten einen technischen Vorteil gegenüber konventionellen Diesellaggregaten. Mit abnehmender Last steigt sowohl die elektrische Zellspannung als auch der Wirkungsgrad an [9,17]. Dies entspricht unmittelbar der Expertenforderung nach einer bedarfsorientierten Dimensionierung, da die PEMFC auch bei geringer Leistungsabnahme hocheffizient arbeitet und im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren nicht zur Verrußung neigt [28].

Darüber hinaus bietet die Technologie deutliche Vorteile hinsichtlich der einsatztaktisch relevanten Emissionen. Da keine explosionsartigen Verbrennungsvorgänge und keine mechanisch bewegten Bauteile (Kolben) vorhanden sind, arbeiten PEMFC im Vergleich zu Diesellaggregaten vibrationsärmer [10].

Zusätzlich ist der Betrieb leise, da die einzige nennenswerte Geräuschquelle in den Kühl- und Pumpsystemen liegt. Dies stellt insbesondere im Umfeld von Personen (z. B. Einsatzkräfte) oder in dicht besiedelten Bereichen einen wesentlichen Vorteil dar [17].

5.2.5 Wirtschaftlichkeit und Marktfähigkeit

Die Analyse verdeutlicht, dass die hohen Investitionskosten derzeit ein primäres Hindernis für eine flächendeckende Implementierung darstellen. Während PEMFC-Systeme als Richtpreis mit ca. 3.500 €/kW angegeben werden, sind konventionelle mobile Dieselaggregate in der 60-kVA Klasse bereits für rund 250 €/kVA erhältlich [36 S. 48–49, 38 S. 112–113].

Auch bei den verbrauchsabhängigen Brennstoffkosten besteht eine deutliche Diskrepanz. Ein auf 75 kVA dimensioniertes Notstromaggregat benötigt für jede Volllaststunde eine Brennstoffkosten (H_2) von ca. 62 €. Bei einem Dieselaggregat fallen hingegen Kraftstoffkosten von 18,75 € pro Volllaststunde [38 S. 133–134, 112–113].

Die wirtschaftlichen Vorteile der PEMFC, wie die hohe Zuverlässigkeit oder der chemisch stabile Brennstoff, können diese massiven Mehrkosten bei Leistungsbereichen von über 20 kW derzeit nicht kompensieren. Für Leistungsbereiche von unter 20 kW zeigt sich jedoch, dass die niedrigeren Unterhaltskosten nach 5 Jahren einen Kostenvorteil gegenüber Dieselaggregaten ergeben [17 S. 167].

5.3 Kritische Würdigung der Methodik

In diesem Abschnitt wird reflektiert, inwieweit die gewählte Methodik geeignet war, die Forschungsfrage nachvollziehbar zu beantworten und welche Limitationen die Interpretation der Ergebnisse beeinflussen können.

5.3.1 Stichprobe und Datenerhebung

Die Untersuchung basiert auf $n = 23$ verwertbaren Expertenrückmeldungen, was im qualitativen Kontext eine solide Grundlage darstellt. Gleichwohl ist die Stichprobe als selektiv zu betrachten, da sowohl die kriteriengeleitete Auswahl der Organisationen als auch die Selbstselektion der Antwortenden potenzielle Verzerrungen begünstigen können. Es ist plausibel, dass primär technisch affine oder dem Thema gegenüber aufgeschlossene Funktionsträger antworteten. Dennoch zeigt sich eine Sättigungstendenz, da ab einem bestimmten Punkt keine neuen inhaltlichen Aspekte auf Kategorienebene mehr entstanden und überwiegend Wiederholungen bereits benannter Aspekte auftraten [31].

Die Entscheidung für eine schriftliche E-Mail-Befragung bot methodische Vorteile und Nachteile. Einerseits ermöglichte das Format eine hohe regionale Reichweite, eine zeitunabhängige Beantwortung und zudem entfielen Transkriptionsfehler, da die Daten originär in Textform vorlagen [30]. Andererseits führte die fehlende Rückfragemöglichkeit zu variierenden Antworttiefen. Umfangreiche, detaillierte

Darstellungen standen teils sehr knappen Formulierungen gegenüber, wodurch der Interpretationsspielraum zunahm. Durch die schriftliche Kommunikation fehlen zudem nonverbale Hinweise (Mimik, Gestik oder Reaktionen), die in mündlichen Interviews als zusätzliche Kontextmerkmale genutzt werden könnten [32].

5.3.2 Auswertung, Gütesicherung und Expertenrolle

Die inhaltlich strukturierende Inhaltsanalyse nach Kuckartz erwies sich als geeignetes Verfahren, um die Daten systematisch auszuwerten. Das erstellte Codebuch mit klaren Definitions-, Abgrenzungs- und Ankerziten stärkte die Nachvollziehbarkeit. Der dokumentierte Analysepfad sicherte zusätzlich die Verlässlichkeit des Vorgehens [29]. Als methodische Einschränkung bleibt jedoch die fehlende Inter-Coder-Übereinstimmung, da die Codierung ausschließlich durch eine Person erfolgte [31]. Dieser Schwachpunkt konnte teilweise durch die konsequente Trennung von Rohmaterial und Interpretation sowie durch transparente Dokumentation abgemildert, aber nicht vollständig ausgeglichen werden.

Der Expertenstatus der Befragten ist kritisch einzuordnen. Experten generieren kein objektives Bild der Realität, sondern geben institutionell geprägtes Deutungswissen wieder [31]. Funktionsträger aus Behörden formulieren häufig normorientiert, während operative Einheiten praxisnähere Schwerpunkte setzen. Die schriftliche Form kann zudem eine Tendenz zu strategisch formulierten Aussagen bestärken, besonders bei sensiblen Themen wie Beschaffungsdefiziten oder organisatorische Herausforderungen.

5.3.3 Reflexion der Forscherrolle und Grenzen der Untersuchung

Die Rolle des Forschenden beeinflusst die Datenerhebung und Auswertung. Eigene fachliche Vorerfahrungen (durch meine Zeit in der Feuerwehr oder mein Studium) erleichterten das technische und taktische Verständnis möglicher Zusammenhänge, bergen jedoch die Gefahr eines selektiven Fokus oder einer unbewussten Bestätigungsneigung [39]. Diese potenziellen Verzerrungen wurden durch die methodische Transparenz und die Orientierung an klar definierten Kategorien reduziert, können jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Darüber hinaus ist die zeitliche Abhängigkeit der Ergebnisse zu berücksichtigen. Brennstoffzellen, Wasserstofflagerung und Notstromstrategien entwickeln sich dynamisch weiter, sodass die erhobenen Einschätzungen eine Momentaufnahme darstellen, deren Gültigkeit in Zukunft neu bewertet werden muss.

5.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse

In der qualitativen Forschung wird der Begriff Übertragbarkeit gegenüber einer Generalisierung bevorzugt, da Generalisierung eine unbegrenzte Gültigkeit suggerieren kann, während abgeleitete Anforderungen stets an den situativen Kontext gebunden sind [29]. Die Untersuchung stützt sich auf Aussagen aus dem deutschen Katastrophenschutz. Im Analyseprozess zeigte sich eine theoretische Sättigung. Die

Befunde sind daher als kontextgebundene Orientierung für ähnliche Organisationen und Einsatzbedingungen in Deutschland zu interpretieren.

Obwohl die physikalischen Prinzipien der PEMFC universell sind, ist die Übertragbarkeit auf weitere Bereiche, insbesondere im Sektor der kritischen Infrastrukturen differenziert zu beurteilen:

Funktionale Passung: Die Ergebnisse können als Einordnungshilfe für stationäre Bereiche (z. B. Gesundheitswesen oder Wasserversorgung) dienen, da auch dort hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Autonomie bestehen. Im Unterschied zum Katastrophenschutz mit häufig mobiler Vorhaltung und variierenden Lastprofilen weisen stationäre Anwendungen jedoch meist konstantere Lastverläufe auf und stellen geringere Anforderungen an die Mobilität. Dies kann Systemauslegung und Brennstoffbereitstellung erleichtern.

Expertenwissen als Transferbasis: Da Experten institutionell geprägtes Deutungswissen vermitteln, sind die abgeleiteten Kategorien (z. B. Kaltstartverhalten, Logistik, Wartungsaspekte) über den Einzelfall hinaus als konzeptioneller Rahmen nutzbar [31]. Die konkrete Bewertung hängt jedoch von sektor- und organisationsspezifischen Rahmenbedingungen ab.

Räumliche und normative Validität: Die Übertragbarkeit ist durch nationale Normen und Einsatzkonzepte begrenzt. Andere Länder nutzen teilweise abweichende sicherheitstechnische Vorgaben, Versorgungskonzepte oder Logistikketten, sodass eine direkte Übertragung nur eingeschränkt möglich ist.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Untersuchung eine nachvollziehbare Grundlage liefert, um Anforderungen und Einsatzbedingungen im deutschen Katastrophenschutz zu strukturieren und die Eignung innovativer Notstromsysteme im jeweiligen Kontext einzuordnen.

5.5 Ausblick und Forschungsbedarf

Obwohl die Ergebnisse auf eine grundsätzliche Eignung der PEMFC für ausgewählte Einsatzszenarien im Katastrophenschutz hindeuten, erschweren technische, logistische und normative Hürden einen flächendeckenden Einsatz. Der zukünftige Forschungs- und Entwicklungsbedarf lässt sich in drei Bereiche gliedern:

1. **Technische Optimierung und Systemintegration:** Zukünftige Studien sollten sich auf die Entwicklung robusterer Regelungsstrategien konzentrieren. In den Langzeittests des BFE zeigte sich, dass eine rein spannungsgeführte Regelung unter realen Lastprofilen zu Instabilitäten führen kann [36 S. 52]. Zudem sollten herstellerübergreifende Standards für Komponenten etabliert werden, um die Abhängigkeit von einzelnen Systemlieferanten zu reduzieren und die Instandhaltung durch eigenes Personal zu vereinfachen [38]. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der

Materialnutzung. Insbesondere der Verzicht auf teure Edelmetalle wie Platin oder Iridium kann die Kosten einer PEMFC senken sowie eine Serienfertigung ermöglichen [12].

2. Versorgungslogistik und Brennstoffflexibilität: Die Wasserstoffinfrastruktur bildet aktuell eines der primären Hemmnisse für eine autarke Notstromversorgung. Hier bedarf es anwenderfreundlicherer Konzepte für den Zylinderwechsel im Feld, die ohne aufwendige Spülvorgänge auskommen [36]. Um den volumetrischen Nachteil von gasförmigem Wasserstoff auszugleichen, ist die Erforschung alternativer Speicher für den Katastrophenschutz essenziell. In diesem Kontext sollte auch der Expertenwunsch nach Brennstoffflexibilität weiterverfolgt werden. Hybridsysteme, die neben Wasserstoff auch flüssige Energieträger wie Methanol (DMFC) nutzen, können die logistische Resilienz in extremen Mangellagen deutlich erhöhen.
3. Normativer Rahmen: Da für den spezifischen Einsatz der Brennstoffzelle im deutschen Katastrophenschutz noch keine harmonisierten Normen vorliegen beziehungsweise bestehende Regelwerke bislang überwiegend an dieselbasierten Systemen orientiert sind, besteht eine erhebliche Rechtsunsicherheit für Planer und Beschaffer. Eine Integration der Technologie in bestehende Normwerke ist notwendig, um die Standards für Sicherheit und Bedienbarkeit zu setzen. Zusätzlich dazu müssen Ausbildungskonzepte für Einsatzkräfte entwickelt werden, um das notwendige Hintergrundwissen im Umgang mit Hochdruckgasen und elektrochemischen Systemen sicherzustellen [38].

Insgesamt zeigt sich, dass die PEMFC bereits für Nischenanwendungen (z. B. zur Absicherung kleinteiliger Funkinfrastruktur) geeignet sein kann [36 S. 52–53]. Ihre Etablierung als vollwertiger Ersatz für dieselbasierte Notstromsysteme hängt jedoch maßgeblich von einer flächendeckenden Wasserstoffinfrastruktur, der Harmonisierung technischer Standards und einer weiteren Senkung der spezifischen Systemkosten ab.

Literaturverzeichnis

1. Bundesnetzagentur. Versorgungsunterbrechungen Strom in 2024 gegenüber Vorjahr gesunken – Deutsches Stromnetz eines der zuverlässigsten im europäischen Vergleich [Online]. 2025 [zuletzt aufgerufen am 07.02.2026]. Verfügbar unter: <https://www.bundesnetzagentur.de/1075952>.
2. Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe. Stromausfall im Berliner Südwesten [Online]. 2026 [zuletzt aufgerufen am 07.02.2026]. Verfügbar unter: <https://www.berlin.de/sen/web/presse/pressemitteilungen/2026/pressemitteilung.1629952.php>.
3. Reuter O. Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Thema des Tages - Vor 20 Jahren: Das Münsterländer Schneechaos [Online]. 2025 [zuletzt aufgerufen am 07.02.2026]. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2025/11/24.html.
4. Deutschländer T, Wichura B. Das Münsterländer Schneechaos am 1. Adventswochenende 2005. In: Klimastatusbericht 2005. Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst (DWD); 2006. S. 163–167.
5. Hauschildt A, Ritterhoff J. Einsatz von Brennstoffzellen in U-Booten. In: Heinzel A, Mahlen-dorf F, Roes J, Hrsg. Brennstoffzellen: Entwicklung, Technologie, Anwendung. 3. Aufl. Heidelberg: Müller; 2006. S. 141–151. (Energietechnik).
6. DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE. DIN VDE 0100-200 (VDE 0100-200). Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 200: Begriffe. 2023.
7. Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE. DIN VDE 0100-560 (VDE 0100-560). Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 5-56: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel - Einrichtungen für Sicherheitszwecke (IEC 60364-5-56:2018); Deutsche Übernahme HD 60364-5-56:2018. 2022.
8. DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE. DIN 6280-13. Stromerzeugungsaggregate - Stromerzeugungsaggregate mit Hubkolben-Verbrennungsmotoren - Teil 13: Für Sicherheitsstromversorgung in Krankenhäusern und in baulichen Anlagen für Menschenansammlungen. 1994.
9. Allmendinger F, Degler D, Schelling U. Brennstoffzellen. In: Zahoransky R, Fichter C, Hrsg. Energietechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien; 2025. S. 403–440.
10. Crastan V, Höckel M. Elektrische Energieversorgung 2. 5. Aufl. Bd. 2. Heidelberg: Springer Vieweg Berlin; 2022.
11. Schellen M, Badenhop T. Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung. In: Töpler J, Lehmann J, Hrsg. Wasserstoff und Brennstoffzelle. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg; 2017. S. 137–155.
12. Wagner E. Das System Brennstoffzelle. 1. Aufl. München: Carl Hanser Verlag; 2023.

13. Sharaf O, Orhan M. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;32:810–853.
14. Kettner M, Zahoransky R. Blockheiz-Kraftwerke, Kälteanlagen, Wärmepumpen und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. In: Zahoransky R, Fichter C, Hrsg. *Energietechnik*. 10. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2025.
15. Quaschnig V. *Regenerative Energiesysteme*. 10. Aufl. Berlin: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; 2019.
16. Heinzel A, Mahlendorf F, Roes J. Brennstoffzellen - ein Überblick. In: *Brennstoffzellen: Entwicklung, Technologie, Anwendung*. 3. Aufl. Heidelberg: Müller; 2006. S. 1–22. (Energietechnik).
17. Paul H, Leu C. Ersatzstromversorgung. In: Töpler J, Lehmann J, Hrsg. *Wasserstoff und Brennstoffzelle*. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg; 2017. S. 157–168.
18. Mohrdieck C, Venturi M, Breitrück K. Mobile Anwendungen. In: Töpler J, Lehmann J, Hrsg. *Wasserstoff und Brennstoffzelle*. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg; 2017. S. 59–113.
19. Schröder M. Theoretische Studie zum Kaltstart von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik; Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), Institut für Elektrische Energiesysteme und Automation; 2018.
20. Jörisen L, Garche J. Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEFC) Stand und Perspektiven. In: Töpler J, Lehmann J, Hrsg. *Wasserstoff und Brennstoffzelle*. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg; 2017. S. 263–313.
21. Groos U, Cremers C, Nousch L, Baumgärtner C. Fuel cell technologies. In: Neugebauer R, Hrsg. *Hydrogen Technologies*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2022. S. 253–288.
22. Doppelbauer M. *Grundlagen der Elektromobilität*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2025.
23. Mao L, Wang CY. Analysis of Cold Start in Polymer Electrolyte Fuel Cells. *The Electrochemical Society*. 2007;154(2):B134–B146.
24. Montaner Ríos G, Schirmer J, Kallo J. Operation strategies for cold start of PEMFC systems. In: *Proceedings of EFC2017 – European Fuel Cell Technology & Applications (Piero Lunghi Conference)*. Naples, Italy; 2017. S. EFC17108.
25. Jiang F, Fang W, Wang CY. Non-isothermal cold start of polymer electrolyte fuel cells. *Electrochimica Acta*. 2007;53(2):610–621.

26. Schmidtchen U, Wurster R. Sicherheit in der Anwendung von Wasserstoff. In: Töpler J, Lehmann J, Hrsg. Wasserstoff und Brennstoffzelle. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg; 2017. S. 43–58.
27. Zahoransky R, Fichter C, Degler D. Energiespeicherung. In: Zahoransky R, Fichter C, Hrsg. Energietechnik. 10. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2025. S. 741–808.
28. Apenbrink D, Hamann D, Hankers R, Schulz D, Micheely S. Wasserstoffbasierte Notstromversorgung mit integriertem Regelkraftwerk mittels flexibler Sektorenkopplung und Metallhydridspeichern. In: Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz [Online]. Hamburg: Universitätsbibliothek der HSU / UniBwH; 2021 [zuletzt aufgerufen am 09.02.2026]. S. 71–79. Verfügbar unter: <https://open-hsu.ub.hsu-hh.de/handle/10.24405/13951>.
29. Kuckartz U, Rädiker S. Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung. 5. Aufl. Weinheim: Beltz Juventa; 2022.
30. Dahlin E. Email Interviews: A Guide to Research Design and Implementation. International Journal of Qualitative Methods. 2021;20:1–10.
31. Bogner A, Littig B, Menz W. Interviews mit Experten: Eine praxisorientierte Einführung. Wiesbaden: Springer Fachmedien; 2014.
32. Meho L. E-Mail Interviewing in Qualitative Research: A Methodological Discussion. J Am Soc Inf Sci Technol. 2006;57(10):1284–1295.
33. Akremi L. Stichprobenziehung in der qualitativen Sozialforschung. In: Baur N, Blasius J, Hrsg. Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien; 2022. S. 405–424.
34. Flick U. Gütekriterien qualitativer Sozialforschung. In: Baur N, Blasius J, Hrsg. Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien; 2022. S. 533–548.
35. DIN-Normenausschuss Feuerwehrwesen (FNFW). DIN 14685-1. Feuerwehrwesen - Tragbarer Stromerzeuger - Teil 1: Generatorsatz ≥ 5 kVA. 2024.
36. Trachte U, Sollberger P, Gisler T. Langzeittest USV mit Brennstoffzellen [Online]. Bundesamt für Energie BFE; 2019 [zuletzt aufgerufen am 05.03.2026]. Report No.: SI/501314-01. Verfügbar unter: <https://www.hslu.ch/de-ch/hochschule-luzern/forschung/projekte/detail/?pid=3447>.
37. DIN-Normenausschuss Feuerwehrwesen (FNFW). DIN/TS 14684. Feuerwehrwesen - Ausstattung von mobilen Stromerzeugern zur Versorgung von elektrischen Betriebsmitteln und zur Gebäudeeinspeisung. Berlin; 2020.
38. Möbius P, Schröder J, Apenbrink D, Hamann D, Hankers R, Schulz D. Einsatz erneuerbarer Energieanlagen und-speicher zur mobilen und stationären Notstromversorgung [Online]. Bonn:

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK); 2024 [zuletzt aufgerufen am 01.04.2026]. (Forschung für den Bevölkerungsschutz). Verfügbar unter: https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/FiB/FiB-35-erneuerbare-energieanlagen.pdf?__blob=publicationFile&v=7.

39. Helmrich R, Zika G. Prognosen, Projektionen und Szenarien. In: Baur N, Blasius J, Hrsg. Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien; 2022. S. 255–270.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit, selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe.

Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Datum

Unterschrift

A.1: E-Mail-Vorlage

Betreff: Kurze Befragung zur Notstromversorgung (Bachelorarbeit)

Sehr geehrte Damen und Herren,

mein Name ist Marvin Hamann und ich studiere Gefahrenabwehr an der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg. Im Rahmen meiner Bachelorarbeit untersuche ich den Einsatz von Brennstoffzellen in der Notstromversorgung.

Um die theoretischen Erkenntnisse mit der Praxis abzugleichen, führe ich eine kurze qualitative Expertenbefragung durch. Dabei möchte ich gerne erfahren, welche Anforderungen Ihre Organisation an Notstromaggregate stellt.

Alle Angaben werden vertraulich behandelt, ausschließlich anonymisiert ausgewertet und dienen ausschließlich wissenschaftlichen Zwecken.

Falls Sie mich unterstützen können, bitte ich Sie kurz die folgenden Fragen zu beantworten:

Fragenkatalog

1. Welche zentralen Anforderungen stellt Ihre Organisation an ein Notstromaggregat?
2. Welche Leistung (kW) werden typischerweise benötigt?
3. Welche Aspekte sind für Sie besonders wichtig?
(z. B. Zuverlässigkeit, Emissionen, Lautstärke, Wartungsaufwand, Brennstofflagerung, Startzeit)
4. Welche Probleme treten bei bisherigen Notstromlösungen (z. B. Dieselgeneratoren) auf?
5. Gibt es weitere Punkte, die Sie aus Ihrer Erfahrung für relevant halten?

Ich würde mich sehr freuen, wenn Sie mich bei meiner Arbeit unterstützen.

Bei Rückfragen oder Interesse an den Ergebnissen stehe ich Ihnen selbstverständlich gerne zur Verfügung.

Vielen Dank für Ihre Zeit und Ihre Unterstützung.

Mit freundlichen Grüßen

Marvin Hamann

Student der Gefahrenabwehr - Fakultät Life Sciences
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

E-Mail: [REDACTED]

Telefon [REDACTED]

A.2: Vollständiges Codebuch

<i>n</i>	Kategoriennamen	Definition (Inhaltliche Beschreibung)	Abgrenzung	Zitat
104	1. Zentrale Anforderungen	Erfasst grundlegende technische und taktische Rahmenbedingungen für die Beschaffung und Vorhaltung.	Primäre Anforderungen die der Beschaffung oder Vorhaltung orientiert sind	
44	2. Leistung	Spezifikation der benötigten elektrischen Parameter	Bei Leistung (kW/kVA) oder daran orientierte Bedarfsermittlungen	
99	3. Spezifische Betriebsaspekte	Anforderungen die den laufenden Betrieb, die Instandhaltung und das Personal beinhalten	Fokussierung auf den Umgang im Betrieb	
51	4. Problematischen Bestandstechnik	Beinhaltet die gemeldeten technischen Probleme mit den aktuellen Notstromlösungen	Bei Meldungen von Problemen oder Betriebshürden	
47	5. Relevante Erfahrungen	Von dem Experten zugetragene Punkte die zusätzlich zur Notstromversorgung relevant sind	Sammelkategorie für Deutungswissen, dass über die rein technischen Parametern herausgehen kann	
1	Abgasreinigung	Erfasst technische Schwierigkeiten bei konventionellen Dieselaggregate, die durch die Abgasreinigung entstehen	Probleme im Minderlastbetrieb, die mit der Abgasreinigung einhergehen	"Probleme bei Minderlast (Last < 30 % der Nennleistung) - Abgasreinigung / AdBlue, Bildung von Kondensat im Generator usw."
1	Alternative Technologien (Batterie)	Einschätzung zur Praxistauglichkeit von reinen Batteriesystemen	Beinhaltet nur Batteriesysteme und keine andere Technologien wie Diesel, Brennstoffzellen	"Batteriesysteme bewähren sich in Monteurkolonnen der Energieversorger. Für Licht, und kleinere Geräte sowie ELWs sehr vielversprechende Technik."
1	Ausstattung	Notwendigen Prozess der Marktanalyse und strategischen Vergleich technischer Merkmale im Vorfeld	Aussagen zur Bewertung von Ausstattungsunterschieden	"Bei Marktanalysen zur Beschaffung sind technische Features und Ausstattungsmerkmale/unterschiede zu berücksichtigen"
4	Arbeitsschutz	Alle Anforderungen die der physischen Sicherheit und der ergonomischen Entlastung vom Bedienern dient	Aspekte zur körpergerechten Gestaltung, beinhaltet keine Aspekte zur Lautstärke	"Belange des Baurechts (Brandschutz,) berücksichtigen, Belange des Arbeitsschutzes (Abgasführung,) berücksichtigen"
3	Automatisierung	Technische Vorrichtungen, die einen eigenständigen Systemstart und die automatische Netzumschaltung ermöglichen	Hierzu zählen Selbststartfunktion bei Netzausfall	"Die stationären NEA auf den Feuerwachen sind bei Netzausfall selbstanlaufend, besonders kritische Bereiche sind zusätzlich durch eine USV abgesichert. "
7	Autonomie	Anforderungen an den Stromerzeuger eine Betriebsdauer sicherzustellen ohne die zusätzliche Zufuhr von Kraftstoff an den Einsatzort	Spezifische Zeitvorgaben aber auch die Anforderungen an die Tankgröße für den Ersteinsatz werden erfasst	"Ausreichend großer Kraftstofftank für den unmittelbaren Ersteinsatz, [...]"
15	Bedarfsorientierte Dimensionierung	Die Aggregate werden an die Bedarfe orientiert bezüglich ihrer Leistung oder ihrer Größe	Einplanung von Leistungsreserven, der notwendigen Leistung und geplanten Verbraucher zählen in diese Kategorie	"Dies ist von individuellen Faktoren abhängig. Leistungsaufnahme der gleichzeitig zu versorgenden Verbraucher (bspw. Kühlschrank, Licht, Wärmepumpe, Hebeanlage, Kompressor, medizinische Geräte, Klima-Anlagen, IT-Technik), Art der Warmwasserbereitung (Boiler, Durchlauferhitzer), Küchentechnik (Konvektomat, Spülmaschine)."

<i>n</i>	Kategoriennamen	Definition (Inhaltliche Beschreibung)	Abgrenzung	Zitat
14	Bedienbarkeit	Die einfache Bedienung der Aggregate durch einen simplen Aufbau, der die Steuerung dieser leicht macht	Begriffe wie Laienbedienbarkeit, die einfach Ausführung sowie die einfach Bedienung werden betrachtet	"Im Vordergrund steht die Laienbedienbarkeit, damit das Personal im Stressfall fehlerfrei agieren kann."
2	Betrieb mit HVO	Einsatz von hydriertem Pflanzenöl ist möglich	Betrieb mit HVO ist möglich	"Der Betrieb mit HVO100 und ein automatischer Lastwiderstand zur Vermeidung von Motorschäden im Niedriglastbereich sind Grundvoraussetzungen."
1	Betriebsart (Insel/Einspeisung)	Fähigkeit des Stromerzeugers sowohl im eigenständigen Netz als auch im Gebäudenetz einzuspeisen	Umschaltmöglichkeit	"Fahrbares Aggregat: Das Gerät muss in der Lage sein einen "Inselbetrieb" (also zum Aufbau eines örtlich aufgebauten Netzes), sowie einen Einspeisebetrieb (Zur Einspeisung in das vorhandene Stromnetz eines Gebäudes) zu gewährleisten. Siehe dazu: Kat-schutz Leuchttürme"
2	Bewährte Logistik	Rückgriff auf bereits etablierte Versorgungswege	Bei Aussagen über die schnelle Erreichbarkeit aufgrund bestehender Infrastrukturen aber auch der Kraftstoff Resilienz	"Entsprechend ist die Logistik im Regelfall bereits bedacht und schnell eingerichtet."
3	Bewährte Technologie	Nutzung von technologisch ausgereiften und im Einsatzfall bewährten Geräten	Alle Forderungen an bewährten Konzepten aber auch Antrieb und Elektronik	"Bewährte Technologie bei Antrieb und Elektronik"
1	Brandschutz	Beachtung von Brandschutzrechtlichen Auflagen	Beinhaltet nur die Brandschutzrechtlichen Auflagen, keinen Arbeitsschutz	"Belange des Baurechts (Brandschutz,) berücksichtigen, Belange des Arbeitsschutzes (Abgasführung,) berücksichtigen"
7	Breites Leistungsspektrum	Ein großes Spektrum an unterschiedlichen Leistungen für die Einsatzszenarien	Wenn mehrere Leistungsbereiche beschrieben werden, die sich stark unterscheiden z.B.: 8,8 kVA bis 300 kVA	"Keine klare Aussage möglich, da das Portfolio an vorhandenen Stromerzeugern von 8,8 kVA bis 300 kVA reicht."
7	Brennstoffflexibilität	Möglichkeit das Aggregat auch mit anderen ähnlichen Brennstoff zu betreiben	Die Nennung von alternativen Brennstoffe für den Antrieb der Aggregate z.B. Altöl	"Für den absoluten Notfall (Mangellage) wäre es wünschenswert, wenn man einige wenige Aggregate besitzt, die mit verschiedenen Kohlenwasserstoffen (flüssig / flüssigwerdende oder gasförmig) betrieben werden können (Altöl, Fette, Alkohol usw.) - wie früher z.B. der Vorkammerdieselmotor."
9	Brennstofflagerung	Anforderungen bezüglich der sicheren und langfristigen Lagerung von Energieträgern am Einsatzort oder in stationäre Anlagen	Aussagen bezüglich der Lagerfähigkeit, aber auch zur Nutzung von vorhandenen Öltanks	"Brennstofflagerung ist bei stationären NEA durch entsprechend schwefelarmes Heizöl (lagerfähig) in Kombination mit einer Ölheizung oder bei Nutzung alter Öl-Tanks möglich. "
12	Brennstofflogistik	Die Planung, die Beschaffung, das Nutzen sowie der Transport und die Nachfüllung von Brennstoff am Einsatzgebiet	Hierunter fallen die Konzepte zur Treibstoffversorgung sowie die Problematik einer schlechten Versorgungslage.	"Die kleinen Stromerzeuger (13 kVA) werden zu schwer, bei den größeren gibt es oft Tanklogistikprobleme, weil die Versorgungslage im Einsatzgebiet schlecht ist."
1	Einschätzung Brennstoffzellen	Vom Experten genannten Potenziale aber auch Herausforderungen bezüglich von Brennstoffzellen gegenüber von Verbrennungsmotoren	Es fallen alle Punkte, die eine Brennstoffzelle einschätzen bezüglich ihrer Eigenschaften in diese Kategorie	"Im Bezug auf die Idee zur Stromversorgung mit Brennstoffzellen ergeben sich mögliche Vorteile vor Allem im Bezug auf geringe bis keine Emissionen (Lärm, Wärmeentwicklung und Abgase), kurze Anlaufzeiten, einfache Handhabung (An/Aus ohne Startvorgang eines Verbrennungsmotors) und als zu beachtende Aspekte der Energieträger (Wasserstoff ist schlecht bis gar nicht transportierbar und speicherfähig, flüssiger Stoff bspw. Methanol besser handhabbar)"

<i>n</i>	Kategoriennamen	Definition (Inhaltliche Beschreibung)	Abgrenzung	Zitat
9	Dauerbetrieb	Die Fähigkeit der Aggregate über einen längeren Zeitraum (Tage bis Wochen) zu funktionieren ohne Abschaltung oder Unterbrechung vom Stromfluss	Gilt für alle Zeitangaben die einen Bezug zum Dauerbetrieb aufweisen	"Für Stromerzeugungsanlagen und Netzersatzanlagen den Dauerbetrieb auch über Tage und Wochen ermöglichen"
1	Dauerlastfähigkeit / Wartungsarmut	Die Belastbarkeit von stationären Anlagen bei gleichzeitig minimalen Wartungsaufwand	Aussagen welche die mechanische Beständigkeit bei Dauerlast bei geringer Instandhaltung verknüpfen	"Im Rahmen der Versorgung der Gebäude (stationäre NEA), steht die Dauerlastfähigkeit bei gleichzeitig möglichst geringem Wartungsaufwand im Fokus."
1	Diebstahlschutz	Sicherheit der Anlage gegen Entwendung oder Manipulation	Aussagen über die Schwierigkeit der Entwendung durch einen exotischen Antrieb	"als weiteren Aspekt sehe ich noch die Gefahr der Entwendung, welche bei NEAs mit „außergewöhnlichem“ Antrieb geringer sein dürfte, da die Beschaffung von Wasserstoff „schwieriger“ ist."
1	Dieselpestprävention	Strategie zur Sicherung der Kraftstoffqualität von Diesel bei längeren Standzeiten durch einen geringen Bioanteil	technische Lösungen zur Verringerung von Dieselpest	"Durch die Verwendung von biodieselfreiem Dieselkraftstoff (derzeit allgemein verfügbarer Premium-Dieselmkraftstoff Aral-Ultimate) konnte die Gefahr für Dieselpest minimiert und deutlich längere Lager- und Austauschintervalle für den Kraftstoff vorgesehen werden. Zugleich ist dieser Kraftstoff uneingeschränkt mit normalem Diesel B7 mischbar, sodaß im Einsatzfall ein Nachtanken gewährleistet ist."
2	Digitale Vernetzung	Die Kommunikation von Aggregaten zur Fernüberwachung und zur Zustandsübermittlung	Es fallen alle Verweise auf digitale Übertragungen in diese Kategorie	"Ggf. Möglichkeit der digitalen Vernetzung von Stromerzeugern um den Zustand der NEAs zu übermitteln (siehe System KomRe – nur umfangreicher)"
1	EDV-Verträglich	Erfordert eine hohe Spannungsqualität mit wenig Lastschwankungen zur schadensfreier Versorgung von EDV	Wenn die Nutzung für die Versorgung von Servern, Computern oder Leitstellentechnik thematisiert wird	"Die durch das Aggregat ausgegebene Spannung sollte hierbei glatt ausgegeben werden, im Einsatz mit EDV Anlagen sind entsprechende Anforderungen an das Aggregat zu beachten"
1	Einfachheit	Bevorzugung eines unkomplizierten Aufbau gegenüber eines hochkomplexen System	Forderungen nach eine einfache Bauart	[...] hat eine einfache Bauart, [...]
1	Einsatzflexibilität	Die Notwendigkeit der Aggregate sich an unterschiedliche taktische Systeme anzupassen	Wenn eine flexible Einsatzmöglichkeit beschrieben wird.	"flexible Einsatzmöglichkeiten (Gebäudeeinspeisung im Singlebetrieb und Dualbetrieb; Stand alone – für Schadensstellen)"
12	Einsatzzweck	Differenzierung der technischen Anforderungen an den Zweck des Einsatz, zur Einspeisung, als mobiler Stromerzeuger oder als KRITIS Leuchtturm	Jede Nennung nach einen spezifischen Versorgungsziel	"Im Rahmen der Mehrfachverwendung sind ein Teil dieser NEA auch als mobile Stromerzeuger für den Betrieb von Notbrunnen im Rahmen der Wassersicherstellung vorgesehen."
7	Einspeiseart	Die Anforderungen an die Netzform sowie die Art der Anbindung	Nennung von IT/TN Umschaltungen aber auch die Umschaltung vom Insel und Einspeisebetrieb	"Das Aggregat sollte sowohl den Inselbetrieb als auch eine geordnete Notstromeinspeisung in bestehende Netze ermöglichen."
2	Einspeiseaufwand	der personelle, aber auch operativer Aufwand bei der Einbindung mobiler Anlagen in die Infrastruktur	Problemberichte über die fehlende Ausrüstung an Gebäude zum Einspeisen	"Ohne vorgerüstete Einspeisestellen in Gebäuden, aber auch im regulären Leitungsnetz (Erfahrung Einsatz X), können mobile NEA nicht oder nur mit sehr großem Aufwand (Fachpersonal mit Schaltberechtigung, Netzbetreiber) eingebunden werden. "
4	Einspeisefähigkeit	Die grundlegende Fähigkeit eines Aggregat in fremde Objekte oder Gebäude einzuspeisen	Wenn eine Fremdeinspeisung als taktisches Ziel oder Eigenschaft genannt wird	"Eine weitere wichtige Eigenschaft der vom Land beschafften Netzersatzanlagen ist die Fähigkeit zur Fremdeinspeisung in andere Objekte (TN-Betrieb)."

<i>n</i>	Kategoriennamen	Definition (Inhaltliche Beschreibung)	Abgrenzung	Zitat
1	Einweisung durch den Hersteller	Forderung nach einer Einweisung in die Stromerzeuger durch den Hersteller	Die Forderung nach einer Einweisung des Herstellers	"Einfache Bedienbarkeit, Einweisung in das Gerät durch den Hersteller, [...]"
1	Endlichkeit Gasversorgung	Thematisierung einer Problematik in der Gasversorgung durch ihre Endlichkeit	Hinweise auf die begrenzte Verfügbarkeit	"Bei einer Gasversorgung oder einem Heizöltank kann es jedoch über kurz oder lang zu Problemen führen, da diese endlich sind."
3	Ersatzteillo-gistik	Die Verfügbarkeit und schnelle Beschaffung von Ersatzteilen zur Reparatur der Aggregate	Anforderungen an die schnelle und unkomplizierte Ersatzteilbeschaffung	"[...] gängige Ersatzteilbeschaffung zeitnah möglich),"
2	Fahrzeugspezifische Normbelastung	Bezug auf fahrzeugspezifische Normen	Verweise auf die DIN zur Versorgung von fahrzeugeigenen Geräten	"Des Weiteren muss die Leistung entsprechend der Fahrzeugnorm (i.d.R. etwa 13 kVA bzw. 10 kW) ausgelegt sein um insbesondere Tiefenbrunnen mit Pumpe (Anlaufstrom) und sämtliche Geräte auf dem Fahrzeug betreiben zu können."
4	Fehlende Einsatz-/Bedarfsplanung	Identifizierte Defizite in der taktischen Vorbereitung aber auch der Dimensionierung der Stromerzeuger	Bericht über die unter- oder Überdimensionierung von Aggregate aufgrund von mangelnder Konzepte	"Keine Einsatzplanung vorhanden, Stromerzeuger sind in der Leistungsfähigkeit für die Aufgabe unterdimensioniert, Aber auch: an Einsatzstellen wurden für die Einsatzabwicklung viel zu starke Stromerzeuger angefahren, die in der Krise an anderer Stelle fehlten (keine Planung)."
7	Fremdbetankung	Die Möglichkeit die Aggregate mit Treibstoff zu betanken der nicht aus den internen eigenen Tanks stammt	Wenn Anschlüsse für externe Tanks oder automatischen Nachfüllen im laufendem Betrieb gefordert werden,	"Zudem ist es aus unserer Sicht wichtig, die Treibstoffversorgung nicht ausschließlich über interne Tanks sicherzustellen. Eine zusätzliche Möglichkeit zur externen Treibstoffzuführung, beispielsweise über Vor- und Rücklauf aus externen Behältern (z. B. IBC-Container), erhöht die Einsatzdauer und Flexibilität erheblich."
2	Fremdwartung	Die Vergabe von Instandhaltungsleistungen an externen Fachfirmen	Nennung von Wartungsverträge oder Serviceleistungen durch Dritte	"Wartungsverträge werden mit den Errichterfirmen geschlossen"
1	Frequenzregelung	Eine Regulierung der Frequenz auf einen bestimmten Frequenzbereich (z.B. 50 Hz)	technische Parameter zur Lastregelung	"lastabhängige Frequenzregelung (50HZ)"
1	Gefahrgutrecht	Rechtliche Bedingungen zum Umgang und Transport von Gefahrgut	Bei Erwähnung von Gefahrgutauf-lagen	"das einfache Nachführen und Betanken mit Kraftstoff ohne Gefahrgutauf-lagen, ein geringer Prüf- und Wartungsaufwand (Sicht- und PE - Prüfung) im Einsatz und die einfache Bedienbarkeit."
1	Gewicht (Kleingeräte 13 kVA)	Die physische Last von tragbaren Kleingeräten als Hemmnis für den Transport per Hand	Die Aufzählung von Schwierigkeit im Transport von Kleingeräte	"Die kleinen Stromerzeuger (13 kVA) werden zu schwer, bei den größeren gibt es oft Tanklogistikprobleme, weil die Versorgungslage im Einsatzgebiet schlecht ist."
1	Grundversorgung	Fokus auf die Aufrechterhaltung von überlebenswichtiger Geräte als auf die Vollversorgung	Die bewusste Begrenzung von Aggregate auf eine Leistung unter der Betrachtung keine Vollversorgung sicherzustellen	"Die Leistung ist ausreichend, um alle relevanten Grundfunktionen einschl. des Betriebs von Notheizsystemen in den Gerätehäusern zu gewährleisten. Allerdings ist es nicht möglich, damit eine elektrische Vollversorgung der Gerätehäuser zu gewährleisten. Aufgrund der für diesen Fall erforderlichen Aggregatgröße und der daraus resultierenden Nachteile wurden hier bewusst Einschränkungen in Kauf genommen."
1	H2-Logistik-problematik	Bedenken bezüglich der Infrastruktur, der Speicherfähigkeit und des Transportes von Wasserstoff	Die explizite Fokussierung auf die Rolle von Wasserstoff in der Logistik	" [...] und als zu beachtende Aspekte der Energieträger (Wasserstoff ist schlecht bis gar nicht transportierbar und speicherfähig, flüssiger Stoff bspw. Methanol besser handhabbar)"

<i>n</i>	Kategoriennamen	Definition (Inhaltliche Beschreibung)	Abgrenzung	Zitat
11	Hoher Leistungsbereich	Leistungsbereich, welcher für die Stromversorgung von Gebäude oder ganze Netzabschnitte verwendet werden kann.	Bei der Nennung von Leistung die größer gleich als 100 kW/125 kVA sind	"Für den Betrieb von Anlagen (IT einer Leitstelle, Produktionsbetriebe, Wasserwerke uä) >250 kW"
7	Mittlerer Leistungsbereich	Leistungsbereich, welcher für einzelne Gebäudefunktion verwendet werden kann.	Bei der Nennung von Leistungen kleiner als 100 kW (125 kVA) und größer als 20 kW (25 kVA)	"*Fahrbare Stromerzeuger (Anhänger): Diese Einheiten (min. 55 kVA) dienen der Einsatzstellen- (IT-Netz) und Gebäudeeinspeisung (TN-Netz)."
6	Kleiner Leistungsbereich	Bereich niedriger elektrischer Leistung die primär durch tragbare Geräte erzeugt wird	Leistung bis 20 kW/25 kVA	"Des Weiteren muss die Leistung entsprechend der Fahrzeugnorm (i.d.R. etwa 13 kVA bzw. 10 kW) ausgelegt sein um insbesondere Tiefenbrunnen mit Pumpe (Anlaufstrom) und sämtliche Geräte auf dem Fahrzeug betreiben zu können."
1	Hybridsysteme	Einschätzung zur Kombination von Stromerzeugern	Erwähnung von Batteriespeicher bzw. Hybridsysteme	"Auch Hybrid-Aggregate (mit Batteriespeicher) beschaffen."
1	Inbetriebnahme	Der Personelle sowie Zeitliche Aufwand zum Starten der Notstromversorgung vor Ort	Aussagen über den manuellen Betrieb und die Notwendigkeit von Personal vor Ort	"Die mobilen Aggregate für die Freiwillige Feuerwehr müssen vor Inbetriebnahme erst in die Nähe der jeweiligen Einspeisestelle an den Gerätehäusern verbracht und dort manuell in Betrieb genommen werden."
3	Instandhaltung durch Eigenpersonal	Anforderung das Aggregat mit dem vorhandenen Eigenpersonal (z.B. KFZ-Mechatroniker) zu Warten und Reparaturen durchzuführen	Bei Hinweisen auf Wartung oder Reparatur durch eigenes Personal	"Wartung mit dem in der Regel gängigen vorhandenen Personal möglich (Gerätewart, Kfz-Mechatroniker, Elektrofachkraft), [...]"
2	Instandhaltungsstrategie	Konzept zur langfristigen Erhaltung der Betriebsbereitschaft durch regelmäßige Nutzung	Problemlage aktueller Diesel aufgrund seines Wartungsaufwand	"Da die meisten Geräte mit Diesel betrieben werden, haben diese auch einen gewissen Wartungsaufwand, welche mit regelmäßiger Verwendung reduziert werden können."
3	Kombination mit USV	Die Kombination zwischen einem Stromerzeuger und einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV)	Bei der Erwähnung einer USV	"Zur Überbrückung der Startzeit ist bei stationären NEA immer eine Kombination mit einer USV notwendig, die Server bzw. IT-Technik wird sonst Schaden nehmen. Bei vorhandener USV ist die Startzeit dann weniger relevant."
1	Kompakte Bauweise	Platzsparende Bauweise, bei welcher die größtmögliche Leistung bei der kleinsten Fläche verwendet wird.	Wenn kleine Abmessungen gefordert werden	"Geringe Abmessungen, „weniger ist mehr“"
8	Kraftstoffalterung	Der Chemische Zerfall von Dieselmotorkraftstoff durch die Dieselpes oder durch die Begrenzte Haltbarkeit	Berichte über Verharzung, Bakterienbefall oder die Notwendigkeit Kraftstoff regelmäßig zu prüfen und zu nutzen	"Eine typische Schwachstelle stellte die Kraftstofflagerung dar. Je nach Kraftstofftyp (Diesel, Heizöl, etc.) besteht eine begrenzte Haltbarkeit der Kraftstoffe. Hier ist neben einer regelmäßigen Prüfung auch ein entsprechender Umsatz, Austausch oder Verbrennen des Kraftstoffes erforderlich."
2	Ladeerhaltung	Sicherstellung der Startfähigkeit durch die dauerhafte Ladung der Starterbatterie	Bei Berichten über die Ladeerhaltung	"Ladeerhaltung (Starterbatterie)."
1	Lagerung von Benzin	Spezifische chemische Probleme bei der Vorhaltung von Ottokraftstoffen	Wenn explizit die Haltbarkeit von Benzin oder seine Eigenschaften erwähnt wird	"Im Bereich der kleineren Notstromaggregate treten meist Probleme bei der Lagerung des Treibstoffs Benzin im Aggregat auf."
1	Langlebig	Anforderung das ein Aggregat für eine hohe zeitliche Ausdauer besitzt, ehe es aufgrund von Defekten ausfällt	Bei der Erwähnung von Langlebig	"Robust, langlebig, Wartungsarm, zuverlässig und einfach zu entstören"

<i>n</i>	Kategoriennamen	Definition (Inhaltliche Beschreibung)	Abgrenzung	Zitat
1	Lastgrenzen	die Physikalischen Grenzen der Leistung der Aggregate unter Last	Probleme, die durch eine hohe Last erzeugt	"Da moderne Heiz- und Warmwassersysteme eine hohe elektrische Last aufweisen, stoßen tragbare Geräte hier an ihre Grenzen."
1	Laufzeiteffizienz	Fokus auf das Verhältnis zwischen der Laufzeit und des Kraftstoffes unter Berücksichtigung von taktischen Erfordernissen	Wenn die Optimierung des Verbrauchs oder der Betriebsdauer gefordert wird.	[...] Laufzeiteffizienz [...]"
7	Lautstärke	Die Anforderungen an den Schallschutz oder die Reduzierung von Schall	Codiert, wenn die Lautstärke, der Schallschutz, oder schalldämmende Maßnahmen erwähnt werden	"Lautstärke (Einsatz in Zelt-/Gebäudenähe), [...]"
1	Logistikmangel (Zugfahrzeuge)	Der Mangel an Zugfahrzeugen zum Transport der Stromversorger	Erwähnung eines Mangel an Zugfahrzeugen	"In der Praxis zeigen sich drei Hauptprobleme: 1. Logistik: Es mangelt oft an geeigneten Zugfahrzeugen für fahrbare Stromerzeuger. "
1	Logistik-Priorisierung (Diesel)	Die Entscheidung für Diesel-Systeme, da dies mit einer Vereinfachung der Logistik einhergeht	Aussage über den bewussten Verzicht auf alternative Antriebe aufgrund einer einfachen Betrieblichen Logistik	"Das Augenmerk für alle NEA liegt auf einer einfachen Betriebsstofflogistik im Ereignisfall, insbesondere bei längerfristigen Stromausfällen. Daher wurde sich bei den mobilen Lösungen bewusst für Diesel-Aggregate entschieden."
1	Mangelnde Erfahrungswerte (Dauerbetrieb)	Unsicherheit bezüglich der technischen Durchhaltefähigkeit und Zuverlässigkeit von Aggregaten bei mehrtägiger Dauerlast	fehlende Erfahrungswerte im Bezug zum Dauerbetrieb	"Die Zuverlässigkeit ist ein sehr wichtiger Aspekt, da oft keine Erfahrungen zu einem mehrtägigen Dauerbetrieb vorhanden sind. Oft unklare Durchhaltefähigkeit bei hoher Dauerlast, da keine Erfahrungen vorliegen."
1	Marktsituation	Externe Einflüsse wie die Beschaffung, erhöhte Lieferzeiten und Qualitätsmangel bei der Auslieferung	Berichte über die aktuelle Marktsituation, aber auch kritische Bewertungen der aktuellen Lage	"Derzeit beschäftigt uns die große Nachfrage nach Netzersatzanlagen und die damit einhergehende Erhöhung von Lieferzeiten. Teilweise begegnet uns auch mangelnde Qualität bei der Ausführung."
3	Mehrfachnutzung	Die Nutzung der Aggregate in unterschiedlichen Situationen und von unterschiedlichen Organisation	Anforderungen die eine Multifunktionelle oder gemeinsame Nutzung erfordern	"Die mobilen Netzersatzgeräte sind im Regelfall für eine multifunktionale Mehrfachverwendung vorgesehen, [...], Im Rahmen der Mehrfachverwendung sind ein Teil dieser NEA auch als mobile Stromerzeuger für den Betrieb von Notbrunnen im Rahmen der Wassersicherstellung vorgesehen. "
1	Mobile Nachbetankung	Die Vorhaltung einer mobilen Tankstelle für Diesel, welche es ermöglicht eine eigenständige Verteilung durchzuführen	Bei Nennung einer mobilen Tankstelle sowie Kanistern	"Zum Betrieb gehört auch die Vorhaltung einer mobilen Tankstelle für 980l Dieselkraftstoff und zahlreiche Kraftstoffkanister, um die notwendige Verteilung eigenständig gewährleisten zu können."
13	Mobilität	Umfasst alle Anforderungen an die Verbringung des Aggregats zum Einsatzorten aber auch die notwendige Infrastruktur	Bauformen wie tragbar, mobil oder stationäre aber auch die Explizität Erwähnung von Ladeeinrichtungen, Transportmöglichkeiten	"Die Anforderungen variieren stets nach Sachverhalt, jedoch ist eine zentrale Anforderung die Mobilität des Gerätes."
1	Netztechnische Probleme	Beinhaltet technische Komplikationen beim Zusammenschluss von Erzeuger und Gebäudenetz	Berichte über Isolationsfehlern, Fehlerstrom oder fehlerhafte Schutzrichtungen	"Auftreten von Isolationsfehlern beim Einspeisen in einige Gebäude (Technischer Herkunft, z.B. 2x FI hintereinander geschaltet bzw. in einem Stromkreis)"
1	Normbezug	Die Begründung der Versorgungsnotwendigkeit durch die vorliegende Norm DIN 14092	Einstufungen als Kritische Infrastruktur	"Gemäß DIN 14092-1 sind Feuerwehrrhäuser als Kritische Infrastruktur (KRITIS) eingestuft und müssen ihre Funktionsfähigkeit auch unter extremen Bedingungen wahren."

<i>n</i>	Kategoriennamen	Definition (Inhaltliche Beschreibung)	Abgrenzung	Zitat
8	Normkonformität	Erfüllen die notwendigen technischen Regelwerke (DIN, VDE, ISO)	Alle Erwähnungen von Normen die keinen Normbezug haben	"Generell gelten für Stromerzeuger (Notstromaggregate) und Netzersatzanlagen (NEA) bzw. Stromerzeugungsanlagen (SEA) folgende Anforderungen: Sie müssen den Normen und Sicherheitsvorschriften entsprechen (z. B. DIN, VDE, ISO)"
1	Organisationsbarrieren	primäre administrative und personelle Hürden für die Notstromversorgung	Aussagen über die Organisation und die unklare Zuständigkeit oder ähnliches	"Ein weiteres Problem ist die Frage, welches Personal die Aggregate im Einsatz bedienen soll. Aus unserer Sicht liegen die Herausforderungen eher im organisatorischen und administrativen Bereich als in technischen Problemen der Stromerzeuger."
1	Organisationsstrukturen vor Technik	Die Priorisierung der Organisationsstruktur vor der Technik, weniger Fokus auf technologische Lösungen	Erwähnung einer Priorisierung von Organisationen vor der Technik	"Das Thema Stromversorgung ist ohne Frage wichtig.; Allerdings muss darauf geachtet werden, sich nicht zu sehr auf technische Lösungen zu fixieren.; Krisen werden durch gute Vorsorge, gute Pläne, gutes Training und gute Organisationsstrukturen bewältigt. Technische Lösungen können dabei eine Unterstützung sein."
3	Parallelbetrieb	Die Schaltung von mehreren Aggregaten, um die Gesamtleistung flexible zu steigern oder Redundanz zu schaffen	Wenn Aussagen zur Addition von Leistung oder zum Aggregatparallelbetrieb gemacht werden	"Netz- und Aggregateparallelbetrieb und Frequenzerhöhung (nur für NEA)"
2	Personalplanung/Personalbedarf	Notwendige personeller Bedarf für den sicheren Betrieb sowie das organisatorische Konzept zur Bedienung	Wenn Konzepte zur Personalplanung oder eine dauerhafte Begleitung erwähnt werden	"Eingewiesenen und fachlich geschultes Personal muss ggf. 24/7 den Betrieb begleiten, um direkt eingreifen zu können."
4	Personalqualifikation	fehlende Qualifikationen, die dem Bediener der Aggregate betreffen, sei es E-Fachkraft oder Führerschein	Bei fehlenden oder notwendigen Qualifikationen die das Personal betreffen	"Das Fach- und Hintergrundwissen zu Nutzung, Vorschriften, Anschaltbedingungen ist oftmals nicht vorhanden."
2	Positionierung	Die Strategische Entscheidung über den Ausstellungsort der Technik in Anbetracht der Infrastruktur	Fokus auf die Abwägung zwischen der Integration im Gebäude oder als abgesetzter Container vor dem Haus	"Es muss gut abgewogen werden, Notstromaggregate in die Gebäude zu integrieren oder sie abgesetzt vom Gebäude in Containern oder Kleinbauten auf dem Gelände zu positionieren."
1	Revisionsfähigkeit	Die langfristige Instandhaltbarkeit durch die Möglichkeit von Überholung aber auch Modernisierung	Bei der Nennung von Revision, Erneuerung oder Modernisierung	"Möglichkeiten der Revision und Erneuerung;"
3	Robust	Mechanische Stabilität und Widerstandsfähigkeit gegenüber Schäden	Erwähnung von Robust, Robustheit	"Der wichtigste Aspekt im Katastrophenschutz ist die robuste und einfache Ausführung der Geräte."
1	Rüstzeit	Zeitspanne vom Eintreffen an der Einsatzstelle bis zur vollständigen Betriebsbereitschaft vom Aggregat	Codiert bei Erwähnung einer Rüstzeit	"Einfache Bedienung und schnelle Rüstzeit"
2	Schadensfreie Lagerung	Maßnahmen zum Schutz der Bauteile während der Nichtbenutzung	Fokus auf Korrosionsschutz und den Funktionserhalt	"Korrosionsschutz und Elektronik auch bei langen Standzeiten"
3	Schutzvorkehrungen	Barrieren, um den Gerätezugriff für unbefugte zu verhindern	Nennung von Schutzmaßnahmen, wie verschließbare Klappen oder den Schutz vor Manipulation	"Steckvorrichtungen bei NEA und SEA sollten verriegelbar sein (Anschlussstecker hinter verschließbarer Klappe mit Leitungsdurchführung)."
3	Standardisierung	Vereinheitlichung von Gerätetypen, Schnittstellen und Protokolle zur einfachen Ausbildung oder Verwendung	Wenn eine Standardisierung gewünscht ist oder eine Einheitlichkeit	"Um die Anwendung der mobilen Aggregate für die Angehörigen der Freiwilligen Feuerwehr möglichst zu vereinfachen, sollen zukünftig alle mobilen Aggregate einheitlich sein (Endress ESE 20 YW IT-TN). Wir befinden uns daher für die noch vorhandene, älteren Aggregate in einem mehrjährigen Ersatzbeschaffungsprozess."

<i>n</i>	Kategoriennamen	Definition (Inhaltliche Beschreibung)	Abgrenzung	Zitat
2	Probleme Standzeit	Technische Probleme, die durch eine lange Standzeit ausgelöst werden und zu einem Defekt führen können	Bei der Erwähnung von Probleme, die nicht mit dem Kraftstoff zu tun haben, aber durch eine lange Standzeit ausgelöst werden	"Die Zuverlässigkeit der Antriebsmaschinen für den Generator ist bei langen Standzeiten häufig ein Problem."
1	Startbereitschaft	Fähigkeit das Aggregat im Notfall unmittelbar zu starten	Fokus auf eine permanente Ladeerhaltung durch eine Starterbatterie	"Ein relevanter Punkt ist die Ladeerhaltung der Starterbatterien. Die Aggregate sollten dauerhaft über eine entsprechende Ladeerhaltung versorgt sein, um im Bedarfsfall jederzeit startfähig zu sein."
3	Startzeit	Zeitintervall zwischen einem Netzausfall und der stabilen Stromabgabe vom Aggregat	Bei Aussagen über die Startzeit und deren Wichtigkeit	"Die Reaktions- und Startzeit ist sehr wichtig, ebenso die Zuverlässigkeit, Brennstofflagerung und Lautstärke."
1	Störanfälligkeit	Erfasst Bedenken bezüglich der Zuverlässigkeit von Aggregaten mit zunehmender elektronischen Komplexität	Wenn ein direkter Zusammenhang zwischen Steuerelektronik und Fehleranfälligkeit hergestellt wird	"Je mehr Steuerelektronik verbaut wird, desto Störanfälliger werden die Geräte"
6	Störungsfreier Betrieb	Dokumentierte Fälle in denen von den Experten keine nennenswerte Probleme mit der aktuellen Notstromtechnik berichtet wurde	Explizite Aussagen über die Zuverlässigkeit von bestehenden Systemen und das fehlen von Ausfällen bei Wartungen	"Technisch sind bei unseren Anlagen bislang keine nennenswerten Probleme aufgetreten."
1	Systemredundanz	Notwendigkeit zusätzlicher System zur Erhöhung der Resilienz	Bei Forderung nach redundanten Anlagen oder die Kombination mit anderen Aggregaten	"In Abhängigkeit von Gebäudetyp, Ausstattung und Netzersatzanlage sind weitere Punkte zu betrachten, wie USV und redundante NEA."
1	Technologieoffenheit	Haltung, dass die technischen Parameter wichtiger sind als die Wahl der spezifischen Antriebsart	Wenn die Antriebsart als zweitrangig eingestuft wird gegenüber technischer Parameter	"Die Wahl der Antriebsart spielt eine untergeordnete Rolle, wichtig ist die Erfüllung technischer Anforderungen"
2	Übungslagen	Bedeutung der praktischen Übung und Handhabung der Technik unter einsatznahen Bedingungen	Fokus auf die Forderung nach realen Beübungen und regelmäßigen Lastläufen	"Regelmäßige Test- und Lastläufe sowie das Üben der Handlungsschritte sind von wesentlicher Bedeutung für das Erreichen des Einsatzzweckes."
1	Unregelmäßiger Betrieb	Die Problematik, dass Aggregate im Notstrom selten im Realeinsatz sind	Aussagen über den nicht regelmäßigen Einsatz	"AdBlue eher unpraktikabel, da die Geräte nicht regelmäßig im Einsatz sind (außer bei Prüfungen)"
1	Verarbeitungsfehler	Qualitätsmangel am Geräte aber auch Defizite im Service Angebot der Hersteller	explizite Nennung von mangelhafter Verarbeitung oder Nichtverfügbarkeit von Serviceleistungen	"Mangelhafte Verarbeitung und fehlende Verfügbarkeit von Wartungs- und Serviceleistungen seitens des Herstellers"
2	Verbrauch	Anforderung an die Effizienz des Systems bezüglich der Treibstoffe und der Zusatzstoffe	Die Betrachtung eines geringen Verbrauchs findet statt	"Ferner sollten alle Maschinen einen geringen Verbrauch und wartungsarm sein."
1	Wärmeversorgung	Einsätze die der Aufrechterhaltung der Wärmeversorgung dienen	Codiert, wenn Wiederanlaufen der Heizungsanlagen oder der Zweck der Einspeisung der Wärme dient	"Durch die Versorgung durch Notstrom schafft man theoretisch die Möglichkeit, dass auch die Heizungsanlagen wieder anlaufen können."
16	Wartungsarmut	Grundsätzliche Forderung nach einer Reduzierung der	Fokus auf Begriffe wie wartungsfreundlich, geringer Prüfaufwand oder Wartungsarm	"Ferner sollten alle Maschinen einen geringen Verbrauch und wartungsarm sein."

<i>n</i>	Kategoriennamen	Definition (Inhaltliche Beschreibung)	Abgrenzung	Zitat
		Instandhaltungsintensität zur Entlastung des Personal oder des Haushaltes		
5	Wartungsaufwand	Problemlage des hohen Wartungsaufwand bei bestehenden Systemen die durch die Abgasnachbehandlung oder einer langen Standzeit erzeugt werden können	Beschreibungen von „wartungsintensiven“ Systemen, hohen Wartungskosten und der Notwendigkeit regelmäßiger Verwendung zur Schadensvermeidung	"Da die meisten Geräte mit Diesel betrieben werden, haben diese auch einen gewissen Wartungsaufwand, welche mit regelmäßiger Verwendung reduziert werden können."
9	Wirtschaftlichkeit	Wirtschaftliche Aspekte über den gesamten Lebenszyklus der Anlage, einschließlich Betrieb und Anschaffung sowie Instandhaltung	Bei Aussagen über Kosten, sei es Wartung, Anschaffung oder auch Bestandskosten	"Der Einsatz fahrbarer Großgeräte ist aufgrund des personellen Aufwands und der hohen Vorhaltekosten (ca. 100 % teurer als stationäre NEA bei gleicher Leistung) oft unverhältnismäßig. Eine ortsfeste NEA bietet hier das beste Verhältnis aus Kosten, Resilienz und Betriebssicherheit."
3	Witterungsbeständig	Eine uneingeschränkte Funktionsfähigkeit unabhängig von den klimatischen Bedingungen am Einsatzort	Forderungen nach einen wetterfest Aufbau oder spezifische Temperaturangaben (z.B. -20 bis > 30 °C) ohne Leistungseinbußen	"Dazu zählt der Temperaturbereich von etwa -20°C bis > 30°C ohne nennenswerte Leistungseinbußen."
5	Zusatzausstattung	notwendiges Zubehör oder integrierte technische Features, welche die logistische Flexibilität erhöhen	Bei der Nennung von Ausrüstung wie Leistungsrollen, Verteilerwürfeln, Lichtmasten, oder spezielle Anschlüsse	"Mindestausstattung an Zubehör (Kabel, Verteiler, Leitungsroller, Werkzeug) in jeder Anlage, Wahlweise Ausstattung mit leistungsstarken ausfahrbaren Flutlichtmasten zur Beleuchtung von Bereitstellungsräumen, Einsatzstellen etc."
14	Zuverlässigkeit	Beinhaltet die unbedingte Funktions- und Ausfallsicherheit der System unter allen denkbaren Einsatzbedingungen, besonders nach langen Standzeiten oder mehrtägigen Dauerbetrieb	Codiert werden Begriffe wie Zuverlässigkeit, Ausfallsicherheit, sicheres Funktionieren sowie Aussagen zur Durchhaltefähigkeit unter hoher Dauerlast.	"Die Aggregate müssen zuverlässig sein und in jeder Einsatzsituation sicher funktionieren."