



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

**Fahrzeuge mit alternativen Antrieben als Verkehrsträger -
Ermittlung und Bewertung der Gefährdungen für Einsatzkräfte bei
Einsätzen der Feuerwehr und der Hilfeleistungsorganisationen**

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades**

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von

Tim Pelzl

aus Olching

Wuppertal, 2026

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Zusammenfassung	IX
Summary	XI
1. Einleitung	1
1.1 Darstellung der Fragestellung / der Problematik.....	1
1.2 Intention der Arbeit.....	4
1.3 Beschreibung der Methodik	5
2. Rechtliche Grundlagen und politischer Wille	7
2.1 Rechtliche Grundlagen	7
2.2 Normung	8
2.3.1 Maßnahmen des Corona-Konjunkturpaketes	11
2.3.2 Rahmen der Europäischen Kommission für die Klima- und Energiepolitik.....	12
2.3.3 Globale Klimaziele: Pariser Klimaschutzübereinkommen	13
3. Regelwerk / Praxishilfen für Einsatzkräfte	14
3.1 Staatliches Regelwerk	14
3.2 Regelwerk der Unfallversicherungsträger	15
3.3 Rettungsdatenblätter der Automobilindustrie	17
3.4 Schriften von Verbänden	19
3.5 Internationale Regelwerke / Handlungshilfen.....	21
4. Verbreitungsgrad von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben	23
4.1 Arten und Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge mit alternativen Antrieben	23
4.2 Vorhandene Lade- und Tankinfrastruktur	25
5. Alternative Energieträger im Fahrzeugbau – Überblick	27
5.1 Elektrische Speichersysteme	27
5.1.1 Funktionsprinzip / Bauarten.....	27
5.1.2 Historie.....	28
5.1.3 Eigenschaften	29
5.1.4 Herstellung und Logistik	32
5.2 Wasserstoff (H ₂)	33
5.2.1 Historie.....	33
5.2.2 Physikalisch-chemische Eigenschaften	34
5.2.3 Anwendung	35
5.2.4 Herstellung und Logistik	36
5.3 Tiefkaltes, verflüssigtes Methan (LNG).....	38

5.3.1	Physikalisch-chemische Eigenschaften	38
5.3.2	Funktion / Anwendung.....	39
5.3.3	Herstellung und Logistik	39
5.4	Komprimiertes Erdgas/Methan (CNG).....	40
5.4.1	Historie.....	40
5.4.2	Physikalisch-chemische Eigenschaften	41
5.4.3	Funktion / Anwendung.....	41
5.4.4	Herstellung und Logistik	41
5.5	Komprimiertes Flüssiggas (LPG).....	42
5.5.1	Physikalisch-chemische Eigenschaften	42
5.5.2	Anwendung	43
5.5.3	Herstellung und Logistik	43
6.	Gefährdungen durch alternative Energieträger im Einsatzgeschehen.....	44
6.1	Gefährdungen bei elektrischen Speichersystemen.....	45
6.1.1	Mechanische Gefährdungen	45
6.1.2	Elektrische Gefährdungen	46
6.1.3	Chemische Gefährdungen.....	48
6.1.4	Brand- und Explosionsgefährdung	53
6.1.5	Biologische Gefährdungen	56
6.1.6	Thermische Gefährdungen.....	56
6.1.7	Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen	57
6.1.8	Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen.....	57
6.1.9	Gefährdungen durch physische Belastungen	57
6.1.10	Gefährdungen durch psychische Faktoren	57
6.2	Gefährdungen bei Wasserstoff als Energieträger	58
6.2.1	Mechanische Gefährdungen	58
6.2.2	Elektrische Gefährdungen	58
6.2.3	Chemische Gefährdungen.....	59
6.2.4	Brand- und Explosionsgefährdung	59
6.2.5	Biologische Gefährdungen	60
6.2.6	Thermische Gefährdungen.....	60
6.2.7	Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen	61
6.2.8	Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen.....	61
6.2.9	Gefährdungen durch physische Belastungen	61
6.2.10	Gefährdungen durch psychische Faktoren	62
6.3	Gefährdungen bei LNG als Energieträger	62
6.3.1	Mechanische Gefährdungen	62

6.3.2	Elektrische Gefährdungen	62
6.3.3	Chemische Gefährdungen.....	63
6.3.4	Brand- und Explosionsgefährdung	63
6.3.5	Biologische Gefährdungen	64
6.3.6	Thermische Gefährdungen.....	64
6.3.7	Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen	65
6.3.8	Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen.....	65
6.3.9	Gefährdungen durch physische Belastungen	65
6.3.10	Gefährdungen durch psychische Faktoren	66
6.4	Gefährdungen bei CNG als Energieträger	66
6.4.1	Mechanische Gefährdungen	66
6.4.2	Elektrische Gefährdungen	66
6.4.3	Chemische Gefährdungen.....	66
6.4.4	Brand- und Explosionsgefährdung	67
6.4.5	Biologische Gefährdungen	69
6.4.6	Thermische Gefährdungen.....	69
6.4.7	Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen	69
6.4.8	Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen.....	69
6.4.9	Gefährdungen durch physische Belastungen	70
6.4.10	Gefährdungen durch psychische Faktoren	70
6.5	Gefährdungen bei LPG als Energieträger	70
6.5.1	Mechanische Gefährdungen	70
6.5.2	Elektrische Gefährdungen	70
6.5.3	Chemische Gefährdungen.....	70
6.5.4	Brand- und Explosionsgefährdung	71
6.5.5	Biologische Gefährdungen	72
6.5.6	Thermische Gefährdungen.....	72
6.5.7	Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen	72
6.5.8	Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen.....	73
6.5.9	Gefährdungen durch physische Belastungen	73
6.5.10	Gefährdungen durch psychische Faktoren	73
7	Einsatzgeschehen bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben	74
7.1	Zwischenfälle bei Fahrzeugen mit elektrischen Speichersystemen	74
7.2	Zwischenfälle bei Fahrzeugen mit gasförmigen Energieträgern.....	78
8	Mögliche Einsatzszenarien bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben	81
8.1	Überblick	81
8.2	Klassifizierung der erwartbaren Einsatzszenarien	81

9	Methoden von Entscheidungsfindung und Gefährdungsbeurteilung	90
9.1	Entscheidungsfindung im Einsatzgeschehen.....	90
9.2	Gefährdungsbeurteilung im Feuerwehreinsatz	96
9.3	Ansätze zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung	98
10	Gefährdungsbeurteilung für relevante Einsatzszenarien	103
10.1	Festlegen von Schutzzielen.....	103
10.2	Gefährdungsbeurteilung der definierten Einsatzszenarien.....	105
11	Mögliche Maßnahmen als Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung	118
11.1	Ableitung von Maßnahmen.....	118
11.2	Technische Maßnahmen	119
11.2.1	Fahrzeughersteller.....	119
11.2.2	Errichtung von Verkehrsinfrastrukturen.....	124
11.3	Einsatzstrategien.....	125
11.4	Wissensvermittlung / Schulung.....	127
11.5	Einsatzvorbereitung.....	131
11.6	Technische Ausstattung	133
11.7	Persönliche Schutzausrüstung	138
12	Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich der Schutzzzielerreichung	141
13	Diskussion und Grenzen der Aussagekraft der Arbeit	147
13.1	Diskussion.....	147
13.1.1	Allgemeines.....	147
13.1.2	Einsatzszenarien	147
13.1.3	Entscheidungsfindung im Einsatzgeschehen.....	148
13.1.4	Gefährdungsbeurteilung	149
13.1.5	Nutzwertanalyse der Maßnahmen	156
13.2	Grenzen der Aussagekraft der Arbeit	158
14	Fazit und Ausblick	161
15	Literaturverzeichnis	166
16	Danksagung	179
17	Anhang	180

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Brandverhalten von Lithium-Ionen-Batterien (DGUV e. V. 2020b).....	31
Abbildung 2: Entscheidungsbaum Modell 1 Verkehrsunfall mit BEV-Beteiligung	84
Abbildung 3: Entscheidungsbaum Modell 2 Brand eines BEV	85
Abbildung 4: Entscheidungsbaum Modell 3 Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug...86	
Abbildung 5: Entscheidungsbaum Modell 4 Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiele von Normen und Anwendungsregeln zu LIB.....	9
Tabelle 2: Unterschiedliche Sicherheitsabstände bei H ₂ -Freisetzung	15
Tabelle 3: Vergleich der Veröffentlichungen zum Brandschutz	20
Tabelle 4: Bestand an Kraftfahrzeugen und deren Energieträger am 1. Juli 2024	23
Tabelle 5: Verhalten von freigesetztem LNG (nach Steller 2021)	39
Tabelle 6: Übersicht der identifizierten Gefährdungen für Einsatzkräfte.....	45
Tabelle 7: Modell 1 - Verkehrsunfall mit BEV-Beteiligung	88
Tabelle 8: Modell 2 - Brand eines BEV	88
Tabelle 9: Modell 3 - Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug.....	88
Tabelle 10: Modell 4 - Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs	89
Tabelle 11: Schutzziele der Einsatzszenarien gemäß Modell 1-4	105
Tabelle 12: Definition der Eintrittswahrscheinlichkeit (W).....	107
Tabelle 13: Definition von Auswirkung (A) / Schweregrad	108
Tabelle 14: Risikomatrix	109
Tabelle 15: Risikogruppen-Handlungsbedarf Beziehungen	110
Tabelle 16: Zusammenfassung der Gefährdungsbeurteilungen - ermitteltes Risiko.....	111
Tabelle 17: Häufigkeiten der Risikogruppen und Gefährdungen.....	113
Tabelle 18: Risikosummenwerte (RSW) Modell 1	114
Tabelle 19: Risikosummenwerte (RSW) Modell 2	115
Tabelle 20: Risikosummenwerte (RSW) Modell 3	116
Tabelle 21: Risikosummenwerte (RSW) Modell 4	117
Tabelle 22: Ergebnisse der Nutzwertanalyse.....	145
Tabelle 23: Maßnahmen sortiert gemäß ihres GnW	146

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABC	atomar, biologisch, chemisch (Gefahren)
ADAC	Allgemeiner deutscher Automobilclub e. V.
ADR	<i>Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road</i> - Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Leitungen der Berufsfeuerwehren
BAuA	Bundeanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BBK-PSA	Persönliche Schutzausrüstung zur Brandbekämpfung, z. B. in Gebäuden
BEV	<i>Battery engine vehicle</i> - Elektrofahrzeug
BLEVE	<i>Boiling liquid expanding vapour explosion</i> - Explosion einer expandierenden Flüssigkeit
CBRN	chemisch, biologisch, radioaktiv, nuklear: Synonym für ABC
CNG	<i>compressed natural gas</i> – komprimiertes Erdgas
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V.
EK	Einsatzkräfte
FwDV	Feuerwehrdienstvorschrift
GnW	Gesamtnutzwert
HEV	<i>Hybride battery engine vehicle</i> – hybrides Fahrzeug mit Elektro- und Verbrennungsmotor, umfasst in dieser Arbeit auch PHEV – <i>plug-in hybride vehicles</i> , die extern geladen werden können.
HV-Speicher	Hochvolt-Speicher, bestehend aus LIB
ICEV	<i>Internal combustion engine vehicle</i> – Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
LCO-Zelle	Lithium-Cobaltoxid-Zelle
LFP-Zelle	Lithium-Eisenphosphat-Zelle
LIB	Lithium-Ionen-Batterie (Sammelbegriff)
LNG	<i>Liquified natural gas</i> – verflüssigtes Erdgas
LOHC	<i>Liquid organic hydrogen carriers</i> – flüssige organische Wasserstoffträger
LPG	<i>liquified petrol gas</i> - Flüssiggas
NMC-Zelle	Nickel-Mangan-Cobalt-Zelle
PSA	persönliche Schutzausrüstung
SOC	<i>State of charge</i> - Ladezustand
TWh	Terawattstunden
vfdb	Vereinigung zur Förderung des dt. Brandschutzes e. V.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Gefährdungen für Einsatzkräfte bei Einsätzen der Feuerwehr und der Hilfeleistungsorganisationen an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben ermittelt und bewertet. Neben anderen Faktoren macht insbesondere der, durch die Menschen verursachte, globale Klimawandel es nötig, Emissionen aus dem Verkehrssektor, die durch die Verbrennung fossiler Energieträger entstehen, drastisch zu reduzieren. Daher kommen immer mehr Fahrzeuge mit alternativen Energieträgern zum Einsatz, die keine oder deutlich weniger klimaschädliche Emissionen verursachen. Mit steigenden Fahrzeugzahlen mehren sich aber auch Unfallereignisse, wobei diese Fahrzeuge bzw. deren Lade- und Tankinfrastruktur beteiligt sind. Daraus resultiert die Fragestellung, inwieweit damit neue Gefährdungen für Einsatzkräfte bei ihren Tätigkeiten an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern verbunden sind. Werden neuartige Gefährdungen erkannt, ist zu klären, inwieweit die bisherigen Methoden, Techniken und Taktiken der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen anwendbar sind bzw. einer Anpassung bedürfen. Dies wurde mithilfe einer semi-quantitativen Gefährdungsbeurteilung und einer daraus folgenden Maßnahmenableitung analysiert. Dazu war es zunächst notwendig, einen Überblick über die zurzeit in Verwendung befindlichen alternativen Energieträger sowie deren spezifische Eigenschaften und Gefährdungen zu verschaffen. Danach wurden musterhafte Szenarien festgelegt, um den Einsatzalltag der Einsatzkräfte abzubilden und einzelne Einsatzszenarien bezüglich ihrer gefundenen Gefährdungen und evtl. auftretenden Risiken vergleichen zu können. Die gefundenen Maßnahmen wurden im Anschluss an die Gefährdungsbeurteilung mit Hilfe einer Nutzwertanalyse hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet. Ein weiterer Aspekt der Arbeit war es, zu beleuchten, wie menschliche Entscheidungen im Einsatzgeschehen zustande kommen, durch welche Faktoren Entscheidungen beeinflusst werden können und inwieweit schnelles und richtiges Entscheiden von Einsatzkräften trainiert werden kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine ganze Reihe Gefährdungen identifiziert werden konnten, die bisher im Zusammenhang mit Verkehrsunfällen oder Fahrzeugbränden nicht bzw. nicht in dem Umfang von den Einsatzkräften zu erwarten waren. Allen voran ist dabei die Bildung von gefährlichen explosionsfähigen Atmosphären durch Ventinggas aus Hochvoltspeichern oder gasförmige Energieträger zu nennen, die insbesondere in umschlossenen verkehrstechnischen Anlagen entstehen können. Aber auch die Exposition mit Gefahrstoffen, Strahlflammenerscheinungen, zerknallende Gasspeicherbehälter oder Ventingereignisse bei Hochvoltspeichern, die unter Umständen auch erst verzögert einsetzen können, zählen zu spezifischen Gefährdungen von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Als Einsatzszenarien, die mit den größten Gefährdungen für Einsatzkräfte verbunden sind, konnten Unfälle

und Brände von Fahrzeugen identifiziert werden, bei welchen Personen in den Fahrzeugen eingeklemmt sind und mit technischen Hilfsmitteln befreit werden müssen. Handelt es sich dabei um gasbetriebene Fahrzeuge, strömt der gasförmige Energieträger aus bzw. brennt das Fahrzeug und findet das Szenario im umschlossenen Raum statt, erhöht sich das Risiko für die beteiligten Einsatzkräfte drastisch. Den höchsten Nutzwert erzielen diejenigen Maßnahmen, die durch technische Maßnahmen verhindern, dass Ventinggase aus einem Hochvolt-speicher bzw. gasförmige Energieträger aus dem Gasspeicherbehälter austreten. Dies zu realisieren, würde einen extremen Nutzen für Einsatzkräfte aber auch Fahrzeuginsassen und weitere beteiligte Personen bedeuten. Weitere Maßnahmen mit hohem Nutzwert sind z. B. das Zugreifen der Einsatzkräfte auf für sie relevante Fahrzeugdaten an der Einsatzstelle, um z. B. kritische Ereignisse rechtzeitig zu erkennen, bauliche Maßnahmen an umschlossenen verkehrstechnischen Anlagen, Erweiterung der apparativen Ausstattung der Einsatzkräfte, Anpassung von Einsatztaktik und Kräfteansatz sowie die konsequente Schulung und Unterweisung zu diesen Themen.

Summary

The present paper identifies and assesses the hazards faced by emergency services personnel during firefighting and rescue operations involving vehicles with alternative drive systems. Among other factors, human-induced global climate change necessitates a substantial reduction in emissions from the transport sector, which are attributable to the combustion of fossil fuels. Consequently, there has been an increasing adoption of vehicles that are powered by alternative energy sources, which have been shown to emit either no climate-damaging emissions or significantly reduced levels of such emissions. However, as the number of vehicles increases, so too does the number of accidents involving these vehicles and their charging and refuelling infrastructure. This prompts the question of the extent to which novel hazards are associated with the activities of emergency services personnel working on vehicles with alternative energy sources. In the event of novel hazards being identified, it is imperative to ascertain the extent to which extant methods, techniques and tactics employed by fire brigades and rescue organisations are applicable or require adaptation. The analysis was conducted utilising a semi-quantitative hazard assessment, followed by a subsequent derivation of measures. In order to proceed with this endeavour, it was imperative to first obtain an overview of the alternative energy sources currently in use, in addition to their specific properties and associated hazards. Subsequently, model scenarios were defined to reflect the everyday work of emergency services and to facilitate a comparison of individual operational scenarios in terms of the hazards identified and any risks that may arise. After the risk assessment, the measures identified were evaluated in terms of their effectiveness using a utility analysis. A further aspect of the work was to illuminate the way human decisions are made during operations, which factors can influence such decisions, and to what extent rapid and correct decision-making by emergency services personnel can be trained.

In summary, it can be stated that a series of hazards were identified that were not previously anticipated by emergency services in relation to traffic accidents or vehicle fires, or at least not to the extent that they were. Of primary significance is the formation of hazardous explosive atmospheres resulting from the venting of gases from high-voltage storage devices or gaseous energy sources. Such atmospheres have the potential to materialise within enclosed traffic facilities. However, exposure to hazardous substances, jet flames, exploding gas storage containers or venting events in high-voltage storage systems, which may also occur with a delay, are also specific hazards associated with vehicles with alternative drive systems. Accidents and fires involving vehicles in which people are trapped and must be freed with technical aids

have been identified as the scenarios that pose the greatest risks to emergency services personnel. In the event of gas-powered vehicles, the gaseous energy source may be released, or the vehicle may burn. Furthermore, if the scenario occurs in an enclosed space, the risk to the emergency services involved is significantly increased. The most efficacious measures pertain to those that employ technical means to prevent the escape of gases from a high-voltage storage unit or a gaseous energy source from the gas storage tank. The successful realisation of this objective would prove to be of significant benefit to emergency services, vehicle occupants, and other individuals involved. It is evident that several additional measures have the potential to confer significant utility. These include, but are not limited to, the facilitation of access for emergency services to pertinent vehicle data at the scene of the incident. This would enable the timely identification of critical events. Furthermore, the implementation of structural measures on enclosed traffic facilities should be considered. In addition, there is a need to expand the equipment available to emergency services, the adjustment of operational tactics as well as force approach and to ensure the provision of consistent training and instruction on this topic.

1. Einleitung

1.1 Darstellung der Fragestellung / der Problematik

Die bedeutenden Entwicklungen im Bereich der Verkehrsträger, wie z. B. Kraftfahrzeuge und Nutzfahrzeuge wurden bisher hauptsächlich durch Variationen der Verbrennungsreaktion realisiert. Dies hatte jedoch seinen Preis: Die unter anderem daraus resultierenden Emissionen wie z. B. Kohlenstoffdioxid haben den globalen Klimawandel verursacht und vorangetrieben (Armand und Tarascon 2008, S. 652).

Um dem entgegenzuwirken, werden weltweit erhebliche Anstrengungen unternommen, alternative gasförmige und elektrische Energieträger zum zukünftigen Betrieb von Verkehrsträgern zu etablieren und die Fahrzeugtechnik dazu zu entwickeln. Das spiegelt sich in vielen Ebenen wider, so berichteten das Deutsche Patent- und Markenamt und das Europäische Patentamt von 660 Patentanmeldungen rund um das Thema Elektrofahrzeuge im Jahr 2019. Laut der Mitteilung des Deutschen Patent- und Markenamtes ist dies eine deutliche Steigerung zu den vorherigen Jahren (Deutsche Patent- und Markenamt (DPMA) 19.05.2020).

Grundsätzlich ist der elektrische Antrieb von Fahrzeugen keine neue Erfindung: Es war der Mangel an leistungsfähiger Batterietechnik, der die Einführung von Elektroautos verlangsamte, die mindestens auf das Jahr 1899 bzw. 1920 zurückgeht (Armand und Tarascon 2008, S. 652).

Mit Einführung der Lithiumionen-Batterietechnik ist dieser limitierende Faktor überwunden worden, wie Giern beschreibt. Nicht nur der Trend zu kabellosen Gerätschaften sorgt für einen stetigen Anstieg von Lithiumionenbatterien (LIB), die z. B. in Laptops, Tablets, Smartphones, Bohrschraubern, Digitalkameras, Mobiltelefonen, Heimspeichern und im industriellen Bereich zu finden sind. Gerade der Bereich der individuellen Mobilität durch Fahrräder, Roller und Fahrzeuge ist gemäß Giern eine Ursache, weshalb LIB mittlerweile den größten Anteil im Bereich der wiederaufladbaren Batterien einnehmen (Giern 2018, S. 435).

Es ist laut Thielmann daher absehbar, dass der weltweite Bedarf an LIB deutlich zunehmen wird. Seiner Einschätzung nach hängt dies auch damit zusammen, ab welchem Zeitpunkt Elektrofahrzeuge den Fahrzeugneumarkt dominieren. Er spricht in diesem Zusammenhang von einer „*globalen Transformation hin zur elektromobilen Ära*“. (Thielmann 2018, S. 4).

Unter anderem die Elektrifizierung der Mobilität prägt mit außergewöhnlicher Dynamik derzeit die Aufbruchsstimmung im Automobil- und Batteriesektor, wie das Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung bereits 2020 feststellte. Für LiB ist deren Ansicht nach der Mobilitätssektor einer der wichtigsten Absatzmärkte. Im nächsten Jahrzehnt könnten Elektrofahrzeuge gemäß ihrer Prognose einen Marktanteil von bis zu 75 Prozent an Fahrzeugneuzulassungen weltweit erreichen (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2020).

Das rasante Entwicklungstempo hat laut Enderlein viele Gründe. Politik, Industrie und Wirtschaft verfolgen ehrgeizige Pläne zur Reduzierung von Schadstoffemissionen sowie zur sinkenden Abhängigkeit von erdölbasierten Kraftstoffen. Die Bundesregierung hat den Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität auf den Weg gebracht mit dem Ziel, Deutschland zum Leitmarkt für Elektromobilität zu entwickeln (Enderlein et al. 2010).

Schmid prognostiziert, dass Verbrennungsmotoren durch die Elektrifizierung der individuellen Mobilität in großen Teilen von Elektromotoren bzw. von Motoren, die durch gasförmige, klimaneutrale Energieträger angetrieben werden, verdrängt werden. Das bedeutet seiner Ansicht nach auch entsprechende Einschnitte bzw. Umorganisationen im Bereich der Automobilindustrie und der Stromversorgung (Schmid 2013, S. 26).

Doch nicht nur die reine Anzahl an batteriebetriebenen Fahrzeugen (englisch *battery electric vehicle* – BEV) ist ausschlaggebend bei der Betrachtung. Laut dem Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung wird davon ausgegangen, dass zukünftig bis zu zehn Millionen Elektrofahrzeuge betrieben werden, die nahezu die gleiche Anzahl an Ladepunkten benötigen (Bundesregierung 2019).

Dies bedeutet auch, dass die Anzahl der Fahrzeuge mit alternativen elektrischen bzw. gasförmigen Antrieben weltweit stetig ansteigt. Mit steigenden Fahrzeugzahlen mehren sich auch Unfallereignisse, in welchen diese Fahrzeuge bzw. deren Lade- und Tankinfrastruktur beteiligt sind.

Wie Sturm *et al.* ausführen, zeigen die momentan üblicherweise eingesetzten LIB im Brandfall ein Verhalten, das von dem herkömmlicher Kraftstoffe, z. B. Mineralöle auf fossiler Basis, abweicht. Dies bezieht sich auf die Möglichkeiten der Brandentstehung ebenso wie auf Brandverlauf und die in großer Menge anfallenden Rauchgase. Erhöhte Gefährdungen bestehen aus seiner Sicht in umschlossenen verkehrstechnischen Anlagen, da hier die manuelle Brandbekämpfung komplex ist und toxische Rauchgase aufgrund fehlender oder eingeschränkter Abzugsmöglichkeiten in großer Menge und hoher Konzentration vorliegen (Sturm et al. 2020, S. 652).

Hieraus leitet Ouvrier unter anderem die Frage ab, inwieweit Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen in Deutschland auf diese Situation vorbereitet sind, bzw. ob sich gegebenenfalls neue, andere oder abweichende Gefährdungen für Einsatzkräfte und weitere beteiligte Personen ergeben. Die bisher bekannt gewordenen Probleme können zum Teil noch auf den geringen Erfahrungsschatz mit der neuen Technologie zurückgeführt werden. Die bis dato beschriebenen Probleme machen andererseits auch deutlich, dass mit der vermehrten Nutzung von alternativen Antriebstechnologien für alle davon betroffenen Stellen Anpassungsbedarf bestehen könnte. Dies gilt insbesondere für die Einsatzkräfte der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen im Schadens- oder Brandfall (Ouvrier 2014).

Bei einer von Georgiev durchgeführten österreichischen Umfrage bewerten die Beteiligten die generelle Sicherheit von BEVs subjektiv als hoch. 59 % der befragten Personen bejahen, dass BEV sicher sind („12 % *sehr sicher*“ und „47 % *eher sicher*“). Jüngere männliche Befragte halten BEV eher für sicher, ältere männliche Befragte tendieren dazu, BEV eher als unsicher einzuschätzen. Die vermeintliche Brandgefahr von BEV spiegelt sich auch in der Umfrage wider: rund 44% der befragten Personen sehen die Gefahr eines Fahrzeugbrandes als das größte Risiko beim Betrieb eines BEV (Georgiev 2021).

Aufgrund der generellen Vergleichbarkeit der Bevölkerung in Österreich und der Bundesrepublik Deutschland ist anzunehmen, dass diese Umfrageergebnisse im Grunde auf Deutschland übertragbar sind. Demzufolge würden rund 40 % der Bevölkerung Elektroautos als eher unsicher einschätzen.

Laut Georgiev spielt auch die Berichterstattung der Medien eine Rolle bei der Einschätzung von Gefahren durch BEV. Für jeweils mehr als die Hälfte der Bevölkerung treffen laut seiner Umfrage folgende Thesen zu: *„Ich denke, dass sich die Technologie der Lithium-Akkus in Zukunft verbessern und das Brandrisiko damit reduziert wird“* (58 %) und *„Ich vertraue darauf, dass mich die Feuerwehr gegen brennende Elektroautos schützt“* (53 %). Knapp die Hälfte der Befragten geht jedoch davon aus, dass *„brennende E-Autos in Zukunft größere Schäden anrichten werden, als man jetzt annimmt“* (47 %) und *„Elektroautos in Tiefgaragen und Parkhäusern ein besonders hohes Brandrisiko darstellen“* (45 %). Mehr als ein Drittel der befragten Personen (35 %) macht sich *„große Sorgen, Schäden aufgrund brennender Elektroautos zu erleiden“*. Nur rund 36 % der Befragten sind der Meinung, dass die Gefährdung durch BEV eher als übertrieben dargestellt wird, und für nur 32 % sind Elektroautos *„sehr sicher und es besteht kein Brandrisiko“* (Georgiev 2021).

Maßgeblichen Einfluss auf die öffentliche Wahrnehmung hat auch die mediale Berichterstattung, die nicht immer neutral ist, wie z. B. hier treffend beschrieben wird:

„Wenn irgendwo auf diesem Planeten ein Elektroauto brennt, ist das mediale Interesse meist groß, ganz anders als bei einem inzwischen alltäglich gewordenen Brand eines Verbrennerautos. Schließlich handelt es sich um ein neues und seltenes Phänomen und nicht wenige Medien und Parteien nutzen eine solche Tragödie, um ihre alternativen Fakten und Ansichten gegen Elektroautos vorzubringen.“ (Im Elektroauto-Höllenfeuer 2021).

1.2 Intention der Arbeit

Die Notwendigkeit zur Dekarbonisierung des gesamtgesellschaftlichen Lebens in Deutschland hat durch den im April 2022 begonnenen Ukrainekrieg und die daraus resultierende Gasmangellage nochmals erheblich an Brisanz gewonnen. Eines der wichtigen Themen hierbei ist die Umstellung der bisher genutzten Verkehrsträger weg von fossilen hin zu klimaneutralen Energieträgern.

Aus einer durch das Kuratorium für Verkehrssicherheit in Österreich durchgeführten Expertenbefragung geht hervor, dass diese nicht davon ausgehen, dass die Brandgefahr durch einen höheren Anteil an BEV eine Steigerung erfahren wird. Als die derzeit größte Herausforderung wird der Mangel an Kenntnissen und Informationen, sowie dass es noch *„kein umfangreiches vorbeugendes Schulungsprogramm für Einsatzkräfte der Feuerwehren gebe“*, gesehen (Georgiev 2021).

Diese Beobachtung wird gestützt von einer internationalen Befragung von Vollmacher im Jahr 2021, bei welcher von 426 befragten Einsatzkräften rund 66 % antworteten, dass sie noch keine Einsatzerfahrung mit einem Brand eines Elektrofahrzeuges hatten. Die gleiche Zahl der befragten Personen geht davon aus, dass das Erkennen eines BEV an der Einsatzstelle schwierig ist (Vollmacher 2021).

Geht man davon aus, dass Fahrzeuge mit gasgetriebenem Antrieb eher in geringerer Stückzahl am Straßenverkehr teilnehmen, ist die Einsatzerfahrung mit dieser Art von Antriebsart vermutlich vergleichbar gering. Der Bestand an gasbetriebenen Kfz und Nutzfahrzeugen betrug in 2024 rund 421.000 bei insgesamt rund 50 Millionen Fahrzeugen gesamt (Kraftfahrtbundesamt 2024). Es ist daher von großer Bedeutung, dass die, in sehr vielen Fällen ehrenamtlichen Einsatzkräfte, die bei Einsatzszenarien mit Verkehrsträgern mit alternativen Antrieben zum Einsatz kommen, Hilfestellungen zur Entscheidungsfindung und zum erfolgreichen und sicheren Tätigwerden zur Verfügung haben. Dazu müssen jedoch die Risiken und Gefährdungen bekannt sein oder ermittelt werden.

In dieser Arbeit sollen daher folgende Hypothesen untersucht werden:

1. Die Einführung/Umstellung auf alternative Energieformen als Antriebstechnik bei Verkehrsträgern bedeutet auch das Auftreten von neuen/bis dato unbekannten Risiken und Gefährdungen für Einsatzkräfte von Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen. (Hypothese 1)
2. Diese neu auftretenden Gefährdungen können systematisch ermittelt und beurteilt werden, z.B. hinsichtlich Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung. (Hypothese 2)
3. Es ist möglich und sinnvoll, Schutzziele und Maßnahmen abzuleiten (z. B. in technischer, organisatorischer bzw. personenbezogener Form), die notwendig sind, um ein sicheres Arbeiten für Einsatzkräfte im Schadensfall bzw. generell zukünftig im Bereich der Energiewende bei Verkehrsträgern zu ermöglichen. (Hypothese 3)
4. Es ist zielführend eine begrenzte Anzahl an Szenarienklassifizierungen zu entwickeln, um darauf basierend standardisierte Handlungsanleitungen für Einsatzkräfte abzuleiten, da die Entscheidungsprozesse im Führungsvorgang aufgrund einer überschaubaren Anzahl an standardisierten Handlungsoptionen das Tätigwerden der Einsatzkräfte effektiver und sicherer werden lässt. (Hypothese 4)

Werden neuartige Gefährdungen erkannt, ist zu klären, inwieweit die bisherigen Methoden, Techniken und Taktiken der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen anwendbar sind bzw. einer Anpassung bedürfen. Gleiches gilt für übergeordnete Regelungen. Stanzel beschreibt diesen Aspekt im Zusammenhang mit alternativen Energieträgern wie folgt: Sollte sich das Gefährdungspotential, welches momentan als Basis für Gesetze, Richtlinien und weitere Regelungen angenommen wird, verändern, müssen eben auch diese normativen Regelungen an die Entwicklungen der Zeit angepasst werden (Stanzel 2020).

1.3 Beschreibung der Methodik

Um die aufgestellten Hypothesen prüfen zu können ist es zunächst notwendig, die Thematik mit ihren vielen Facetten zu beleuchten.

Aufgrund der Komplexität und Heterogenität, gerade auf der technischen Ebene, ist hierbei oft nur eine erste Näherung möglich, die die für die Fragestellungen relevanten Aspekte beinhaltet. Auch der rechtliche Rahmen und der politische Wille, auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene sind Aspekte, die eine Rolle spielen und daher betrachtet werden müssen, um ein ausreichendes Bild zu erhalten.

Welche Regelungen und Handlungshilfen es bereits gibt, bzw. inwieweit hierzu schon Erfahrungen vorliegen, ist ein weiterer Aspekt, der ebenso in Betrachtung zu ziehen ist, wie ein Überblick über bereits bekannte Unfallereignisse bzw. deren Art und Anzahl.

Ein wichtiger Gesichtspunkt ist die Frage nach der Entscheidungsfindung im Verlauf eines Feuerwehreinsatzes: Wie kommen Entscheidungen von Führungskräften zustande und wie können sie hierbei gegebenenfalls unterstützt werden?

Dazu ist es zunächst notwendig, wesentliche Szenarien zu identifizieren, die einer Risikoabschätzung/Gefährdungsbeurteilung unterzogen werden sollen.

Um Entscheidungen sicher und schnell herbeiführen zu können, sind Kenntnisse und Abschätzungen von eventuell bestehenden Risiken bei den identifizierten Szenarien, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten und möglichen Auswirkungen notwendig. Hierzu existieren zahlreiche Ansätze, um diese Parameter zu beschreiben bzw. zu antizipieren. Daher ist es notwendig, ein geeignetes Instrument auszuwählen und auf die identifizierten Szenarien beim Einsatz an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern anzuwenden.

Die Erkenntnisse und Ergebnisse aus diesen Gefährdungsbeurteilungen müssen bewertet und in fachliche Empfehlungen und Handlungsanleitungen überführt werden, um sie für Einsatzkräfte anwendbar zu machen. Für dabei identifizierte Risiken, welchen gegebenenfalls nicht adäquat begegnet werden kann, sind Lösungsstrategien zu entwickeln. Ebenso wichtig ist das Entwickeln von übergeordneten Schutzziele zu diesem Thema, um auch losgelöst von konkreten Fällen formulieren zu können, was als Schutzniveau anzustreben ist. Dies erleichtert auch die Übertragbarkeit auf anders gelagerte, jedoch grundsätzlich vergleichbare Szenarien.

2. Rechtliche Grundlagen und politischer Wille

„Die Mobilitätspolitik ist dem Pariser Klimaschutzabkommen und dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung verpflichtet. Wir wollen die Klimaziele von Paris erreichen und dabei soziale Belange berücksichtigen, die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie gewährleisten und bezahlbare Mobilität sicherstellen. Dafür bedarf es eines ganzen Bündels von Maßnahmen, wie z. B. der Förderung von Elektromobilität [...].“
(Bundesregierung 2021).

2.1 Rechtliche Grundlagen

Die Bestrebungen zum Erreichen der Klimaschutzziele sind weltweit durchaus unterschiedlich ausgeprägt, in der Europäischen Union und in der Bundesrepublik Deutschland jedoch in vielen Bereichen mit hoher Priorität bewertet.

Gemäß der Europäischen Union verursacht der Verkehrsbereich circa 25% der Treibhausgasemissionen in der EU, mit steigender Tendenz. Ein Ziel auf dem Weg zur Klimaneutralität ist es, die durch den Verkehr auf den Straßen, den Schienen und in Schiff- und Luftfahrt verursachten Emissionen bis 2050 um 90 % zu reduzieren. (Europäische Kommission 2019).

Dieses Ziel ist gemäß dem BMWi im Klimaschutzprogramm 2030 verankert worden. Die Treibhausgasneutralität soll ebenfalls im Jahr 2050 erreicht werden (BMWi 2020, S. 2). Die Bundesregierung beabsichtigt, für die dafür benötigte Elektrizität nur regenerative Energiequellen zu nutzen. Auch der innerstädtische Straßenverkehr soll bis zum Jahr 2050 hauptsächlich durch alternative Energieträger betrieben werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Bundesministerium für Bildung und Forschung 2011, S. 11).

Wie Stanzel ausführt, gibt es auch auf internationaler Ebene von Seiten der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) Bemühungen, Bestimmungen betreffend den Fahrzeugbau über gemeinsame Regelungen in Form von sogenannten „ECE-Regelungen“ zu vereinheitlichen. Die Gültigkeit der ECE-Regelungen bezieht sich auf jene Staaten, welche das Übereinkommen „Globale technische Harmonisierung von Fahrzeugen“ unterzeichnet haben. Derzeit haben 63 Mitgliedsstaaten das Übereinkommen unterzeichnet, welches 147 Vorschriften zu Fahrzeugkomponenten oder –techno-

logien beinhaltet. Die ECE-Regelung R100 beinhaltet Vorgaben betreffend der elektrischen und akkumulatorenbezogenen Sicherheit bei BEV. Sie wurde 2013 das erste Mal adaptiert und ist für die Mitgliedsstaaten seit 2016 bindend (Stanzel 2020).

Daraus ist ersichtlich, dass von Seiten der Gesetzgebung ein starker Wille vorhanden ist, Verkehrsträger mit alternativen, nicht fossilen Antrieben zu fördern. Eine Vielzahl gesetzlicher Regelungen dazu auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene sind hierzu bereits erlassen bzw. in Vorbereitung.

2.2 Normung

Technologien werden in der Regel in internationalen, europäischen oder nationalen Normen beschrieben. Dies dient der Vereinheitlichung, Standardisierung und besseren Vergleichbarkeit von Produkten. Ein sehr wichtiger Aspekt der Normung ist jedoch auch das Einhalten bzw. Beschreiben von Sicherheitsanforderungen und Prüfverfahren z. B., um die in einer Norm beschriebenen Sicherheitsanforderungen zu erreichen. Die Entwicklung von alternativen Antriebstechnologien/Energieträgern ist eng mit der Normungsarbeit verbunden. Gerade im Elektroautomobilsektor existieren Normen, um z. B. Sicherheit aber auch Interoperabilität der Produkte zu gewährleisten. Um einen Überblick zu erhalten, wird in diesem Kapitel lediglich auf die Normung im Bereich der BEV eingegangen. Zusätzlich zu den zahlreichen Normen und Protokollen, die z. B. für Li-Ionen-Batterien verfügbar sind, gibt es eine Reihe von Sicherheitsnormen für die Gesamtkonstruktion von stationären Li-Ionen-Batteriesystemen und Energiespeichersystemen. Diese Sicherheitsnormen enthalten im Allgemeinen eine Reihe von Mindestanforderungen an die Konstruktion, die das System erfüllen sollte, sowie eine Reihe von Leistungstests, um sicherzustellen, dass das System über seine voraussichtliche Lebensdauer sicher funktioniert. Diese Konstruktionsanforderungen betreffen in der Regel einige oder alle der folgenden Punkte: Materialauswahl/-anforderungen; elektrische Abstände von Komponenten, Kriterien für die Verdrahtung, Steuerungen und andere Komponenten, Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, funktionale Sicherheitsanforderungen, Markierungen, Beschilderungen und Anweisungen (Blum und R. Thomas Long Jr. 2016).

Eine beispielhafte, nicht abschließende Übersicht zur aktuellen Normung in Bezug auf LIB bzw. Elektrofahrzeuge gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Beispiele von Normen und Anwendungsregeln zu LIB

Nummer	Titel
Tragbare Batterien	
DIN EN 62133-2	Sekundärzellen und -batterien mit alkalischen oder anderen nicht säurehaltigen Elektrolyten – Sicherheitsanforderungen für tragbare gasdichte Sekundärzellen und daraus hergestellte Batterien für die Verwendung in tragbaren Geräten Teil 2: Lithium-Systeme
Stationäre Batterien	
DIN EN 62619	Sekundärzellen und -batterien mit alkalischen oder anderen nicht säurehaltigen Elektrolyten – Sicherheitsanforderungen für Lithium-Sekundärzellen und -Batterien für die Verwendung in industriellen Anwendungen
DIN EN 62620	Akkumulatoren und Batterien mit alkalischen oder anderen nichtsäurehaltigen Elektrolyten – Lithium-Akkumulatoren und -batterien für industrielle Anwendungen
DIN EN 63056	Sekundärzellen und -batterien mit alkalischen oder anderen nichtsäurehaltigen Elektrolyten – Sicherheitsanforderungen für Lithium-Sekundärzellen und -batterien für die Verwendung in elektrischen Energiespeichersystemen
VDE-AR-E 2510-50	Stationäre Energiespeichersysteme mit Lithium-Batterien – Sicherheitsanforderungen
Elektrostraßenfahrzeuge	
DIN EN IEC 62660-1	Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen Teil 1: Prüfung des Leistungsverhaltens
DIN EN IEC 62660-2	Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen Teil 2: Zuverlässigkeits- und Missbrauchsprüfung
DIN EN 62660-3	Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen Teil 3: Sicherheitsanforderungen
ISO 12405-4	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Prüfspezifikation für Lithium-Ionen Batteriepakete und -systeme Teil 4: Leistungsprüfungen
ISO 6469-1	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Sicherheitsspezifikation Teil 1: Wiederaufladbare Energiespeichersysteme (RESS)
Leichtelektrofahrzeuge	
DIN EN 50604-1	Lithium-Sekundärbatterien für Anwendungen in leichten Elektrofahrzeugen Teil 1: Allgemeine Sicherheitsanforderungen und Prüfverfahren

Quelle: Dormann et al. 2021, S. 19

Beispielhaft fasst Dirks wichtige Inhalte der Normenreihe DIN EN 62660 wie folgt zusammen: Um Defekte und kritische Ereignisse auf ein Minimum zu reduzieren, werden Batterien verschiedenen Prüfungen unterzogen. Testverfahren und Sicherheitsanforderungen werden in der Normenreihe DIN EN 62660 „*Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen*“ beschrieben. Die Batterien werden bei diesen Prüfungen stichprobenartig ausgewählt und hinsichtlich folgender Kriterien untersucht: Verrutschen, Verformung, übermäßige Erwärmung, Austritt von Batterieflüssigkeit, Brand, Bersten, Kurzschluss, Entweichen von Gas, Explosion. Innerhalb der

Prüfungen werden gemäß Dirks folgende Zustände simuliert bzw. ausgelöst: Druckabfall, Schock, Temperaturwechsel, äußerer Kurzschluss, Schwingung, Aufprallen/Quetschen (Dirks 2019).

Welche essenzielle Rolle Normung bereits in der Produktion spielen kann, wird von Barilo am Beispiel von Tanks für komprimiertes Erdgas (CNG - *compressed natural gas*) wie folgt verdeutlicht: Es liegt in der Natur leistungsbezogener Normen, dass schlechte Konstruktionen in der Phase der Konstruktionsprüfung aussortiert werden. Ausfälle von CNG-Tanks, die auf Konstruktionsprobleme zurückzuführen sind, traten im Allgemeinen in Ländern auf, die keine leistungsbezogenen Industrienormen eingeführt haben. Heute werden fast alle CNG-Tanks nach leistungsbezogenen Industrienormen oder Vorschriften qualifiziert. Die Normen für CNG-Tanks sind ausreichend, um Ausfälle von Tanks aufgrund von Herstellungsproblemen zu vermeiden, da die Qualitätskontrolle bei der Herstellung, einschließlich Inspektions- und Testverfahren, in diesen Dokumenten genau festgelegt ist. Ein Versäumnis bei der Qualitätskontrolle ist die typische Ursache für Tanks, die aufgrund eines Herstellungsproblems gebrochen sind (Barilo 2018, S. 5).

Um die Gefahr von Eskalationen bei Verkehrsunfällen durch neuartige Energiespeichersysteme zu reduzieren bzw. idealerweise zu vermeiden, verlangen laut Feng *et al.* viele Länder, dass BEV-Hochvoltspeicher obligatorische Testnormen, z. B. UN 38.3, UN R100, SAE-J2464, IEC-62133, GB/T 31485 bestehen, bevor sie Anwendung in BEV finden. Die Wahrscheinlichkeit von Unfällen, die durch LIB verursacht werden, kann wesentlich verringert werden, nachdem sie diese Teststandards bestanden haben (Feng et al. 2018).

Gemäß Vollmacher werden mittlerweile auch Standards erstellt, die ein sicheres Tätigwerden von Einsatzkräften ermöglichen sollen, wie z. B. die Normenreihe ISO 17840 „*Straßenfahrzeuge - Informationen für Ersthelfer und Rettungskräfte*“, die momentan folgende Teile umfasst:

Teil 1: *Rettungsdatenblätter für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge*,

Teil 2: *Rettungsdatenblätter für Kraftomnibusse und schwere Nutzfahrzeuge*,

Teil 3: *Vorlage für einen Leitfaden für Notfallmaßnahmen*,

Teil 4: *Identifizierung der Antriebsenergie* (Vollmacher 2021).

Normung stellt somit einen wichtigen Bestandteil der internationalen Standardisierung im Bereich von Entwicklung, Produktion, Vertrieb und Anwendungssicherheit bei Verkehrsträgern mit alternativen Energieträgern dar. Sie kann daher ein Ansatzpunkt sein, Produkte und Systeme auch im Havariefall für Einsatzkräfte sicher zu gestalten.

2.3 Staatliche Förderungen/Anreizsysteme

Von Seiten der Bundesregierung und auch der Landesregierungen wurde früh erkannt, dass ein Wandel hin zu Verkehrsträgern mit alternativen Antrieben, gerade in der Anfangsphase, nur mit einer nennenswerten und umfassenden finanziellen Förderung möglich sein kann. Daher wurden in den letzten 15 Jahren zahlreiche Anreizsysteme, sei es finanzieller, rechtlicher oder steuerlicher Art, geschaffen, um den Markthochlauf zu beschleunigen und damit den Klimaschutz voranzutreiben.

Bereits im Jahr 2007 legte die deutsche Bundesregierung fest, dass die Förderung der Elektromobilität ein wesentlicher Aspekt zum Erreichen der Klimaschutzziele sein soll. Im November 2008 wurde die „Nationale Strategiekonferenz Elektromobilität“ abgehalten. Eines der Ergebnisse war der „Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität“ (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Bundesministerium für Bildung und Forschung 2011, S. 6).

Mit der Etablierung von Kaufboni und Steuererleichterungen wurden seit 2016 deutliche Erleichterungen beim Kauf und Betrieb von Elektrofahrzeugen geschaffen, die deren Markteinführung voranbringen sollten, wie Thielmann resümiert (Thielmann 2018, S. 21).

Und auch im Koalitionsvertrag der 19. Legislaturperiode haben die Koalitionäre festgelegt, dass sie die Elektromobilität bundesweit weiter ausbauen wollen und die bisherigen Förderungen erweitern und ergänzen. Dies beinhaltet auch den Aufbau einer flächendeckenden Lade- und Tankinfrastruktur (Bundesregierung 2021).

2.3.1 Maßnahmen des Corona-Konjunkturpaketes

Mit Ausbruch der globalen Covid-19-Pandemie im Jahr 2020 ging ein erheblicher Einbruch der Wirtschaftsleistung einher. Um die wirtschaftlichen Folgen für die Wirtschaft, die öffentliche Hand und die Privathaushalte abzufangen, wurden mehrere Entlastungs- und Konjunkturpakete von der damaligen Bundesregierung initiiert. Eines davon enthielt rund 50 Milliarden Euro, unter anderem zur Förderung und Entwicklung der deutschen Wasserstoffwirtschaft.

Die Bundesregierung bezuschusste in diesem Zuge auch die Wasserstoffproduktion mit rund 9 Mrd. (Bundesregierung 06.06.2020). Der Sachverständigenrat für Umweltfragen attestiert den Wasserstofftechnologien zukünftig eine hohe wirtschaftliche und

industrielle Bedeutung. Eine weitere Förderung hält er daher für empfehlenswert (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2021, S. 8).

Es kann festgestellt werden, dass die politischen Maßnahmen, um die wirtschaftlichen Folgen der Covid-19 Pandemie zu kompensieren in nicht unerheblichem Umfang dazu beitragen werden, dass Verkehrsträger mit alternativen Antriebsarten verstärkt und beschleunigt ihren Weg in den Alltag in Deutschland finden werden.

2.3.2 Rahmen der Europäischen Kommission für die Klima- und Energiepolitik

Durch die Verabschiedung des Klimaschutzprogramms 2030 hat sich die Bundesregierung für die Einhaltung der angestrebten Klimaziele in 2030 ausgesprochen und strebt die Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 an. (BMWi 2020, S. 2).

Auf europäischer Ebene soll dies der sogenannte *Green Deal* ermöglichen. Dieser will unter anderem die Ressourcennutzung und die Treibhausgasemission voneinander entkoppeln. Auch hier ist die Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 ein zentrales europäisches Ziel (Europäische Kommission 2019).

Als Etappenziele für die Transformation weg von fossilen Brennstoffen hin zu alternativen Energieträgern sind, bezogen auf den Straßenverkehr unter anderem vorgesehen:

- *„Bis 2030 werden mindestens 30 Millionen emissionsfreie Pkw und 80 000 emissionsfreie Lkw auf den Straßen unterwegs sein.*
- *2050 werden fast alle Pkw, Lieferwagen, Busse und neuen Lkw emissionsfrei sein.*
- *Emissionsfreie Hochseeschiffe und Großflugzeuge werden bis 2030 bzw. 2035 auf den Markt kommen“* (Europäische Kommission 2020).

Aber auch schon vor diesen Etappenzielen aus dem *Green Deal* sind wesentliche Veränderungen geplant. So wurde im Jahr 2018 die Anschlussregelung für die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (*Renewable Energy Directive* - RED2) beschlossen. Diese besagt, dass der Anteil von erneuerbaren Energien im Verkehrsbereich bis 2030 auf 14 % erhöht werden soll. Gleichzeitig soll auch der Anteil von Energieträgern, die aus nachwachsenden Roh-, Reststoffen und Müll hergestellt werden, von 0,05 auf 1,75 % angehoben werden (Edel und Jakob Jegal 2019).

Auch die Tank- und Ladeinfrastruktur muss mit zunehmender Anzahl an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben entwickelt werden. Die europäische Leitlinie „Aufladen und

Betanken“ ist eine europäische Leitinitiative im Rahmen der Aufbau- und Resilienzfähigkeit: Bis 2030 sollen eintausend Wasserstoffstationen und eine Million der drei Millionen öffentlichen Ladestationen gebaut werden. (Europäische Kommission 2020).

2.3.3 Globale Klimaziele: Pariser Klimaschutzübereinkommen

Nicht nur auf nationaler und europäischer Ebene werden eine Vielzahl an Maßnahmen geplant und umgesetzt, die Klimaschutzmaßnahmen beinhalten. Die Klimakonferenz von Paris hat 2015 erstmalig auf internationaler Ebene weitreichende Vereinbarungen zum Klimaschutz zum Ergebnis, wie das damalige Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit ausführt.

Alle 197 in Paris vertretenen Länder stimmten für das Klimaschutzübereinkommen. Damit wurde das gemeinsame Ziel festgelegt, *„den Anstieg der weltweiten Durchschnittstemperatur deutlich unter 2°C zu halten und möglichst auf 1,5°C zu beschränken“*. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2019).

Da gemäß dem Sachverständigenrat für Umweltfragen derzeit circa 84 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland durch die energetische Nutzung fossiler Energieträger anfallen, kommt dem Einsatz von erneuerbaren Energien und weiteren Energieeffizienzmaßnahmen eine große Bedeutung zu, um einen großen Teil dieser Emissionen zukünftig zu vermeiden (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2021, S. 6).

3. Regelwerk / Praxishilfen für Einsatzkräfte

3.1 Staatliches Regelwerk

Die Einsatzkräfte der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen sind in der Regel nicht direkt durch staatliche Arbeitsschutzregelungen, wie z. B. das Arbeitsschutzgesetz und seine nachgeordneten Verordnungen adressiert, da in deren Systematik Regelungsinhalte nicht nach einzelnen Betriebsarten, sondern basierend auf der vorliegenden Gefährdung beschrieben werden (BMAS 07.08.1996). Das hat zur Folge, dass spezifische staatliche Regelungen für den Umgang mit alternativen Energieträgern im Einsatzfall für Einsatzkräfte auf Bundesebene nicht vorhanden sind. Das liegt auch darin begründet, dass die Verantwortung zum Unterhalten und Betreiben des Brandschutz- und Gefahrenabwehrsystems in Deutschland auf kommunaler Ebene angesiedelt ist und daher durch landesrechtliche Vorgaben geregelt ist. Fachspezifische Praxishilfen für Einsatzkräfte der Feuerwehren werden daher in der Regel jeweils von den Bundesländern erstellt und meist über die Landesfeuerwehrschulen in ihrem Zuständigkeitsgebiet zur Verfügung gestellt.

Einige Landesfeuerwehrschulen bzw. Landesinnenministerien haben den Bedarf erkannt, Praxishilfen im Umgang mit havarierten Fahrzeugen mit alternativen Antriebsformen zur Verfügung zu stellen. Exemplarisch seien die Schriften

- „*Alternative Antriebe für Kraftfahrzeuge*“ des Landes Brandenburg (Landesschule und Technische Einrichtung für Brand- und Katastrophenschutz (LSTE) 2021), die
- „*Einsatzhinweise für Fahrzeuge mit Li-Ionen-Akkumulatoren*“ (Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge (IBK) Version 1.0) und die
- „*Handlungsempfehlung für Rettungskräfte bei Einsätzen mit Elektrofahrzeugen*“ aus Thüringen (Thüringer Ministerium für Inneres und Kommunales 2020)

genannt.

Einige dieser Veröffentlichungen enthalten nur Hinweise zum Umgang mit Elektrofahrzeugen aber nicht zu anderen alternativen Energieträgern. Obwohl sich die Regelwerke im Hinblick auf den Umfang zum Teil deutlich unterscheiden, sind die darin beschriebenen Gefährdungen bzw. die aufgeführten Einsatzmaßnahmen für Einsatzkräfte durchaus vergleichbar.

Viele orientieren sich inhaltlich an der bereits im Jahr 2012 erschienenen Information 205-022 der Deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) „*Rettungs- und Löscharbeiten an PKW mit alternativer Antriebstechnik*“ (DGUV e. V. 2012).

In Feuerwehrdienstvorschriften, die die Landesinnenministerien in ihrem Bereich einführen oder zur Anwendung empfehlen, finden sich momentan keine spezifischen Inhalte zum Umgang mit alternativen Energieträgern.

Es kann festgehalten werden, dass staatliche Regelwerke zwar vorhanden sind, jedoch in Qualität und Aussagekraft für die Einsatzkräfte durchaus in sehr unterschiedlichen Ausprägungen vorliegen.

Wie unterschiedliche fachliche Aussagen für Einsatzkräfte z. B. beim Einsatz an Fahrzeugen mit Wasserstoffbevorratung sein können, hat Kirschke übersichtlich zusammengefasst (Tabelle 2, nach Kirschke 2020, S. 117).

Tabelle 2: Unterschiedliche Sicherheitsabstände bei H₂-Freisetzung

Fundstelle	Gültig für	Gefahrenbereich	Absperrbereich
FwDV 500 (Ausgabe 2012)	Gefahrgutunfälle	50m	100m
FwDV 500 Maßnahmengruppe 2 (Ausgabe 2012)	Gasförmige Stoffe Flüssiggas- / Druck- gaskesseltankwagen Industrietanks	300m	1000m
AGBF Merkblatt	H ₂ -Fahrzeuge	25 m	Keine Angabe
AGBF Leitfaden	H ₂ -Einzelflasche	50 m	100 m
	H ₂ -Flaschenbatterie	150 m	400 m
	LH ₂ -Transporter	300 m	750 m
Emergency response guide for First Responders	H ₂ -PKW kein Feuer / Leck	keine Angabe	50 m
	H ₂ -PKW Feuer oder Leck	keine Angabe	100 m
	H ₂ -Trailer kein Feuer / Leck	keine Angabe	100 m
	H ₂ -Trailer Feuer oder Leck	keine Angabe	500 m
	H ₂ -Bus Feuer oder Leck	keine Angabe	200 m

3.2 Regelwerk der Unfallversicherungsträger

Im Gegensatz zum staatlichen Arbeitsschutzrecht, das wie in 3.1 beschrieben grundsätzlich einen gefährdungsbezogenen Regelungsansatz verfolgt, beruht das autonome Satzungsrecht der gesetzlichen Unfallversicherungsträger oft auf einem Branchen- oder Betriebsarten-spezifischen Ansatz. Des Weiteren adressiert die DGUV Vorschrift 1 „Grundsätze der Prävention“ im §2 explizit auch Einsatzkräfte, die unentgeltlich, also ehrenamtlich tätig sind, wie z. B. in der Freiwilligen Feuerwehr:

„Der Unternehmer hat die erforderlichen Maßnahmen zur Verhütung von Arbeitsunfällen, Berufskrankheiten und arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren sowie für eine wirksame Erste Hilfe zu treffen. Die zu treffenden Maßnahmen sind insbesondere in staatlichen Arbeitsschutzvorschriften [...], dieser Unfallverhütungsvorschrift und in weiteren Unfall-

verhütungsvorschriften näher bestimmt. Die in staatlichen Recht bestimmten Maßnahmen gelten auch zum Schutz von Versicherten, die keine Beschäftigten sind.“ (DGUV e. V. 2014, S. 9)

Die Intention dabei ist, keine Regelungslücken entstehen zu lassen, d. h. *„alle Versicherten unterliegen – sofern nicht spezielle Regelungen für bestimmte Versichertengruppen, z. B. im Bereich der Feuerwehren, bestehen – grundsätzlich denselben Rechtsvorschriften.“* (DGUV e. V. 2014, S. 11)

DGUV Vorschriften sind dabei von Unternehmen und Versicherten als autonomes Recht zu betrachten und daher verbindlich anzuwenden. Ein Abweichen von Unfallverhütungsvorschriften ist nicht zulässig. Für Einsatzkräfte der Freiwilligen Feuerwehren haben die Unfallverhütungsvorschriften DGUV Vorschrift 1 *„Grundsätze der Prävention“* und die DGUV Vorschrift 49 *„Feuerwehren“* eine entscheidende Bedeutung. (DGUV e. V. 2019, S. 8)

Die DGUV Vorschrift 49 adressiert dabei die „Betreiber“ der freiwilligen Feuerwehren, also in der Regel die Kommunen, die gemäß den Brandschutzgesetzen der Bundesländer zum Sicherstellen des Brandschutzes und des technischen Hilfsdienstes verpflichtet sind. In Unfallverhütungsvorschriften sind zumeist lediglich übergeordnete Schutzziele definiert, die zunächst wenig detailliert beschrieben werden. Der Detaillierungsgrad erhöht sich in den dazugehörigen DGUV Regeln, die bereits weitergehende Ausführungen dazu enthalten, wie die in den Unfallverhütungsvorschriften festgelegten Schutzziele konkret erreicht werden können. Eine weitere Untersetzung und damit einhergehend in der Regel einen sehr konkreten Praxisbezug stellen DGUV Informationen und die Schriftreihe Fachbereich Aktuell im DGUV Regelwerk dar. Dort werden, oftmals branchenspezifisch bzw. –bezogen exemplarische Lösungen aufgezeigt, wie die in Unfallverhütungsvorschriften beschriebenen Schutzziele in der Praxis erreicht werden können. Hierbei gilt, im Gegensatz zum Vorschriftentext von Unfallverhütungsvorschriften, dass die gleiche Sicherheit auch durch andere Lösungen oder Vorgehensweisen erreicht werden kann.

Für die Einsatzkräfte der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen stellt das Regelwerk der Unfallversicherungsträger und der DGUV eine wichtige Säule zum sicherheitsgerechten Verhalten und dem Gewährleisten des notwendigen Gesundheitsschutzes dar, da wie unter 3.1 bereits beschrieben, das staatliche Arbeitsschutzrecht nahezu keine passgenauen Regelungen für diese Betriebsarten und die damit verbunden, zum Teil sehr spezifischen Tätigkeiten und Gefährdungen beinhaltet.

Da die Schriften des DGUV Regelwerks nach den detaillierten Vorgaben des DGUV Grundsatzes 300-001 *„Fachbereiche und Sachgebiete der DGUV“* (DGUV e. V. 2020a) erstellt werden, die die Beteiligung der interessierten Kreise und, je nach Art der Schrift,

ein öffentliches Stellungnahmeverfahren und bei Unfallverhütungsvorschriften auch die Zustimmung der jeweiligen Aufsichtsbehörden vorsehen, gelten diese als qualitätsgesicherter, anerkannter Stand der Technik.

Bereits im Jahr 2012 hat das Sachgebiet Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen der DGUV e. V. festgestellt, dass die Markteinführung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben die Einsatzkräfte mit neuartigen Fragestellungen konfrontieren würde. Von verschiedenen Seiten wurde ebenfalls der Wunsch an die Unfallversicherung herangebracht, gemeinsame Standards beim Bergen oder Löschen von Elektrofahrzeugen zu erarbeiten, wie Schmid erläutert. (Schmid 2013, S. 30)

Gemeinsam mit Automobilherstellern und Fachverbänden wurde die DGUV Information 205-022 *„Lösch- und Rettungsarbeiten an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben“* (DGUV e. V. 2012) entwickelt, die bis dato eine zentrale Richtschnur für das taktische Vorgehen der Einsatzkräfte der Feuerwehren in Deutschland darstellt. Im Jahr 2025 erfolgte eine umfassende Überarbeitung und Erweiterung, unter anderem in Zusammenarbeit mit allen deutschen Landesfeuerwehrschulen.

Im Jahr 2020 wurde das Fachbereich Aktuell FBHB-024 *„Hinweise für die Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Akkus bei Fahrzeugbränden“* (DGUV e. V. 2023c) veröffentlicht, da die Zahl von Brandereignissen von BEV zunahm und diverse Fragestellungen der Feuerwehren an die Unfallversicherungsträger herangetragen wurden. Im Jahr 2023 wurde diese Schrift inhaltlich aktualisiert.

Aber auch in anderen Sachgebieten der DGUV existieren zahlreiche Publikationen zu Sicherheit und Gesundheit im Zusammenhang mit Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern, die auch für Einsatzkräfte von Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen hilfreich sein können, z. B. die DGUV Information 209-093 *„Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen“* und die dazugehörige FAQ-Liste der AG *„Handlungsrahmen Elektromobilität“* der DGUV (DGUV e. V. 2023a).

3.3 Rettungsdatenblätter der Automobilindustrie

Mit einhergehender Komplexität der Automobiltechnik wurde erkannt, dass die Einsatzkräfte detailliertere Informationen benötigen, um gezielte und rasche Rettungsarbeiten durchführen zu können, wie Göwecke beschreibt. In der Regel sind die dafür notwendigen Informationen inzwischen derart komplex, dass sie sich nicht mehr als ohne Hilfsmittel verfügbares Fachwissen vermitteln lassen. Deshalb musste im zurückliegenden Jahrzehnt das Konzept zur Bereitstellung der notwendigen Einsatzinformationen grundlegend überarbeitet werden (Göwecke 2021, S. 5).

Die Automobilhersteller entwarfen daher Rettungsleitfäden für ihre Typengruppen und stellten diese den Feuerwehren zur Verfügung. Diese Dokumente lieferten zwar wichtige Informationen für Multiplikatoren und Experten der Feuerwehren, die in Ausbildung und Einsatzgrundsätzen benutzt werden konnten. Für den konkreten Einsatzfall sind die oft sehr umfangreichen Rettungsleitfäden aber aufgrund ihrer Komplexität und der fehlenden Möglichkeit der schnellen und sicheren Zuordnung des konkret betroffenen Fahrzeugtyps nur bedingt nützlich (Göwecke 2021, S. 5).

Um den Einsatzkräften im akuten Einsatzfall das schnell benötigte Expertenwissen verfügbar zu machen, wurde in Zusammenarbeit von Feuerwehr, Automobilindustrie und mit Unterstützung des Allgemeinen Deutschen Automobilclubs (ADAC), des Kraftfahrtbundesamtes und zuständiger Ministerien die Möglichkeit der Kennzeichenabfrage und einer, darauf basierenden, verwechselungssicheren Zuordnung eines fahrzeugtypspezifischen Rettungsdatenblattes mit den notwendigen Experteninformationen für die technische Rettung und Brandbekämpfung entwickelt (Göwecke 2021, S. 5).

Der Hauptvorteil der Rettungsdatenblätter liegt darin, Informationen spezifisch für einen Fahrzeugtyp übersichtlich und mit genormten Symbolen darzustellen. So lässt sich durch die Nutzung eines Rettungsdatenblattes Zeit bei der Erkundung einsparen, da sich z. B. die Art des Antriebes zweifelsfrei klären lässt, idealerweise bereits bei der Anfahrt zum Unfallort. Bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben werden von Seiten des Herstellers weitere Informationen für das Vorgehen an diesen Fahrzeugen bereitgestellt, wie zum Beispiel die Lage der Hochvolt-Trennstelle(n) sowie deren Betätigung (Franke 2021).

Eine ideale Ergänzung dazu stellt gemäß Göwecke die Kennzeichenabfrage, möglichst bereits bei der Abfrage des Notrufes 112, dar. Die Leitstelle hat dadurch die Gelegenheit, über eine Datenbankabfrage auf der Rechtsgrundlage des 2013 entsprechend angepassten § 35 (1a) des Straßenverkehrsgesetzes (STVG) über das Kfz-Kennzeichen auf das Rettungsdatenblatt des verunfallten Fahrzeugs zuzugreifen. Dies kann dann Einsatzkräften der Feuerwehr und des Rettungsdienstes bereits auf der Anfahrt zur Einsatzstelle zur Verfügung gestellt werden (Göwecke 2021, S. 6).

Auch im Nutzfahrzeugbereich setzt sich das Konzept der Rettungsdatenblätter immer stärker durch. So sind neben dem herkömmlichen Verbrennungsmotor zunehmend Busse und LKW mit alternativen Energieträgern wie z. B. Gas-, Batterie- und Brennstoffzellenantrieben anzutreffen. Insbesondere Material, Gewichte und konstruktive Eigenschaften können zum Teil erheblich von PKWs abweichen (EvoBus GmbH 2020).

Das Zurverfügungstellen der notwendigen Informationen zum Umgang mit Fahrzeugen, z. B. bei Lösch-, Rettungs- und Bergearbeiten durch die Hersteller, ist auch zukünftig ein elementarer Bestandteil für erfolgreiche und sichere Einsatzmaßnahmen der Einsatzkräfte.

3.4 Schriften von Verbänden

Auch diverse Fachverbände haben erkannt, dass das Bereitstellen von Fachinformationen für Einsatzkräfte notwendig ist z. B., um Ausbildungsveranstaltungen durchführen zu können und richtige Einsatzmaßnahmen zu ergreifen. Im Jahr 2012 veröffentlichte die Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb) bereits ein Merkblatt zum Thema *„Einsätze an KFZ mit alternativen Antriebsarten und -kraftstoffen“* (Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. 2012).

Mit dem vermehrten Aufkommen von, mit verflüssigtem Erdgas (LNG) getriebenen, Nutzfahrzeugen folgte im Jahr 2021 die FAQ-Liste *„Unfallhilfe und Bergung bei LNG-Fahrzeugen“* (Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. 2021b).

Von Seiten der Gremien der deutschen Feuerwehren wurde im Jahr 2021 eine Empfehlung der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF) und des Deutschen Feuerwehrverbandes (DFV) mit dem Titel *„Brandbekämpfung von Kraftfahrzeugen mit elektrischen Antrieben“*, die bereits im Jahr 2007 erstmals erschien, umfassend aktualisiert. Die Schrift veranschaulicht sehr praxisbezogen, welche Einsatzmaßnahmen ergriffen werden können (AGBF Bund 2021).

Einige Kernaussagen darin fanden auch Eingang in die Tagespresse und trugen dazu bei, die zum Teil sehr emotional geführte Diskussion zu versachlichen. So wurde Peter Bachmeier, leitender Branddirektor bei der Feuerwehr München und Vorsitzender des Fachausschusses „Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz“ der AGBF, wie folgt zitiert:

„Es ist sogar so, dass die herkömmlichen und somit bekannten Vorgehensweisen bei Brandeinsätzen grundsätzlich auch für Brände von Lithium-Ionen-Speichermedien geeignet sind.“ (Im Elektroauto-Höllenfeuer 2021).

Aber auch von Seiten der Automobilindustrie wurde erkannt, dass Veröffentlichungen, adressiert z. B. an Einsatzkräfte, dazu beitragen, Unsicherheiten zu beseitigen und Einsatzmaßnahmen zu erleichtern und zu vereinheitlichen. Die Verbände VDA und VDIK haben daher zum Beispiel die im VDA Arbeitskreis „Retten“ erarbeitete Schrift *„Techni-*

sche Quarantäneflächen für beschädigte Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien“ veröffentlicht (Verband der deutschen Automobilindustrie e.V., Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller e.V. 2022).

Vergleichbare Entwicklungen sind vorwiegend im deutschsprachigen Ausland zu beobachten. In der Schweiz gehört der Leitfaden für das „Bergen, Transportieren, Verahren und Entsorgen von Fahrzeugen mit Elektroantrieb“ (ASS Auto-Strassenhilfen Schweiz 2021) zum fachgerechten Arbeiten wie auch in Österreich die Information E-20 „Einsatz mit alternativ angetriebenen Fahrzeugen und deren Peripherie“ des österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020).

Auf die Inhalte der in diesem Abschnitt erwähnten Schriften wird zum Teil noch eingegangen.

Im Bereich baulicher Brandschutz bestehen eine Vielzahl von verbandlichen Empfehlungen und Veröffentlichungen, insbesondere von Seiten der Sachversicherer, z. B. des Verbandes der Sachversicherer.

So erfreulich die Vielzahl von Schriften zu dem Thema ist, soll nicht unerwähnt bleiben, dass gerade widersprüchliche oder abweichende Aussagen dazu zu Kritik führen können. Schwindl hat die von ihr identifizierten Abweichungen für bauliche Anforderungen / Empfehlungen im Bereich der Brandschutzanforderungen in Garagen für Elektrofahrzeuge anschaulich zusammengefasst, siehe Tabelle 3 (Schwindl 2021).

Tabelle 3: Vergleich der Veröffentlichungen zum Brandschutz

	Anforderung an Bauteile	Brandmeldeanlage	Be/Entlüftung	Sprinkleranlage	Feuerlöscher	Löschmittel
VdS 3103	ja	ja	nein	empfohlen	In der Produktion	geeignet
VdS 2259	ja	empfohlen	ja	nein	ja	Keine Angabe
VdS 3471	nein	empfohlen im Gewerbe	empfohlen	nein	ja	ABC-Pulver, CO ₂
VdS 3856		nein	nein	ja	nein	Wasser
FBFHB-018 DGUV	Nur wenn gemäß TRGS 510 gefordert				Von Feuerlöschern wird abgeraten	
FBFHB-024 DGUV	nein	nein	nein	nein	Von Feuerlöschern wird abgeraten Wasser	

modifiziert nach (Schwindl, 2021)

Auf bauliche Brandschutzanforderungen im Zusammenhang mit Fahrzeugen mit alternativen Antrieben wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen, bzw. nur dann, wenn ein unmittelbarer Zusammenhang mit der Sicherheit von Einsatzkräften besteht.

3.5 Internationale Regelwerke / Handlungshilfen

Neben den bereits in 3.4 erwähnten Schriften aus Österreich und der Schweiz bestehen vergleichbare Regelwerke und Informationen in vielen Ländern. So z. B. in Frankreich das „*Feuerwehr-Handbuch: Einsätze an Fahrzeugen*“ (Delaunay und Cardou 2020), das eine Handlungshilfe beim Einsatz an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern darstellt.

Auch in den Niederlanden stehen allgemein gültige Vorgehensweisen, basierend auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und praktischen Einsatzerfahrungen zur Verfügung, wie von Weewer im Rahmen der *Fire in Vehicles* (FIVE) Konferenz 2020 vorgestellt wurde (Weewer R., Rosmuller N., Molenaar J.).

Im nordamerikanischen Raum sind die Schriften der *National Fire Protection Association* (NFPA) maßgeblich. Diese finden jedoch auch international erhebliche Beachtung. Exemplarisch sollen hier die bereits im Jahr 2013 begonnenen, jeweils mehrteiligen Schriftenreihen „*Electric/Hybrid Vehicle Safety Training for Emergency Responders*“ (National Fire Protection Association 2013a) und „*Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results*“ (National Fire Protection Association 2013b) genannt werden.

Beide umfassen umfangreiche Informationen, Handlungsanleitungen und auch Ausbildungsanweisungen für Einsatzkräfte.

Darüber hinaus existieren in den Vereinigten Staaten von Amerika noch weitere Empfehlungen von Behörden, so z. B. der Bericht „*Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles* des *National Transportation Safety Boards*“ (National Transportation Safety Board 2020).

Dieser Bericht befasst sich auch mit der Qualität bereits existenter Handlungsleitfäden in englischer Sprache und kommt dabei unter anderem zu dem Schluss, dass keine der untersuchten Schriften Informationen dazu enthält, wie Einsatzkräfte sich vor Gefährdungen schützen sollen, die von in den Hochvolt-Batterien gespeicherter elektrischer Energie ausgehen können (National Transportation Safety Board 2020).

In Schweden wurde im Jahr 2024 das umfassende Dokument „*Rescue operation where lithium ion batteries are present*“ veröffentlicht, das als Handlungshilfe für Einsatzkräfte dient und relativ konkrete und praxisbezogene Hinweise enthält (The Swedish Agency for Community Protection and Preparedness (MSB) 2024).

Neben klassischen Schriften und Regelwerken existieren mittlerweile eine Vielzahl an, im Internet verfügbaren, Lehrfilmen und Multimedia-Anwendungen, die zur Informationsgewinnung oder zu Ausbildungs- und Schulungszwecken verwendet werden können. Hierbei ist zu beachten, dass die Qualität stark unterschiedlich ist und auch oft auf den ersten Blick nicht erkennbar ist, ob eventuell kommerzielle Interessen (z. B. Werbung für Produkte) das bestimmende Motiv der Erstellung sind.

Ein Beispiel für ein fachlich gutes und neutrales Lehrvideo ist „*Battery fires, knowledge for Fire Brigades*“¹, welches im Jahr 2022 in Schweden veröffentlicht wurde (Per Ola Malmquist 2022).

Auch hier werden Teile der Inhalte im weiteren Verlauf der Arbeit noch aufgegriffen. Bereits jetzt kann jedoch festgestellt werden, dass ein Großteil der betrachteten, internationalen Regelwerke und Handlungsanleitungen oft auf Grundlage der gleichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen, zum Teil untermauert durch praktische Experimente, erstellt wurden.

¹ https://www.youtube.com/watch?v=m5Yf6E6_vEY

4. Verbreitungsgrad von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben

4.1 Arten und Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge mit alternativen Antrieben

In absoluten Zahlen haben Fahrzeuge mit alternativen Energieträgern nach wie vor einen geringen Verbreitungsgrad im Vergleich zum gesamten, in Deutschland vorhandenen, Fahrzeugbestand, siehe hierzu Tabelle 4.

Tabelle 4: Bestand an Kraftfahrzeugen und deren Energieträger am 1. Juli 2024

	Krad	PKW	Bus	LKW
Benzin	5.022.199	30.173.317	100	174.609
Diesel	4.764	14.059.042	75.584	3.507.475
Gas gesamt	92	383.488	741	37.492
BEV	59.155	1.528.150	3.034	87.122
Hybrid	1.769	3.234.026	6.626	3.680
Plug-In Hybrid	8	947.720	75	501

(Kraftfahrtbundesamt 2024)

Gemäß einer Übersicht der DAT GmbH erreichten die rein batteriebetriebenen Pkw bei den Neuzulassungen im Jahr 2021 einen Marktanteil von 6,7% in Deutschland. Rund die Hälfte davon waren Privatfahrzeuge (Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT) 10.02.2021).

Im Gegensatz dazu ist die Anzahl an Brennstoffzellen-Fahrzeugen bei Pkw gemäß Hebling *et al.* in Deutschland sehr gering (wenige hundert). Das Fahrzeugangebot beschränkt sich auf wenige Modelle (Hebling und M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle, A. Held, M. Jahn, N. Müller).

Bereits im Jahr 2009 prognostizierte das Bundesministerium für Verkehr 7 bis 10,5 Millionen Elektrofahrzeuge, 1,4 Millionen Brennstoffzellenfahrzeuge und 400.000 Nutzfahrzeuge für das Jahr 2030 (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2019). Dieser Ausblick wurde im Jahr 2019 durch die damalige Bundesregierung in ihren Eckpunkten für das Klimaschutzprogramm wiederholt (Braun 2019).

Rückblickend müssen diese Schätzungen als deutlich zu optimistisch bezeichnet werden. Auch bei der folgenden Prognose bleibt abzuwarten, ob die Entwicklungen hierzu entsprechend verlaufen.

Gemäß dem VDE waren im Jahr 2023 weltweit rund 42 Millionen Elektrofahrzeuge registriert. Bis zum Jahr 2030 erwartet der VDE einen Anstieg auf bis zu 150 Millionen Elektrofahrzeuge weltweit (VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. 2023, S. 7).

Dass bereits jetzt weltweit ein stetiger Anstieg beim Verkauf von Elektrofahrzeugen zu beobachten ist, haben Sun *et al.* beschrieben. Demnach überstieg im Jahr 2017 das Volumen der neu verkauften Elektrofahrzeuge weltweit bereits eine Million Einheiten pro Jahr. Er beobachtet auch, dass der Anteil reiner Elektrofahrzeuge gegenüber Hybridlösungen immer mehr zunimmt und daher seiner Einschätzung nach zukünftig dominieren wird (Sun *et al.* 2020, S. 1363).

Dies hängt nach der Einschätzung von Sun *et al.* auch von Förderungen und Kaufanreizen ab: So ist die Europäische Union einer der Vorreiter bei der Förderung des Elektrofahrzeugmarktes. In Norwegen betrug beispielsweise der Marktanteil von Elektrofahrzeugen an den Neuwagenverkäufen im Jahr 2017 34,7 % und 52 %, wenn Hybridfahrzeuge mit einbezogen werden. Neben Steuererleichterungen und staatlichen Zuschüssen gehören auch die Einrichtungen von eigenen Spuren für Elektrofahrzeuge zum Maßnahmenpaket (Sun *et al.* 2020, S. 1366).

Aber auch in China bestehen gemäß Sun *et al.* seit 2009 Subventionsregelungen für den Kauf von Elektrofahrzeugen. Sie sind Teil des *Electric Vehicle Subsidy Scheme of China*, welches im Jahr 2013 aktualisiert wurde, um die Qualität und Sicherheit von Elektrofahrzeugen zu verbessern. Auch aufgrund der bestehenden Förderprogramme gehen Sun *et al.* davon aus, dass in China bis zum Jahr 2040 bis zu 200 Millionen Elektrofahrzeuge mit einem Marktanteil von 60 % am gesamten Pkw-Absatz des Landes registriert sein könnten (Sun *et al.* 2020, S. 1367). Diese Schätzung geht also noch deutlich über die bereits erwähnte Prognose des VDA hinaus.

Die Entwicklung bei Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen gewinnt ebenfalls an Dynamik, wenn auch in deutlich geringeren absoluten Zahlen als der Elektrofahrzeugmarkt, wie Sun und Li am Beispiel des chinesischen Marktes aufzeigen: gemäß der *China Association of Automobile Manufacturers (CAAM)* stieg die jährliche Produktion von Brennstoffzellenfahrzeugen in China deutlich an, von unter 700 im Jahr 2016 auf rund 2.800 im Jahr 2019. Ende 2019 gab es 6178 Brennstoffzellenfahrzeuge in ganz China, und die Zahl wird für Ende 2020 mit 10.000 angegeben. Gemäß dem „*Blue Book of Development of China Hydrogen Industries and Infrastructures*“ werden bis zum Jahr 2030 zwei Millionen Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge in China erwartet (Sun und Li 2021, S. 37680).

Die Entwicklung der letzten Jahre macht sehr deutlich, dass der Marktanteil an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern weiterhin deutlich steigen wird. Auch der Nutzfahrzeugbereich wird dieser Entwicklung folgen (müssen). So erwartete das Fraunhofer

Institut für System- und Innovationsforschung bereits im Jahr 2018, dass für die Verbreitung der Elektromobilität neben Pkw auch das Angebot von Nutzfahrzeugen wie Busse und Lkw, aber auch z. B. Züge deutlich zunehmen muss (Thielmann 2018, S. 21). Auch die Bundesregierung hat in ihrem Klimaschutzprogramm erklärt, die Anschaffung von Lkw mit alternativen Energieträgern zu fördern. Ziel ist es demnach, im Jahr 2030 rund 30 % der gefahrenen Kilometer im Lkw-Güterverkehr elektrisch oder auf Basis klimaneutraler Energieträger zu erbringen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2019).

4.2 Vorhandene Lade- und Tankinfrastruktur

Der Verbreitungsgrad und auch die Akzeptanz zur Nutzung von Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern hängen stark mit der Verfügbarkeit von Lade- und Tankinfrastrukturen zusammen. Daher hat die deutsche Bundesregierung 2019 in ihrem Klimaschutzprogramm formuliert, dass die öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur mit Hilfe von Förderprogrammen deutlich erweitert wird und im gesamten Bundesgebiet bis 2030 rund eine Million Ladepunkte nutzbar sein sollen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2019).

Betrachtet man die Daten zu momentan vorhandenen Ladepunkten, ist hier zwar ein positiver Trend erkennbar, die Zielmarke jedoch weiterhin ambitioniert. Laut dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) standen im August 2019 in Deutschland 20.650 öffentlich zugängliche Ladepunkte zur Verfügung (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2019).

Im Jahr 2024 waren es bereits 160.000 Ladepunkte, wie die Internationale Energieagentur berichtet (International Energy Agency (IEA) 2025). Um die geplante Anzahl im Jahr 2030 zu erreichen, sind also weiterhin große Anstrengungen notwendig.

Auch die Automobilindustrie hat erkannt, dass der Absatz von Elektrofahrzeugen stark mit der Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten zusammenhängt. Gemäß dem Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung ist von Seiten der Industrie geplant, bis zum Jahr 2030 rund 100.000 Ladepunkte auf Betriebsgeländen und in öffentlich zugänglichen Bereichen, z. B. Parkplätzen im Einzelhandel zu errichten. Gleichzeitig sollen Hilfen angeboten werden, um die Anzahl privater Ladepunkte zu steigern (Bundesregierung 2019). Es kann festgestellt werden, dass der Ausbau der Elektroladeinfrastruktur sowohl im politischen Fokus liegt als auch im Interesse der Wirtschaft steht. Infrastrukturen zur

Versorgung mit anderen alternativen Energieträgern finden momentan weit weniger Verbreitung, auch der Ausbau scheint momentan weniger ambitioniert vorangetrieben zu werden. So existierten im Juni 2019 gemäß einem Bericht des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur bundesweit lediglich 71 öffentliche Wasserstoff-Tankstellen. Ferner geht das Ministerium in seiner Einschätzung davon aus, dass ein Teil der Wasserstoff-Tankstellen auch für das Betanken von LKW geeignet sein muss (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2019).

Bei Erdgastankmöglichkeiten ist sogar eine Verschlechterung zu beobachten: gemäß einer Erfassung der Statista GmbH nimmt die Anzahl an Tankstellen, die komprimiertes Erdgas (CNG) anbieten seit dem Jahr 2016 ab. Sie lag im Jahr 2022 mit 824 erneut unter dem Vorjahreswert (Statista GmbH 2023).

Die Zahl der Tankstellen, die komprimiertes Flüssiggas (LPG) vertreiben, betrug einer Auswertung der Deutschen Energie-Agentur (dena) zufolge im Jahr 2018 6.382 (2017: 6.600). Auch hier sind die Zahlen also eher rückläufig (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2019).

Ebenfalls äußerst gering sind die Tankmöglichkeiten für tiefkalt verflüssigtes Methan (LNG). Die Firma Barmalgas benennt auf ihrer Homepage² die Zahl von rund 150 bundesweit existierenden LNG-Tankstellen im Jahr 2020 und prognostiziert bis zu 200 Tankstellen für das Jahr 2025. Dabei wird allerdings nicht unterschieden, ob es sich um öffentlich zugängliche Tankstellen oder reine betriebliche Einrichtungen handelt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass insbesondere das elektrische Ladepunktenetz auch in den kommenden Jahren eine erhebliche Erweiterung erfahren wird. Dies betrifft den privaten, den öffentlichen, aber auch den gewerblichen Bereich. Es ist zu erwarten, dass insbesondere die Wasserstoff- und LNG-Logistik bzw. die damit verbundene Infrastruktur mittel- bis langfristig ebenfalls in großem Umfang erweitert bzw. neu errichtet werden wird, wenn die gesetzten Klimaziele erreicht werden sollen.

² <https://barmalgas.de/lng/lng-tankstellen-netz/>

5. Alternative Energieträger im Fahrzeugbau – Überblick

5.1 Elektrische Speichersysteme

Bereits im Jahr 2013 stellte Schmid in Aussicht, dass davon auszugehen ist, dass die Verbrennungsmotoren durch elektrische Antriebe ersetzt werden (Schmid 2013, S. 26).

Grundlage für die zu beobachtende Verbreitung von Elektrofahrzeugen ist die Verfügbarkeit von leistungsfähigen Speichersystemen, die es ermöglichen, große Mengen an Energie mit hoher Leistungsdichte zu speichern. Dabei ist es wichtig, dass die Bauart so kompakt bleibt, dass eine sinnvolle Implementierung im Fahrzeug möglich ist.

5.1.1 Funktionsprinzip / Bauarten

Eine anschauliche und kompakte Erläuterung hat die Allianz Risk Consulting zum Prinzip einer Batterie wie folgt gegeben: Eine elektrische Batterie ist ein Gerät, das aus einer oder mehreren elektrochemischen Zellen mit externen Anschlüssen besteht, um elektrische Geräte zu betreiben. Sie kann eine oder mehrere Zellen enthalten, die chemische Energie in elektrische Energie umwandeln. Im Gegensatz zu primären LIB gehören sekundäre LIB zur Familie der wiederaufladbaren Batterietypen, bei denen sich die Lithium-Ionen beim Entladen von der negativen Elektrode zur positiven Elektrode und beim Laden wieder zurückbewegen. Sie sind heute die am weitesten verbreitete Art von wiederaufladbaren Batterien und werden häufig in der Unterhaltungselektronik, der mobilen Elektronik, in medizinischen und industriellen Anwendungen eingesetzt. Neben der Unterhaltungselektronik werden LIB auch in Militär- und Elektrofahrzeugen sowie in der Luft- und Raumfahrt und in der Schifffahrt immer beliebter (Allianz Risk Consulting North America 2017).

Gemäß Blum und Long sind in einer Li-Ionen-Zelle Anode und Kathode durch einen porösen Film (Separator) getrennt. Ein Elektrolyt, der aus einem oder einer Kombination von organischen Lösungsmitteln und darin gelöstem Lithiumsalz (oft Lithiumhexafluorophosphat) besteht, ist das Medium für den Lithium-Ionen-Transport. Blum beschreibt die typischen Bauformen von Lithium-Ionen-Zellen wie folgt:

- Prismatische Zellen werden durch Stapeln von abwechselnden Schichten aus Elektroden, oft eingelagert in Kunststoffummantelungen, hergestellt.
- Pouch-Zellen sind ebenfalls gestapelte Schichten aus Elektroden, die jedoch von einer flexiblen Kunststoff- oder beschichteten Aluminiumfolie eingefasst sind.
- Zylindrische Zellen entstehen durch Aufwickeln langer Streifen von Elektroden zu einer zylindrischen Form (Blum und Long 2015).

Wie Bisschop *et al.* anschaulich beschreiben, verhindert der Separator, dass die positive und die negative Elektrode miteinander in Kontakt kommen, stellt aber parallel dazu sicher, dass die Ionen hindurchgelangen können. Der Separator hat jedoch eine wichtige Sicherheitsfunktion, da es zu einem Kurzschluss kommen kann, wenn der Separator durchdrungen wird oder schrumpft. Separatoren bestehen häufig aus Polyethylen oder Polypropylen, mit einem Schmelzpunkt von 125-130 °C bzw. 155-160 °C. Versagt der Separator bzw. schmilzt dieser, kommt es zu einem internen Kurzschluss, der eine starke Wärmefreisetzung bewirken kann. Dies führt häufig zu stark exothermen chemischen Reaktionen und der Freisetzung großer Gasvolumina, die spontan und heftig aus der Zelle austreten können (Bisschop *et al.* 2019).

Das Formieren neuer LIB trägt auch zur Sicherheit und Stabilität der LIB bei, wie Wang *et al.* beschreiben. Ihren Ausführungen nach bildet sich dabei eine sogenannte *solid electrolyte interphase* (SEI) aus Abbauprodukten der Elektrolyte, die sich auf die Elektrode legt und dort wie eine Schutzschicht wirkt (Wang *et al.* 2018).

Eine Vielzahl von Sicherheitsmechanismen können gemäß Blum *et al.* auch in die mechanische Konstruktion einer Zelle einbezogen werden, wie Unterbrechungsvorrichtungen und Schalter mit positivem Temperaturkoeffizienten (Blum und R. Thomas Long Jr. 2016).

5.1.2 Historie

Auch wenn die Markteinführung von BEV gerne als technologische Neuerung bezeichnet wird, muss festgestellt werden, dass das Konzept der Elektrofahrzeuge bei weitem nicht neu ist.

Die wesentlichen Vorteile von batterieelektrischen Fahrzeugen gegenüber konventionellen Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren beschreibt Bergholz im Wesentlichen mit der erhöhten Effizienz in Kombination mit weniger Emissionen. Auch deswegen konnten im 20. Jahrhundert (1900, 1992 und 1996) mehrere Versuche beobachtet werden, BEVs zu etablieren. Dies scheiterte zunächst, hauptsächlich aufgrund der geringen Reichweite der BEV, im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen (Bergholz 2015).

Wie Dhameja zusammenfasst, waren um die Jahrhundertwende 1900 mehr als doppelt so viele Elektro- wie Benzinautos auf den Straßen anzutreffen. Als mögliche Begründung führt Dhameja an, dass Elektrofahrzeuge einfacher in der Bedienung als die Fahrzeuge mit dem kompliziert zu startenden Benzinmotor waren. Jedoch führten das hohe Gewicht, die lange Aufladezeit und die begrenzte Haltbarkeit der Batterien dazu, dass sich Verbrennungsmotoren schnell durchsetzten. Insbesondere der günstige Preis von Benzin,

dessen deutlich höherer Energiegehalt im Vergleich zu den damaligen Batterien und der schnelle Tankvorgang führte dazu, dass das Elektroauto bis 1920 praktisch wieder verschwunden war (Dhameja 2001, S. 2).

Erst die Verfügbarkeit von leistungsfähigen Energiespeichermöglichkeiten in Form von Lithium-Ionen-Akkumulatoren führt dazu, dass das Konzept der Elektrofahrzeuge wiederaufgenommen wurde. Wie Dhameja berichtet, gelang die Entwicklung der LIB in den 1960er- und 1970er-Jahren rasch. Einem ersten Verkauf der LIB durch Sony Energytec, Inc. im Jahr 1991 folgten erhebliche Entwicklungsaktivitäten (Dhameja 2001, S. 11–12). Die wichtigsten Merkmale der Zellchemie von LIB sind laut Jeevarajan die höchste Energiedichte unter den wiederaufladbaren Batteriesystemen, keinen Memory-Effekt, eine lange Zyklus- und Kalenderlebensdauer und eine gute Ratenfähigkeit (Jeevarajan 2020). Bereits im Jahr 2008 stellten Armand und Tarascon fest, dass Nickel-Metallhydrid-Batterien eher für den Betrieb von Hybridfahrzeugen und preiswerterer Elektronik verwendet werden, während LIB die Spitzenelektronik erobert haben und jetzt auch in Elektrowerkzeugen eingesetzt werden. LIB drängen auch auf den Markt für Hybrid-Elektrofahrzeuge und sind ein ernsthafter Kandidat für den Antrieb der Elektroautos der Zukunft (Armand und Tarascon 2008, S. 652).

5.1.3 Eigenschaften

Wie Lönnermark und Ingason zusammenfassen, sind es LIB, die im weit überwiegenden Teil in tragbaren, batteriebetriebenen Verbraucherprodukten aber auch in elektrifizierten Fahrzeugen, im Stromnetz und in Schiffen eingesetzt werden. Als Gründe führen sie die Eigenschaften in Form von Leistungs- und Energiedichte, langer Lebensdauer, schneller Aufladbarkeit und fehlendem Memory-Effekt an, erwähnen jedoch auch einige sicherheitstechnische Nachteile, die im Vergleich zu anderen Batterietechnologien erheblichen Aufwand erfordern, um ein akzeptables Sicherheitsniveau zu erreichen. Die hohe Energiedichte von LIB kann bei einem Defekt oder einer äußeren Einwirkung zu Kurzschlussbildung mit hoher Wärmefreisetzung führen, die in der Regel zur Freisetzung und oft auch zur Entzündung des Elektrolyten führt. Lade- und Entladestrom sowie Spannungs- und Temperaturbereich müssen daher überwacht und reguliert werden. Dies geschieht zumeist durch ein prozessorgesteuertes Batteriemanagementsystem. Darüber hinaus müssen die Lithium-Ionen-Zellen vor physischen Schäden (z. B. Intrusion und starker Verformung) und vor Kurzschlüssen geschützt werden. Im Falle eines schweren Fehlers kann die Li-Ionen-Zelle thermisch durchgehen, was eine schnelle exotherme Kettenreaktion bedeutet, die zu einem schnellen Temperaturanstieg, Bildung brennbarer Gase, Feuer und in weiterer Folge bis hin zu einer Explosion führen kann. Außerdem sind die aus der Zelle freigesetzten Gase giftig (Lönnermark und Ingason 5-6, 2016, S. 249).

Dieses thermische Durchgehen wird in der Regel *thermal runaway* genannt, einen Effekt, den di Bari *et al.* wie folgt beschreiben: LIB bestehen aus einer Vielzahl einzelner, miteinander verbundener Zellen, die in Module und Pakete gegliedert sein können. Ohne wirksame Kapselung breitet sich der durch einen Kurzschluss in einer Zelle entstehende Brand von Zelle zu Zelle aus, indem die entstehende Wärme über die Außenwände und andere Verbindungen der Zellen untereinander übertragen wird. Wenn die benachbarten Zellen eine ausreichend hohe Temperatur erreicht haben, verursacht diese eine Kettenreaktion, die eine weitere Ausbreitung verursacht, da die hohe Temperatur exotherme chemische und physikalische Prozesse bewirken, die auf Zellebene nicht mehr umkehrbar sind.

Es ist daher unbedingt erforderlich, so viele Zellen wie möglich zu kühlen, um die Ausbreitung eines thermischen Durchgehens zu verhindern (Di Bari 2020).

Thermal Runaway bedeutet also, dass die gespeicherte Energie einer Lithium-Ionen-Zelle in sehr kurzer Zeit unkontrolliert freigesetzt und auf benachbarte Zellen übertragen wird. Dinkov *et al.* beschreiben, dass der verwendete Materialmix, die enorme Energiedichte und die zu beobachtende Wärmeentwicklung von mehr als 1.000 °C auf der Oberfläche der Zelle dazu führen, dass der Defekt einer Zelle und die damit verbundene Energiefreisetzung bereits ausreichen können, um die ganze Batterie in Brand zu setzen. Dabei kommt es zu Zersetzungen in den Zellen, Überdruckbildung und als Folge dessen zum Öffnen der Zelle und dem Abblasen der entstandenen Gase und Stäube nach außen. Dieses meist weiß-gräuliche Rauch-Gas-Gemisch wird Ventinggas genannt und besteht hauptsächlich aus verdampftem Elektrolyten, dessen Reaktionsprodukten und weiteren Zellbestandteilen. Das Gas ist hochentzündlich und kann eine Knallgasexplosion, eine Stichflamme und Feuer verursachen. Der *thermal runaway* tritt oft bei mechanisch beschädigten (z. B. durch ein Unfallereignis) oder nicht mehr betriebssicheren (z. B. durch ein fehlerhaftes Batteriemanagementsystem) Lithium-Ionen-Batterien auf (Dinkov et al. 2022).

Golubkov *et al.* beschrieben bereits 2014, dass die LIB vor und während des *thermal runaway* erhebliche Gasmengen emittieren, die freigesetzte Menge allerdings von der Zellchemie abhängig ist. Bei seinen Untersuchungen wurden die höchsten Gasmengen von einer LCO/NMC-Zelle freigesetzt, gefolgt von einer NMC-Zelle. LFP-Zellen lieferten die geringste Gasmenge (Golubkov et al. 2014, S. 3638).

Die Neigung zum *thermal runaway* ist auch abhängig vom Ladezustand der Zellen bzw. der gesamten LIB. So beschreiben z. B. Amano *et al.*, dass bei ihren Untersuchungen Zellen mit einem Ladezustand (SOC) von ≤ 50 % eine geringe Tendenz zum thermischen Durchgehen aufwiesen. Darüber hinaus generierten die geprüften Zellen bei höheren

SOC-Werten und Kapazitäten auch höhere Drücke im Reaktionsbehälter. Die Anzahl der aus den LIB freigesetzten Gas- und Teilchenmenge und folglich der Massenverlust waren im Bereich von 90-100 % SOC am höchsten. Amano *et al.* kommen daher zu dem Schluss, dass das pro Zellkapazität freigesetzte Gasvolumen eindeutig SOC-abhängig ist (Amano *et al.* 2022).

Eine einfache, aber übersichtliche schematische Darstellung der DGUV zum Brand- und Reaktionsverhalten von LIB ist in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Brandverhalten von Lithium-Ionen-Batterien (DGUV e. V. 2020b)

Eine gute Zusammenfassung der Zusammenhänge zwischen *Thermal Runway* und der Entstehung eines Brandes liefern Feng *et al.* wie folgt: Der Innendruck der Batteriezelle steigt, wenn die Temperatur den Siedepunkt einer der Komponenten in den Lösungsmitteln überschreitet, z. B. durch einen Kurzschluss der Zelle. Das Volumen der Batteriezelle nimmt zu, bevor das Gas entweicht. Beim *Thermal Runway* wird so viel Wärme erzeugt, dass dies das Öffnen der Zelle bewirkt. Bei der darauffolgenden Hochgeschwindigkeitsentlüftung wird so viel Energie frei, dass die brennbaren Ventinggasen entzündet werden können. Dies ist die Hauptursache für Rauch, Feuer und Explosionen bei LIB. Feng *et al.* stellen klar, dass der von der Kathode freigesetzte Sauerstoff für die vollständige Verbrennung der entflammenden Elektrolyte nicht ausreicht; daher kommt es während des *thermal runways* meist nicht zu einer Zündung der Ventinggasen innerhalb der Batterie (Feng *et al.* 2020, S. 749).

Zurzeit werden Kobalt-haltige Kathoden am häufigsten eingesetzt, wie der VDE beschreibt. Die Verbindung Lithium-Nickel-Cobalt stellt hierbei eine stabile Verbindung dar, die gleichzeitig eine gute Energie- und Leistungsbilanz aufweist. Die Energiedichte ist mit dem Nickel-Anteil direkt proportional, jedoch sinkt die Ladezyklenfestigkeit mit steigendem Nickelgehalt (VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. 2023, S. 8).

5.1.4 Herstellung und Logistik

Wie Liaw *et al.* anschaulich beschreiben, ist die Produktion von Lithium-Ionen-Zellen nicht trivial. Die Herstellung besteht aus vielen Schritten, wie z. B. der Materialvorbereitung, die sicherstellen muss, dass die Zusammensetzung, die Partikelgröße und die Mischungsverhältnisse der Komponenten korrekt sind. Danach folgen Tätigkeiten wie das Mischen der Aufschlämmung, die Beschichtung, das Pressen und Trocknen, um Elektroden in der gewünschten Konfiguration zu erhalten. Im Anschluss erfolgt die Zellmontage, die durch eine Reihe von Schritten wie Zuschnitt, Assemblierung, Elektrolytbefüllung, Entgasung, Versiegelung, Zellbildung, Alterung und Endkontrolle gekennzeichnet ist. Ganz entscheidend ist dabei eine wirksame und stetige Qualitätskontrolle, um mögliche Fehler im Herstellungsprozess zu vermeiden, z. B. Verunreinigungen durch Fremdpartikel, falsche Ausrichtung von Elektrode und Separator, Schweißfehler, unzureichende Feuchtigkeitskontrolle, Gratbildung, Ausfransen der Kanten, Blasenbildung, ungleichmäßige Verteilung des Elektrolyten in den Elektroden etc. Liaw *et al.* betonen, dass die Qualitätskontrollen, die mit dem Prozess verbunden sind, sehr anspruchsvoll sind, um qualitativ hochwertige und damit auch sichere Zellen zu erhalten (Bor Yann Liaw, FuQing Wang, YiMin Wei 2018).

Die so erzeugten Rund-, Pouch- oder prismatischen Zellen können dann in größere Einheiten, z. B. zu Modulen, zusammengefasst werden. Die Module wiederum werden je nach Bedarf zu den eigentlichen Energiespeichersystemen kombiniert.

Wie der VDE in einem Bericht feststellt, ist aktuell ein Wissensvorsprung asiatischer Hersteller bei der Entwicklung von LIB vor deutschen Zellherstellern erkennbar. Um dem entgegenzuwirken, investieren Bund, Länder und Unternehmen erheblich in den Aufbau von Wissen und Fähigkeiten für eine eigenständige Zellherstellung in Europa und Deutschland, um eine ausreichend wirtschaftliche und leistungsfähige Produktion zu ermöglichen (VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. 2023, S. 10).

Auch die EU hat gemäß dem VDE erkannt, dass eine wettbewerbsfähige Batteriezellfertigung in Europa essenziell ist, auch um die damit verbundene Wertschöpfungskette in Europa zu halten. Ende 2019 wurde daher beschlossen, rund 3,2 Milliarden Euro Fördermittel zu diesem Zweck bereitzustellen. Damit sollen zum einen Zellfertigungen für den Automotive- und auch andere Bereiche, zum anderen aber auch die Entwicklung geeigneter Wiederaufbereitungsverfahren gefördert werden (VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. 2023, S. 10).

Bereits jetzt lässt sich eine enorme globale Zunahme von Produktionskapazitäten seit 2016 beobachten, wie Thielmann berichtet. Bis zum Jahr 2016 wurden ca. 15 GWh an

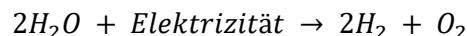
Produktionskapazität jährlich neu geschaffen. Inzwischen geht man davon aus, dass allein asiatische Produzenten bis zu 100 GWh neue Produktionskapazitäten pro Jahr zusätzlich schaffen (Thielmann 2018, S. 8).

Dies spiegelt sich auch bei den innerdeutschen Entwicklungen zum Einsatz von LIB wider, wie Schulte-Brader ausführt: Im Jahr 2020 wurden rund 2.253 Tonnen Lithium-Metall-Batterien in Deutschland in den Verkehr gebracht, im Jahr 2013 betrug die Menge noch ein Drittel davon. Bei den LIB verdoppelte sich die Menge zwischen 2013 und 2020 auf 14.000 Tonnen (Schulte-Brader 2022).

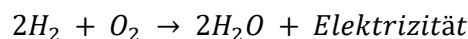
5.2 Wasserstoff (H₂)

5.2.1 Historie

Wasserstoff kann momentan in zwei denkbaren Nutzungen in der Antriebstechnologie eingesetzt werden: zum einen mittels direkter Verbrennung im Antriebsmotor und zum anderen als Energiequelle einer Brennstoffzelle. Wie Dhameja beschreibt, datiert die erste Entwicklung einer Brennstoffzelle bzw. deren prinzipielle Funktionsweise durch Sir William Graves aus dem Jahr 1839. Graves machte sich das Prinzip der thermodynamischen Umkehrbarkeit der Elektrolyse von Wasser zunutze und formulierte die reversible elektrochemische Reaktion bei der Elektrolyse von Wasser wie folgt:



Wurden nun beide Elektroden der Elektrolysezelle mit Wasserstoff und Sauerstoff konfrontiert, konnte ein elektrischer Stromfluss durch die externen Leiter festgestellt werden. Bei einer Reihenschaltung von mehreren Brennstoffzellen, kam es zu einem elektrischen Schlag, der von Graves als Umkehr der obigen Formel interpretiert wurde (Dhameja 2001, S. 14–15):



Wie Kirschke ausführt, datieren erste Konstruktionen von Fahrzeugen mit Wasserstoff als Energieträger, u. a. von Karl Kordesch, aus den 1960er Jahren. Kordesch rüstete einen PKW mit einer Brennstoffzelle und Wasserstofftanks aus und erreichte mit diesem Prototyp bereits rund 300 km Reichweite pro Tankfüllung. Später entwickelte Kordesch als Auftragsforschung auch das erste Brennstoffzellen-Motorrad. Weitere Entwicklungen

der Automobilindustrie, z.B. von General Motors, BMW, Siemens und Mercedes-Benz folgten bis in die 1980er Jahre (Kirschke 2020, S. 4).

Danach wurde weit weniger intensiv an der Thematik gearbeitet, bis ab der Jahrtausendwende wieder ein deutlicher Anstieg der Entwicklungsarbeit zu erkennen war, wie Kirschke beschreibt. Die Entwicklung im Bereich der Pkw nahm mit der Jahrtausendwende deutlich zu. So experimentierte z. B. BMW im Jahr 2000 mit wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotoren für PKWs. Diese Antriebsarten wurden jedoch bis dato nicht zur Serienreife entwickelt. Erst ab dem Jahr 2013 brachten gemäß Kirschke Firmen wie Honda, Toyota und Hyundai Serienfahrzeuge in den Verkauf, die über Wasserstoffbrennzellentechnik verfügten (Kirschke 2020, S. 5).

Einen der Gründe für die schleppende Verbreitung von Fahrzeugen mit Wasserstoff als Energieträger beschreiben Lönnermark *et al.* wie folgt: Ein Hauptgrund ist die niedrige Temperatur von -252 °C , die notwendig ist, um flüssigen Wasserstoff am Verdampfen zu hindern, also in flüssiger Form zu halten. Dies hat zur Folge, dass der Tankinhalt sehr stark von der Umgebungstemperatur beeinflusst wird. So steigt z. B. bei intensiver Sonneneinstrahlung die Innentemperatur und damit verbunden auch der -druck an. Gasförmiger Wasserstoff muss dann mittels Überdruckventil freigesetzt werden, um einen zu hohen Tankinnendruck zu vermeiden (Lönnermark und Ingason 2018, S. 101).

Trotz diverser technischer Schwierigkeiten schätzte die Bundesregierung im Jahr 2019, dass Wasserstoff als Energieträger zukünftig von großer Bedeutung in diversen Anwendungen sein kann. Zusätzlich zu der Nutzung in Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren kann z. B. die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen mithilfe von Wasserstoff denkbar sein. Als Einsatzmöglichkeiten werden neben Nutzfahrzeugen auch die Luft- und Schifffahrt sowie der Schienenverkehr gesehen (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2019).

5.2.2 Physikalisch-chemische Eigenschaften

Wasserstoff ist unter Normalbedingungen ein farb- und geruchloses Gas aus zweiatomigen Molekülen (H_2). Er ist mit 93 % das häufigste aller Elemente im Universum, kommt jedoch nahezu ausschließlich in gebundener Form in der Natur vor. Gasförmiger Wasserstoff ist sehr reaktiv und reagiert z. B. stark exotherm mit Sauerstoff (O_2) zu Wasserdampf (H_2O) (Dörr et al. 2021, S. 12).

Wasserstoff hat eine relative Gasdichte von 0,0695 und ist daher deutlich leichter als die Umgebungsluft. Der Bereich, in dem Wasserstoff eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre mit der Luft bilden kann, ist sehr groß und liegt zwischen 4 Vol. % und 77 Vol. %. Strömt Wasserstoff mit hoher Geschwindigkeit aus, kann sich dieser auch ohne externe Zündquelle aufgrund der dabei entstehenden Expansionswärme (Joule-

Thomsons Effekt) selbst entzünden (Joule, J. P., Thomson, W. 1852). Für Antriebszwecke wird Wasserstoff oft tiefkalt und verflüssigt verwendet. Aus einem Liter verflüssigtem Wasserstoff entstehen rund 850 Liter gasförmiger Wasserstoff (DGUV e. V. 2024d).

Gemäß Hebling *et al.* kann verflüssigter Wasserstoff, wie LNG direkt transportiert werden, aber auch chemisch gebunden als Ammoniak, Methanol oder LOHC (Hebling und M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle, A. Held, M. Jahn, N. Müller).

Eine erhebliche Gefährdung kann die niedrige Temperatur von flüssigem Wasserstoff laut Kirschke darstellen, die bei Hautkontakt zu massiven Gewebeschäden führen kann (Kälteverbrennungen). Eine Erwärmung führt zu einer raschen Volumenvergrößerung, was zum Druckanstieg bis hin zum Bersten von Behältern führen kann, wenn Sicherheitseinrichtungen versagen oder unterdimensioniert sind. Tritt tiefkalter Wasserstoff aus, kann dies zu Lachenbildung führen, die jedoch sehr schnell verdunsten (Kirschke 2020, S. 42).

5.2.3 Anwendung

Wasserstoff dient nicht nur als traditioneller Grundstoff in der chemischen Industrie, er wird gemäß dem VDE immer mehr zu einem der zentralen Energieträger bzw. -speicher im Zuge der Energiewende und der Dekarbonisierung. Wasserstoff hat als leichtestes aller Elemente im Periodensystem den Vorteil, einen der höchsten gravimetrischen Heizwerte zu besitzen, der mit 33,33 kWh/kg den von Dieselmotorkraftstoff nahezu um das Dreifache übersteigt. Um den Transport und die Logistik zu erleichtern, wird Wasserstoff daher oft stark verdichtet (bis zu 900 bar), extrem gekühlt (auf -252,9 °C) oder in einer spezifischen Trägerflüssigkeit - LOHC gelöst. Wird Wasserstoff mittels erneuerbaren Stroms erzeugt, z. B. durch Elektrolyse, spricht man von grünem Wasserstoff (VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. 2023, S. 13).

Die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung geht bis 2030 von einem Wasserstoffbedarf von ca. 90 bis 110 TWh aus. Ein Großteil davon soll importiert werden, bis zu 14 TWh an grünem Wasserstoff könnten zukünftig durch nationale Produktion erzeugt werden (BMWi 2020, S. 5).

Im Jahr 2020 lag der nationale Verbrauch von Wasserstoff in Deutschland bei circa 55 TWh. Hauptsächlich wird der Wasserstoff dabei in der industriellen Grundstoffherstellung wie z. B. zur Ammoniak- und Methanolsynthese und der Petrochemie verwendet. Grüner Wasserstoff spielt hierbei momentan keine maßgebliche Rolle (BMWi 2020, S. 10).

Im Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung wird grünem Wasserstoff insbesondere zum Betrieb von Brennstoffzellen eine erhebliche Bedeutung zugemessen. So

sieht man unter anderem für LKW und andere schwere Fahrzeuge wie z. B. den Schienenverkehr eine Anwendungsmöglichkeit für Brennstoffzellen. Die Bundesregierung will daher Voraussetzungen schaffen, um die Brennstoffzellentechnologie auf Wasserstoffbasis im größeren Umfang einzuführen (Braun 2019).

Hierfür sind gemäß Hebling *et al.* jedoch zum einen die Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie und zum anderen der Aufbau einer Betankungs-Infrastruktur für Pkw und Lkw notwendig (Hebling und M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle, A. Held, M. Jahn, N. Müller).

Wasserstoff wird ihrer Ansicht nach auf Basis erneuerbarer Energien zukünftig als gasförmiger bzw. Grundstoff von flüssigen Energieträgern für viele Nutzungen, in denen direkte Stromnutzung nicht möglich oder unrentabel wäre eine Rolle spielen (Hebling und M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle, A. Held, M. Jahn, N. Müller).

Aus Wasserstoff können neben Ammoniak auch Kohlenwasserstoffe synthetisiert werden, wie der Sachverständigenrat für Umweltfragen ausführt. Diese werden z. B. *E-Fuels* genannt, wenn es sich dabei um Kraftstoffe handelt. Für deren Transport ist es denkbar, auf bereits bestehende Erdgas- und Erdölinfrastruktur zurückzugreifen. Dies ist wirtschaftlicher, als Wasserstoff zu transportieren. Es ist daher sowohl beim Ammoniak als auch bei synthetischen Kraftstoffen sinnvoll, die Synthese bereits vor einem weiteren Transport durchzuführen (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2021, S. 24).

5.2.4 Herstellung und Logistik

Die industrielle Herstellung von Wasserstoff kann mit mehreren Methoden erfolgen. Eine davon ist die Elektrolyse. Dabei wird Wasser durch Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Ein weiteres Verfahren ist die Herstellung von Wasserstoff durch Dampfreformierung aus Erdgas. Dies ist das zurzeit gängigste Verfahren in Deutschland. Im Versuchsstadium ist zurzeit die sogenannte Methanpyrolyse, bei der Erdgas in Wasserstoff und Kohlenstoff zerlegt wird (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2021, S. 6–7).

Das Speichern von gasförmigem Wasserstoff in Druckbehältern ist, wie bei anderen Gasen auch, die gängigste und etablierteste Möglichkeit der Lagerung, wie Kirschke ausführt. Die gängigen Speicherdrücke von Wasserstoff in Druckgasbehältern liegen bei 200 bar bis 1.000 bar, wobei Druckgasflaschen für den stationären Einsatz üblicherweise mit 200 - 300 bar betrieben werden. Im Bereich von Wasserstofftankstellen sind bis zu 900 bar üblich. Bei mobilen Anwendungen, wie zum Beispiel im Fahrzeugbau, sind Druckgasbehälter mit einem Nenndruck von 350 bar und 700 bar anzutreffen (Kirschke 2020, S. 21–22).

Für eine flächendeckende Wasserstofflogistik, z. B. um Wasserstofftankstellen zu beliefern, bieten sich gemäß Kirschke drei Optionen an:

Zum einen die Versorgung mittels Tank-Lkws, wie sie für Ottokraftstoff und Diesel üblich ist, den stationären Anschluss an ein Wasserstoffleitungsnetz oder die Synthese von Wasserstoff direkt vor Ort, z.B. durch Elektrolyse (Kirschke 2020, S. 25).

Für den kontinuierlichen Transport relevanter Mengen an Wasserstoff, auch über weite Wegstrecken müssen noch praktikable Techniken (weiter) entwickelt werden, wie Hebling *et al.* feststellen. Zusätzlich bzw. ergänzend zu dem heutigen Standard (Transport in Druckgasflaschen bis 500 bar) wäre die Logistik mittels Pipelines, Flüssigwasserstoff, Methanol, Ammoniak, Methan sowie die LOHC-Technologie vorstellbar. Hierzu besteht weiterhin Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Da die benötigten Wasserstoffmengen an den Lkw-Tankstellen weit über denen von Pkw liegen (eine Sattelzugmaschine weist den 60-fachen Energiebedarf im Vergleich zu einem Pkw auf), sollten eigene Konzepte für die Versorgung und den Aufbau von Tankstellen mit hohem Wasserstoffbedarf angedacht werden (Hebling und M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle, A. Held, M. Jahn, N. Müller).

Wegen der erhöhten Energiedichte ist der Transport von flüssigem Wasserstoff unter Umständen vorteilhafter, führt Kirschke aus. Rechtlich stellt dies zunächst kein Problem dar (Kirschke 2020, S. 26).

Um Wasserstoff für die Speicherung zu verflüssigen, sind laut Kirschke sehr niedrige Temperaturen von unter -253 °C erforderlich, deren Erzeugung mit einem hohen Energieeinsatz verbunden ist. Darüber hinaus sind die Verflüssigung, die Speicherung und der Transport mit hohem technischem Aufwand verbunden. Dieser resultiert vor allem im konstanten Einhalten der extrem niedrigen Temperatur des verflüssigten Wasserstoffes. Gelingt dies nicht, steigt der Druck in dem Lagerbehälter schnell. Dies kann zu ungewollten bis hin zu schwer kontrollierbaren Situationen, z. B. dem Abblasen von gasförmigem Wasserstoff führen. Unter anderem der anspruchsvolle Umgang damit führte dazu, dass verflüssigter Wasserstoff als alternativer Energieträger im Fahrzeugbereich momentan keine Rolle spielt (Kirschke 2020, S. 20).

5.3 Tiefkaltes, verflüssigtes Methan (LNG)

5.3.1 Physikalisch-chemische Eigenschaften

LNG ist ein unter geringem Überdruck gespeichertes komplexes Gemisch aus Kohlenwasserstoffen (Erdgas). Hauptbestandteil von LNG ist mit rund 90 % Methan, es enthält jedoch noch weitere Alkane. Es kann darüber hinaus in Spuren unter anderem Quecksilber sowie diverse Schwefelverbindungen beinhalten (Shell Nederland Verkoopmaatschappij B.V. 2016).

LNG ist farb- und geruchlos und wird in der Regel nicht odorisiert. Es verdrängt Sauerstoff und wirkt dadurch erstickend auf Personen beim Einatmen. Es löst sich nicht im Wasser und ist weder ätzend noch korrosiv. Die Dichte beträgt zwischen 0,42 und 0,52 g/ml. Die Zündtemperatur von LNG liegt bei 595 °C, die untere Explosionsgrenze (UEG) bei 4,1 Vol.% und die obere Explosionsgrenze (OEG) bei 16,5 Vol.% (Steller 2021).

Das Volumen von einem Kilogramm LNG beträgt ca. 1/600 der gleichen Menge an gasförmigem Methan. Das heißt beim Verdampfen werden aus einem Liter LNG ca. 600 Liter gasförmiges Methan (Akademie des Deutschen Kraftfahrzeuggewerbes GmbH (TAK) 2020).

Um den gewünschten flüssigen Aggregatzustand zu erreichen, ist ein Abkühlen unter den Siedepunkt von ca. -162 °C notwendig (Akademie des Deutschen Kraftfahrzeuggewerbes GmbH (TAK) 2020).

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Lagerung von LNG meist unter einem Überdruck von 4 bis 10 bar. Das hat zur Folge, dass in einem kryogenen Fahrzeugtank die tatsächliche Temperatur höher als -162 °C liegt. In der Regel liegt sie dort in einem Bereich von -140 °C bis -136 °C (Lönnermark und Ingason 2018, S. 100).

Bedingt durch die tiefe Temperatur des LNG beginnt dieses gemäß Steller beim Freiwerden unter Normalbedingungen sehr schnell zu sieden. Dieses Phänomen wird auch Flash-Verdampfung genannt. Dies geht mit einer zum Teil sehr starken Nebelbildung einher, die durch dabei kondensierende Luftfeuchtigkeit bedingt ist. Je kälter das verdampfende LNG ist, desto höher ist dessen Dichte. Es breitet sich daher zuerst am Boden aus. Mit zunehmender Erwärmung sinkt die Dichte und es kommt zur vermehrten Durchmischung mit der Umgebungsluft. Es kann von dem in Tabelle 5 dargestellten, temperaturabhängigen Verhalten des freigesetzten LNG ausgegangen werden (Steller 2021).

Tabelle 5: Verhalten von freigesetztem LNG (nach Steller 2021)

Temperaturbereich	Verhalten des LNGs
unter -135°C	schwerer als Luft
-135°C bis -105°C	ähnliche Dichte wie Luft
über -105°C	leichter als Luft

5.3.2 Funktion / Anwendung

LNG kommt bei Antrieben mit alternativen Energieträgern in Verbrennungsmotoren zum Einsatz. Der Vorteil dabei ist, dass das LNG bei der Lagerung im Tank nur einen Bruchteil des Volumens von gasförmigem Erdgas benötigt. Das Betreiben von Verbrennungsmotoren mit LNG wird hauptsächlich im Nutzfahrzeugfernverkehr und in der Schifffahrt angewandt. Meist werden dazu modifizierte Dieselvebrennungsmotoren genutzt, in welchen das Erdgas im gasförmigen Zustand verbrannt wird (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 19).

Beim Einsatz von LNG werden im Vergleich zu Benzin- und Dieselmotoren deutlich weniger Schadstoffe ausgestoßen. Durch die einfache Speichermöglichkeit von großen Energiemengen in kryogenen Tanks ist LNG bereits jetzt im Nutzfahrzeugbereich eine praktikable Alternative zum klassischen Verbrennungsmotor (Akademie des Deutschen Kraftfahrzeuggewerbes GmbH (TAK) 2020).

Momentan werden gemäß Steller sowohl reine LNG-LKW mit einem oder zwei LNG-Tanks oder auch hybride HPDI-Systeme (*High Pressure Direct Injection*), die zusätzlich auch noch über einen Dieseltank verfügen, angeboten (Steller 2021).

5.3.3 Herstellung und Logistik

Zur LNG-Gewinnung wird Erdgas (Methan) verflüssigt, wie Wolbers *et al.* ausführen. Zuvor müssen eventuell vorhandene Beimengungen wie z. B. Stickstoff, Kohlenstoffdioxid, Schwefelwasserstoff, Wasser und Quecksilber entfernt werden. Auch langkettige Kohlenwasserstoffe mit höherem Gefrierpunkt, die anderweitig Verwendung finden können, werden separiert (Wolbers et al 2015).

Gemäß der DVGW wird der Großteil des weltweit gehandelten LNGs im industriellen Stil in Großverflüssigungsanlagen z. B. in Katar, Algerien, Australien und USA mit Kapazitäten von einer bis mehreren Millionen Tonnen Produktionskapazität pro Jahr hergestellt und meist per Tankschiff umgeschlagen. Am Zielort wird LNG in Terminals zwischengelagert, wiederverdampft und in das Erdgasnetz eingespeist oder alternativ als LNG mit Tankwagen, Kesselwagen oder kleineren Tankschiffe distribuiert. Im begrenzten Umfang ist auch eine dezentrale Produktion vor Ort denkbar, dies wird z. B. bei der Herstellung von Bio-LNG mit der sogenannten *Power-to-Gas-Technologie* praktiziert (DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.).

Als Bio-LNG wird laut dena verflüssigtes Biomethan bezeichnet. Es kann ebenfalls als Kraftstoff verwendet werden. Hergestellt wird Bio-LNG durch kryogene Verflüssigung von Biogas, das z. B. durch Vergärung von pflanzlichem Substrat gewonnen wird (dena Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2019).

Die niedrige Lagertemperatur des LNGs stellt besondere Anforderungen an die Lagerung bzw. Treibstoffbevorratung in Fahrzeugen, wie Steller beschreibt. LNG-Tanks müssen sehr gut isolierend ausgeführt sein und sind daher meist doppelwandig und aus Edelstahl ausgeführt. Um die gewünschte Isolierleistung zu erzielen, wird zwischen den Edelstahlwänden ein Vakuum erzeugt und als Redundanz mit Perlit gefüllt. Eine Tankinnendruckanzeige ist standardmäßig vorhanden. Oft ist auch noch ein Kühlsystem verbaut, das durch konstante Kühlung verhindern soll, dass der Innendruck des LNG-Tankes über einen kritischen Druck hinaus ansteigt (Steller 2021).

Ein wichtiger sicherheitstechnischer Aspekt ist es gemäß Steller, den Behälterinnen- druck innerhalb von definierten Grenzen zu halten. Die dafür verbauten Überdruckventile sprechen an, sobald der Tankinnendruck z. B. durch einen Isolationsverlust oder Wärmebeaufschlagung wie starke Sonneneinstrahlung unzulässig hoch ansteigt. In der Regel sind mindestens zwei Überdrucksysteme vorhanden, die zwischen 16 und 24 bar reagieren und solange Gasphase des LNGs abblasen, bis der regelgerechte Innendruck wieder erreicht ist (Steller 2021).

Gerade in umschlossenen Räumen, z. B. in Werkstatt- oder Abstellbereichen ist es wichtig Vorkehrungen zu treffen, damit diese Druckentlastungen nicht zum Entstehen von gefährlichen explosionsfähigen Atmosphären führen.

5.4 Komprimiertes Erdgas/Methan (CNG)

5.4.1 Historie

Die Idee, Erdgas als Treibstoff für Fahrzeuge zu benutzen, stammt bereits aus dem frühen zwanzigsten Jahrhundert, wie Barilo ausführt. Zunächst wurde unkomprimiertes Methan benutzt, um den Mangel an Ottokraftstoff im Ersten Weltkrieg zu kompensieren. Bereits im Zweiten Weltkrieg wurde in Europa CNG als Energieträger erfolgreich eingesetzt. Dabei wurden die notwendigen CNG-Tanks auf den Dächern der Fahrzeuge angebracht. Diese Art der Treibstofflagerung wird bis heute eingesetzt, z. B. im Nutzfahrzeugbereich, wo die Montage der CNG-Tanks im Dachbereich bei Bussen nach wie vor üblich ist (Barilo 2018).

5.4.2 Physikalisch-chemische Eigenschaften

Wie LNG besteht CNG vorwiegend aus Methan, wobei der Methananteil abhängig von der Förderregion ist und zwischen 80% und 99% liegen kann. Es hat eine Dichte von $0,717 \text{ kg/m}^3$ (bei 1.013 hPa , 0°C) und ist damit leichter als Luft. In der Regel wird ein Duftstoff beigemischt, um Leckagen schnell olfaktorisch bemerken zu können. Im Gegensatz zu LNG wird CNG bei Umgebungstemperatur komprimiert und gespeichert (Schelb und Jordan 2020, S. 35).

Die Mindestzündenergie von Erdgas liegt bei $0,28 \text{ mJ}$ und die Zündtemperatur beträgt 595°C (Kirschke 2020, S. 37).

5.4.3 Funktion / Anwendung

CNG-Fahrzeuge werden gemäß dem österreichischen Bundesfeuerwehrverband in Serie produziert und sind mit einem handelsüblichen Verbrennungsmotor ausgestattet. Dies gilt für PKW, aber auch für Nutzfahrzeuge und Busse. Nachrüstungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICEV) sind möglich, aber nicht oft anzutreffen. Die Bevorratung erfolgt in einem oder auch mehreren Druckgastanks im Fahrzeug. Dort wird das gasförmige Methan unter bis zu 200 bar Druck gespeichert. Vor der Verbrennung im Motor erfolgt eine Druckreduzierung auf rund 8 bar . Bei CNG-Fahrzeugen sind mehrere Kombinationen von Energieträgern nicht unüblich: Fahrzeuge mit ausschließlichem CNG-Antrieb werden als monovalent bezeichnet. Ist der CNG-Antrieb mit einem Benzin-Antrieb kombiniert, spricht man von einem bivalenten Fahrzeug. Bei bivalenten Fahrzeugen ist sowohl (mindestens) ein CNG- als auch ein Benzintank vorhanden (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 15).

5.4.4 Herstellung und Logistik

Die grundlegende Produktion des dem CNG zugrundeliegenden Methans ist identisch mit dem bereits unter Punkt 5.3.4 beschriebenen Herstellungsprozesses und wird daher nicht noch einmal beschrieben.

Anders als bei der kryogenen Verflüssigung von Methan zu LNG muss CNG keine Energie bei der Verdichtung abgeben, da es lediglich gasförmig komprimiert wird, wie Lönnermark und Ingason beschreiben. Die Speicherung erfolgt zumeist in Stahl- oder Verbundstoffbehältern, in welchen das CNG in der Regel mit 200 bar gelagert wird. Zumeist sind redundante Sicherheitseinrichtungen vorhanden: zum einen eine Überdruckentlastungseinrichtung, die bei ca. 110°C anspricht, und zum anderen eine weitere Druckentlastung, die bei etwa 340 bar Tankinnendruck aktiviert wird und CNG in die Umgebung

entlässt, um ein Bersten des Tanks zu verhindern (Lönnermark und Ingason 2018, S. 101).

Die in der Regel nach dem Schmelzlotprinzip ausgeführte Thermosicherung bei CNG-Tanks verursacht bei der Aktivierung zumeist ein Abblasen des CNGs unter Stichflammenbildung, die bis zu mehreren Metern lang sein kann. Es bestehen gemäß dem österreichischen Bundesfeuerwehrverband keine Richtlinien, die festlegen, zu welcher Seite bzw. in welchem Bereich die Stichflamme bei Auslösen der Thermosicherung austreten muss. Bei CNG-Fahrzeugen kann bei einer Freisetzung von folgenden Parametern ausgegangen werden:

- PKW: bis zu 700 m³ zündfähiges Gas-Luft-Gemisch,
- LKW: bis zu 2.000 m³ zündfähiges Gas-Luft-Gemisch,
- Bus: bis zu 4.600 m³ zündfähiges Gas-Luft-Gemisch

(Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 16).

5.5 Komprimiertes Flüssiggas (LPG)

5.5.1 Physikalisch-chemische Eigenschaften

Als Flüssiggas wird gemäß Brzezinska eine Mischung aus circa einem Drittel Propan (C_3H_8) und zwei Dritteln Butan (C_4H_{10}) bezeichnet. Bei Normalbedingungen ist dieses Gemisch gasförmig und deutlich schwerer als Luft, kann jedoch unter Druck verflüssigt werden. Sinkt der Druck ab, geht das LPG wieder in die Gasphase über. In LPG-Fahrzeugtanks befindet sich daher stets eine Flüssigphase und eine Gasphase darüber. Kommt es z.B. durch eine Havarie eines Flüssiggastankes zu einer unkontrollierten Freisetzung, dehnt sich das freiwerdende Flüssiggas aus, verdampft und kühlt dabei stark ab. Durch das damit einhergehende Kondensieren der Luftfeuchtigkeit bildet sich dabei in der Regel ein weißer, gut sichtbarer Nebel. Aus einem Liter LPG in Flüssigphase entstehen nach dem vollständigen Verdampfen rund 250 Liter gasförmiges LPG (Brzezinska 2019).

Flüssiggas hat laut der DGUV einen Flammpunkt von -104°C und eine Zündtemperatur von 470°C. Liegt gasförmiges LPG in einer Konzentration zwischen 2 und 10% in der Umgebungsluft vor, bildet sich hierbei eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre. Die relative Gasdichte liegt im Vergleich zu Luft bei 1,55 – gasförmiges LPG ist also erheblich schwerer als Luft und sammelt sich in tiefer gelegenen Bereichen (DGUV e. V. 2023b).

Flüssiggasdampf breitet sich auch über weite Strecken auf dem Boden aus und kann so auch vermeintlich entfernte Zündquellen erreichen und gezündet werden (Brzezińska 2019).

Tritt LPG als Flüssigphase aus, zeigt es gemäß Schelb *et al.* zunächst ein vergleichbares Verhalten wie Benzin, verdampft jedoch deutlich zügiger. Gerade das Verdampfen kühlt das noch flüssige, meist in Lachen stehende LPG zunächst ab und verzögert so das vollständige Verdampfen (Schelb und Jordan 2020, S. 36).

Diese Eigenschaften erfordert entsprechende Kenntnisse und darauf abgestimmte Einsatzstrategien bei Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen.

5.5.2 Anwendung

Wie Brzezinska schätzt, nutzen aktuell rund 16 Millionen Fahrzeuge weltweit LPG als Energieträger. Dies entspricht in etwa einem Anteil von circa 3 % des globalen Energieträgereinsatzes. Ihre größte Verbreitung finden LPG-getriebene Fahrzeuge momentan in der Türkei, Polen, Südkorea, Italien und Australien. Neben dem Vorteil, dass Verbrennungsmotoren aus herkömmlichen ICEV für den Betrieb mit LPG geeignet sind, ist der günstigere Preis des LPG ein Grund für die weite Verbreitung von LPG als Energieträger (Brzezińska 2019).

In der Bundesrepublik Deutschland waren laut dem Branchenverband DVFG im Jahr 2023 rund 330.000 Fahrzeuge mit mono- oder bivalentem LPG-Antrieb registriert, die an circa 6.000 Tankstellen betankt werden können. Neben dem Antreiben von Fahrzeugen spielt LPG eine große Rolle als Energieträger beim Heizen, im industriellen und gewerblichen Bereich sowie in der privaten Nutzung, z. B. als Flaschengas (DVFG 2023).

5.5.3 Herstellung und Logistik

Die Bestandteile des LPG fallen laut DVFG bei der Förderung von Rohöl an und werden als gasförmiges Begleitprodukt im Ölgewinnungsprozess aufgefangen. Nach einem Reinigungs-, Odorierungs- und Liquifizierungsprozess erfolgt die Speicherung in großen Raffinerieterminals. Die Verteilungslogistik erfolgt zumeist per Schiff, Bahnkesselwagen und LKW-Tankfahrzeugen (DVFG 2023).

An den Tankstellen wird das Flüssiggas gemäß dem ÖBFV entweder in Erdtanks oder freistehenden Flüssiggastanks gespeichert. Die Zapfsäulen selbst sind sehr ähnlich wie die üblichen Zapfsäulen für Diesel- und Ottokraftstoff aufgebaut. Wichtig ist jedoch die explosionsgeschützte Ausführung der elektrischen Installationen dabei (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 32).

6. Gefährdungen durch alternative Energieträger im Einsatzgeschehen

Um Prozesse objektiv und umfänglich im Hinblick auf Sicherheit und Gesundheit für die beteiligten Personen beurteilen zu können, ist es in einem ersten Schritt notwendig, die dabei auftretenden Gefährdungen zu identifizieren.

In der amtlichen Begründung für das Arbeitsschutzgesetz wird eine „*Gefährdung als die Möglichkeit eines Schadens oder einer gesundheitlichen Beeinträchtigung ohne bestimmte Anforderungen an deren Ausmaß oder Eintrittswahrscheinlichkeit*“ definiert (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2021).

Gemäß dem Handbuch Gefährdungsbeurteilung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) werden üblicherweise zehn Gefährdungsfaktoren definiert:

- *„Mechanische Gefährdungen*
- *Elektrische Gefährdungen*
- *Gefahrstoffe, Brand- und Explosionsgefährdungen*
- *Biostoffe*
- *Thermische Gefährdungen*
- *Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen*
- *Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen*
- *Physische Belastung*
- *Psychische Faktoren*
- *Arbeitszeitgestaltung“*

(Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2021).

Die nachfolgend betrachteten Faktoren wurden in enger Anlehnung an diese Definition der BAuA gewählt. Der im Original zusammengefasste Gefährdungsfaktor „Gefahrstoffe, Brand- und Explosionsgefährdung“ wurde in dieser Arbeit in zwei separate Punkte unterteilt, da diese Gefährdungen erheblichen Anteil an der Gesamtgefährdung von Einsatzkräften im Umgang mit alternativen Energieträgern im Einsatzgeschehen haben. Daher ist eine Unterteilung notwendig, um eine ausreichende Befassung mit diesen Faktoren zu ermöglichen.

Im Folgenden werden alle identifizierten Gefährdungen, unterteilt nach Energieträgern, beschrieben. Nicht alle Formen von Energieträgern weisen stets alle Arten von Gefährdungen auf, es werden daher nur relevante Gefährdungen berücksichtigt. Der Gefährdungsfaktor „Arbeitszeitgestaltung“ wurde generell nicht berücksichtigt, da er im Kontext dieser Arbeit keine Relevanz hat.

Dass die Einführung von Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern zum Teil auch eine Veränderung der Gefährdungen für Menschen im Umgang mit diesen Fahrzeugen mit

sich bringen, haben Enderlein *et al.* bereits im Jahr 2010 festgestellt (Enderlein et al. 2010, S. 2).

Die nachfolgend in den Punkten 6.1 bis 6.5 ermittelten Gefährdungen für Einsatzkräfte sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Übersicht der in 6.1 -6.5 identifizierten Gefährdungen für Einsatzkräfte

Gefährdung	Elekt. Speichersystem (LIB)	Wasserstoff (H ₂)	Verflüssigtes Methan (LNG)	Verdichtetes Methan (CNG)	Verflüssigtes Propan/Butan (LPG)
Mechanisch	+	+	+	+	+
Elektrisch	++	++ ³	+/-	+/-	+/-
Chemisch	+++	+	+	+	+
Brand/Explosion	+++	+++	+++	+++	+++
Biologisch	-	-	-	-	-
Thermisch	++	++	++	++	+++
Physikalisch	-	++	++	+	+
Arbeitsumgebung	-	+	+	+	+
Physisch	-	-	-	-	-
psychisch	+	+	+	+	+

-	=	keine Gefährdung
+/-	=	geringe Gefährdung
+	=	Gefährdung
++	=	erhebliche Gefährdung
+++	=	sehr erhebliche Gefährdung

6.1 Gefährdungen bei elektrischen Speichersystemen

6.1.1 Mechanische Gefährdungen

Eine Hauptursache für mechanische Gefährdungen von Einsatzkräften bei Tätigkeiten an Hybrid- (HEV) oder Elektrofahrzeugen (BEV) ist laut Georgiev das unvermittelte Anfahren des Fahrzeugs bzw. die Gefahr des Wegrollens (Georgiev 2021).

Befindet sich ein elektrisch betriebenes Fahrzeug im betriebsbereiten Zustand, ist dies, im Gegensatz zu einem konventionellen Fahrzeug mit laufendem Verbrennungsmotor, zunächst nicht ohne weiteres erkennbar. Es kann also z. B. im Zuge von Einsatzmaßnahmen im Inneren des Fahrzeuges zu einer versehentlichen Betätigung, z.B. des Gaspedals durch ein Unfallopfer und damit zu einer unkontrollierten Fahrzeugbewegung kommen.

³ nur beim Einsatz von Brennstoffzellentechnik

Die im Zuge einer technischen Rettung durchgeführten Stabilisierungsmaßnahmen, z. B. durch Radkeile ist gemäß Stanzel bei leistungsstarken Fahrzeugen in der Regel nicht ausreichend (Stanzel 2020).

Durch die bereits beschriebenen Vorgänge bei der thermischen Propagation von LIB kommt es laut DGUV nicht nur zur Freisetzung von Gasen, Dämpfen sowie Strahlflammen, sondern unter Umständen auch zum Wegschleudern bzw. Ausstoßen von LIB-Teilen. Dies ist zum einen durch die entstehende Überdrücke und deren schlagartige Freisetzung innerhalb der LIB-Zellen, zum anderen durch die Zündung der freigesetzten brennbaren Gase denkbar. Es ist nicht unüblich, dass bei fortschreitender Reaktion in einer LIB der wiederholte Ausstoß von Teilen, vergleichbar mit Projektilen, zu beobachten ist (DGUV e. V. 2023c).

Einsatzkräfte können also durch unkontrolliert wegfliegende Teile getroffen werden, sei es direkt aus der LIB oder als Sekundärwirkung durch andere Fahrzeugteile die z.B. durch eine Explosion von Ventinggasen im Fahrzeuginneren stark beschleunigt werden.

6.1.2 Elektrische Gefährdungen

Das Hochvoltssystem und der dazugehörige Speicher sind in der Regel galvanisch getrennt, wie Blum und Long beschreiben. Im Hochvoltssystem liegt nur dann Spannung an, wenn das System aktiv ist und durch die Steuerelektronik aktiviert wurde. Dazu ist in der Regel auch das Vorhandensein der Niedervoltbordnetzung notwendig. Durch die Bauart des Hochvoltsystems ist die Möglichkeit, mit spannungsführenden Hochvoltteilen in Kontakt zu kommen, für Einsatzkräfte unwahrscheinlich (Blum und R. Thomas Long Jr. 2016).

Auch Stanzel kommt zu dem Schluss, dass das Risiko für Einsatzkräfte eine elektrische Körperdurchströmung durch ein BEV zu erleiden gering ist, da die ISO 6469-3 „*Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Spezifikation - Teil 3: Elektrische Sicherheit*“ bei der Konstruktion der Fahrzeuge zur Anwendung kommt. Die Sicherheitsmaßnahmen beim Bau von Hochvoltspeichern bzw. dem Hochvoltsystem bestehen gemäß Stanzel unter anderem aus Berührungsschutz, den Potentialausgleich als Schutz gegen indirektes Berühren sowie doppelte Isolationen. Eine weitere Maßnahme zur Sicherheit von Fahrzeuginsassen und Rettungskräften ist das Abschalten des Hochvoltsystems bei einer erkannten Airbagauslösung. Stanzel beschreibt weiterhin, dass im Rahmen von Brandversuchen an LIB keine relevanten elektrischen Gefährdungen an der Fahrzeugkarosserie und den verwendeten Strahlrohren bei den Brandbekämpfungsmaßnahmen mit Wasser beobachtet werden konnten. Als kritisch in Bezug auf elektrische Gefährdungen betrachtet sie jedoch den direkten Umgang mit dem (ggf.

beschädigten) Hochvoltspeicher bzw. Teile davon. Dies stellt aus ihrer Sicht eine Gefährdung für die Einsatzkräfte dar (Stanzel 2020).

Wie Schelb und Jordan ergänzend feststellen, ist gerade nach einem Unfall zunächst unklar, ob die galvanische Trennung der elektrischen Leitungen noch intakt ist. Es ist zumindest denkbar, dass HV-Leitungen durch mechanische Einwirkungen nicht mehr vollständig isoliert sind und daher gegebenenfalls Kontakt mit der Karosserie besteht. Daher sollten ihrer Ansicht nach Einsatzkräfte ihre Einsatzmaßnahmen, insbesondere wenn diese invasiven Arbeiten direkt am Hochvoltspeicher beinhalten, unter diesem Gesichtspunkt abwägen, um nicht eine Gefährdung durch eine elektrische Körperdurchströmung zu riskieren (Schelb und Jordan 2020, S. 65).

Zu demselben Schluss kommt die DGUV: sie geht davon aus, dass eine elektrische Gefährdung der Einsatzkräfte durch die Bauart der Hochvoltkomponenten unwahrscheinlich ist, betont aber gleichzeitig, dass bei BEV oder Hybridfahrzeugen, die mit ihrer Ladeinfrastruktur verbunden sind, diese konstruktionsbedingte Sicherheit nicht mehr im vollen Umfang gegeben ist. Dies liegt vor allem an der dadurch vorhandenen Erdung des ansonsten galvanisch getrennten Systems (DGUV e. V. 2023c).

Dies führt laut Müller *et al.* dazu, dass auch bei dem durchaus denkbaren Schadensszenario, dass sich ein BEV im Wasser befindet, dazu, dass auch hierbei kein erhöhtes Stromschlagrisiko vorhanden ist. Auch hier ist jedoch wieder die Ausnahme zu beachten, wenn das überflutete Fahrzeug noch mit der Ladeinfrastruktur verbunden ist, z. B. in einer Hochwasserlage. Bei dieser Konstellation ist eine elektrische Gefährdung für Einsatzkräfte zumindest denkbar (Müller und Viktor Haefeli, Urs Bucheli, Bernward Limacher 2021).

Auch im internationalen Vergleich ist die bisher beschriebene Einschätzung zu der elektrischen Gefährdung durch Hochvoltssysteme für Einsatzkräfte ähnlich.

So beschreiben Larsson *et al.* die denkbare Konstellation, damit es zu einer elektrischen Körperdurchströmung kommen kann. Dazu müssen zwei Isolationsfehler gleichzeitig auftreten und eine Person leitfähige Teile des Fahrzeuges mit unterschiedlichem Potenzial berühren (Larsson *et al.*).

Auch Georgiev listet die Gefahr eines Stromschlages für Einsatzkräfte bei Rettungsarbeiten als potenzielle Gefährdung auf (Georgiev 2021).

Larsson *et al.* gehen davon aus, dass die elektrische Gefährdung für Personen und Einsatzkräfte durch die gut isolierten und geschützten spannungsführenden Hochvoltbauteile und -kabel in BEV gering ist (Larsson *et al.*).

Das US-amerikanische *National Transportation Safety Board* beschreibt auch die im Hochvoltspeicher verbleibende Energie als möglich Gefährdung für die Einsatzkräfte, da diese an einer Einsatzstelle weder die Möglichkeit haben, diese zu messen, noch eine

sichere Entladung vor Ort durchzuführen. Dies kann zum einen zum zeitverzögerten Entzünden des Hochvoltspeichers führen, erhöht zugleich aber auch das Risiko mit spannungsführenden Teilen in Berührung zu kommen (National Transportation Safety Board 2020).

6.1.3 Chemische Gefährdungen

Die Möglichkeiten der chemischen Gefährdung von Einsatzkräften bei Rettungs- und Bergemaßnahmen an Fahrzeugen mit Hochvoltspeichern sind auf zweierlei Arten denkbar: zum einen durch den direkten Kontakt mit Inhaltsstoffen des Hochvoltspeichers, wie z. B. der darin enthaltene Elektrolyt und zum anderen durch die Exposition mit Dampf, Rauch oder Staub, die aus einem Hochvoltspeicher austreten, wenn in diesem eine thermische Propagation stattfindet.

In der Regel besteht der Elektrolyt einer LIB aus einer Mischung von organischen Carbonaten in der ein Lithiumsalz wie z. B. Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6) gelöst ist, wie Blum und Long ausführen. Im geplanten Betriebszustand ist der Elektrolyt innerhalb der einzelnen Zellen gekapselt und ein Austreten bzw. Auslaufen ist sehr unwahrscheinlich. Um einen direkten Kontakt mit dem Inneren von LIB-Zellen zu ermöglichen, muss eine erhebliche Desintegration eines Hochvoltspeichers, z. B. durch physische Einwirkungen in Folge eines Verkehrsunfalles erfolgen (Blum und R. Thomas Long Jr. 2016).

Anders stellen sich gemäß Blum und Long die Expositionsmöglichkeiten für Einsatzkräfte bei einer LIB-Propagation dar. So führt eine Überhitzung einer LIB über deren maximal zulässige Temperatur hinaus zum Verdampfen des enthaltenen Elektrolyts. Dieser Dampf ist giftig sowie entzündlich und tritt sehr schnell aus der betroffenen Zelle und infolgedessen auch aus der LIB aus. Die enthaltenen Gefahrstoffe in dem austretenden Dampf variieren je nach vorhandenen Zellchemie, aktuellem Ladezustand und dem Auslösegrund für die Propagation.

Mit dem Auftreten unter anderem folgender Gefahrstoffe muss gemäß Blum und Long im austretenden Dampf gerechnet werden:

- Alkylcarbonate,
- Methan,
- Ethylen,
- Ethan,
- Wasserstoff,
- Kohlenstoffdioxid,
- Kohlenstoffmonoxid,

- Ruß und Partikel mit Nickel, Aluminium, Lithium, Kupfer und Kobalt sowie deren Verbindungen.

In Verbindung mit z. B. der Luftfeuchtigkeit können darüber hinaus diverse Fluorverbindungen wie z. B. Phosphorpentafluorid, Phosphorylfluorid und Fluorwasserstoff gebildet werden (Blum und R. Thomas Long Jr. 2016).

Vergleichbare Gaszusammensetzungen bei der Propagation von LIB konnten Bari *et al.* beobachten. Des Weiteren stellten auch sie fest, dass die konkrete Gaszusammensetzung z. B. je nach Zelle durchaus variieren. So konnten sie bei einer Reihe von Brandversuchen an baugleichen LIB-Zellen unterschiedliche Emissionen nachweisen. So war z. B. die gemessene Menge an Fluorwasserstoff nicht gleich, sondern differierte von Versuch zu Versuch. Gleiches berichteten sie von der Freisetzung von z. B. Kohlenstoffmonoxid. Nahezu konstant hingegen war die Produktion von Kohlenstoffdioxid bei den durchgeführten Versuchen (Di Bari 2020).

Auch die DGUV führt in ihrer Publikation zum Arbeitsschutz für Einsatzkräfte Gefährdungen durch die bereits erwähnten Gefahrstoffe auf. Neben den Reaktionsprodukten des Lithiumhexafluorophosphats, wie Fluorwasserstoff und Phosphorsäure, werden noch Wasserstoff, Ethylencarbonat, (Di)methylcarbonat, Schwermetalle, z. B. Kobalt, Nickel, Mangan, sowie Phosphorwasserstoffverbindungen, wie z. B. Phosphan, angeführt (DGUV e. V. 2020b).

Die Ventinggasmenge und -zusammensetzung sind nicht nur innerhalb LIB-Zellen gleicher Bauart unterschiedlich, auch die Art, wie die Propagation ausgelöst wird, scheint einen Einfluss darauf zu haben, wieviel Gas freigesetzt wird und wie dessen Zusammensetzung ist, wie Essl *et al.* ausführen. Sie beschreiben, dass Propagationen, welche durch Überhitzungen herbeigeführt werden, tendenziell zu weniger freigesetztem Gasvolumen führen als Reaktionen, die durch elektrische Überladung oder durch physische Einwirkung, z. B. durch Penetration mit einem Metalnagel, ausgelöst werden.

Darüber hinaus haben Essl *et al.* beobachtet, dass auch die Gaszusammensetzung bei unterschiedlichen Triggermethoden variiert. So produzierten die von Essl verwendeten LIB-Zelltypen beim Überladen deutlich mehr Wasserstoff als z. B. bei der Überhitzung. Wurde die Propagation physisch verursacht, wurde hingegen höhere Ethan- und Kohlenstoffdioxidkonzentrationen gemessen, wobei beim Überladen und Überhitzen mehr Methan entstand. Auch auf die Menge an freigesetztem Kohlenstoffmonoxid hatte der Auslösegrund der Propagation einen Einfluss (Essl *et al.* 2020, S. 11).

Während in der Vergangenheit primär das Feuer, das in der Folge einer LIB-Propagation entstehen kann, als Bedrohung z. B. für Einsatzkräfte wahrgenommen wurde, haben Larsson *et al.* bereits 2017 auf die Gefährdungen der Ventinggase von LIB hingewiesen, insbesondere in engen, umbauten Räumen oder Örtlichkeiten. Sie haben sehr früh das

Risiko der chemischen Gefährdung durch die austretenden Gase einer propagierenden LIB erkannt und die Zusammensetzung beschrieben. Auch Larsson *et al.* konnten in ihren Untersuchungen vor allem Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Fluorwasserstoff, Phosphorylfluorid und Phosphorpentafluorid nachweisen (Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P. et al. 2017).

Wie auch Kong *et al.* beschreiben, kann eine Gasfreisetzung unter Umständen bereits im Normalbetrieb, gesichert aber beim thermischen Durchgehen beobachtet werden. Die Zusammensetzung des emittierten Gasgemisches ist jedoch bei den beiden Prozessen nicht gleich. Während im Normalbetrieb die Gase Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Methan und Sauerstoff in geringen Mengen detektierbar sind, können beim *thermal runaway* unter anderem Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid, Methan und Ethan in zum Teil erheblichen Volumina freigesetzt werden. Die Kohlenwasserstoffe sind brennbar und werden in der Regel aus dem vorhandenen Elektrolyten des jeweiligen Batteriesystems freigesetzt. Kong *et al.* konnten ebenfalls beobachten, dass die Gaszusammensetzung mit dem Alter der LIB in Verbindung steht. Darüber hinaus können bei der thermischen Propagation zusätzlich auch toxische Fluorverbindungen entstehen (Kong et al. 2018).

Auch Hill beobachtet bei Tests mit LIB die Freisetzung von toxischen und brennbaren Gasen. Insbesondere Kohlenstoffmonoxid, Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff und Cyanwasserstoff (HCN) waren Gase, die in den getesteten Zellchemievarianten auftraten (Hill 2017). Neuere Untersuchungen enthalten jedoch keine Anhaltspunkte dafür, dass HCl und HCN generell in Ventinggasen detektierbar sind, wie z. B. Forestier *et al.* beschreiben (Forestier et al. 2020).

Sturk *et al.* beschreiben ebenfalls die Freisetzung von organischen und anorganischen Stoffen, z. B. Wasserstoff und Kohlenwasserstoffe sowie verdampfter Elektrolyt. Er identifiziert das organische Lösungsmittel im Elektrolyten der LIB sowie das Leitsalz LiPF₆ hierfür (Sturk et al. 2015).

Dies konnten Larsson *et al.* bei einer Untersuchung verschiedener handelsüblicher Li-Ionen-Batterien mit unterschiedlicher Chemie, Zellkonstruktion und Größe feststellen. In den Rauchgasen der LIB wurden HF-Mengen nachgewiesen, die zwischen 20 und 200 mg/Wh der nominalen Energiekapazität der Batterie lagen. Larsson *et al.* kamen zu der Schlussfolgerung, dass die detektierten HF-Werte zu einer gefährlichen Exposition führen können, insbesondere bei großen LIB und in umbauten Räumen (Larsson et al. 2017).

Zum gleichen Schluss kommen Bishop *et al.*. Sie gehen sogar davon aus, dass von LIB freigesetzte Ventinggase im unverbrannten Zustand sogar toxischer sein können, als die Rauchgase, die entstehen, wenn das Gasgemisch verbrennt. Darüber hinaus weisen

auch sie auf die Gefährdung durch Ansammlung von brennbaren Ventinggasen in umschlossenen Räumen und Bereichen hin (Bisschop et al. 2019). Dies wurde inzwischen durch eine Vielzahl an Untersuchungen bestätigt. So beschreiben auch Amano *et al.*, dass ihrer Beobachtung nach die Gase Kohlenstoffmonoxid, Methan und Wasserstoff die höchsten Volumenanteile aufwiesen. Die von ihnen gemessenen Fluorwasserstoff-Konzentrationen lagen unter 10 ppm, dies führten sie jedoch darauf zurück, dass ein Teil des aus den Zellen freigesetzten Fluorwasserstoffs bereits innerhalb des Reaktors reagiert hat und daher in der Gasanalyse nicht mehr nachweisbar war (Amano et al. 2022). Schon 2012 beobachteten Lecocq *et al.* sowohl bei BEV- als auch bei ICEV-Brandversuchen Fluorwasserstofffreisetzungen (Lecocq 2012).

Danach, im Jahr 2015 haben Sturk *et al.* auf die öffentliche Diskussion um die mögliche Freisetzung von Fluorwasserstoff aus LIB Bezug genommen und versucht, diese zu relativieren, indem sie bereits zu diesem frühen Zeitpunkt zu bedenken gaben, dass auch beim Brand von konventionellen Fahrzeugen (ICEV) eine Vielzahl von toxischen Gefahrstoffen, darunter auch Fluorwasserstoff, nachgewiesen werden können (Sturk et al. 2015).

Grundlage dafür waren ihre Messungen bei BEV- und ICEV-Bränden. Sie konnten beobachten, dass die freigesetzte Gesamtmenge an Fluorwasserstoff bei ihren Versuchen bei BEVs ca. 1,5 kg betrug, wobei der Hauptanstieg erst nach ca. 30 Minuten zu verzeichnen war, was sie mit verzögerten Branderfassung der LIB erklärten. ICEV setzten rund die Hälfte an Fluorwasserstoff frei. Sturk *et al.* gingen dabei davon aus, dass der freiwerdende, sehr reaktionsfreudige Fluorwasserstoff sehr schnell z. B. mit dem aufgebrauchten Löschwasser oder anderen vorhandenen Substanzen reagiert und somit nicht mehr für eine akute Gefährdung von Einsatzkräften zur Verfügung steht (Sturk et al. 2015).

Dass Fluorwasserstoff bei der Propagation von LIB entsteht, ist mittlerweile bekannt und in zahlreichen Fällen nachgewiesen. So haben auch Kutschenreuther und Klüh bei ihren Untersuchungen zu geeigneten Löschmethoden von LIB-Bränden in der Spitze bis zu 700 ppm Fluorwasserstoff in den Verbrennungsgasen ihrer Versuchsbrände nachweisen können. Darüber hinaus haben sie eine Korrelation zwischen Wärmefreisetzung und Fluorwasserstoffproduktion beobachtet: die höchste Fluorwasserstofffreisetzung erfolgte stets bei der größten Wärmefreisetzung (Kutschenreuter und Klüh 2020).

Aus der Erkenntnis der Fluorwasserstofffreisetzung leitet sich unmittelbar die Frage nach einer möglichen Gefährdung für Einsatzkräfte, die z. B. im Zuge der Brandbekämpfung damit in Kontakt kommen können, ab.

Dies kann mit den sehr toxischen Eigenschaften, sei es durch Inhalation oder Exposition der Haut durch Fluorwasserstoff bzw. gelöst in Wasser durch Flusssäure erklärt werden (DGUV e. V. 2024b).

Auch Larsson *et al.* heben Fluorwasserstoff und dessen Verbindungen aufgrund deren hoher Gefährlichkeit für Menschen hervor. Sie gehen davon aus, dass die Bildung weiterer Fluorverbindungen, deren toxische Einschätzung nicht ohne weiteres möglich ist, ebenso erfolgt (Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P. et al. 2017).

Van Veen und Koppen stellen dazu die Überlegung an, dass der freiwerdende, äußerst reaktive Fluorwasserstoff, gerade bei Schadensereignissen in geschlossenen Räumen in Kontakt mit den darin befindlichen Oberflächen und Gegenständen kommt. Dabei ist zu erwarten, dass eine rasche Umsetzung des Fluorwasserstoffes erfolgt und dieser somit nicht mehr bzw. nur noch in geringem Umfang für eine mögliche Exposition der Einsatzkräfte zur Verfügung steht. Aus ihrer Sicht sollte das bei der Risikobewertung beachtet werden (van Veen und Koppen).

Zum selben Schluss kommen auch Willstrand *et al.*. Auch sie gehen davon aus, dass das entstehende HF durch intensiven Kontakt mit den vorhandenen Oberflächen nur noch eingeschränkt für eine Exposition von Einsatzkräften zur Verfügung steht (Willstrand et al. 2020).

Um zu eruieren, ob eine erste Risikoabschätzung vor Ort möglich ist, wurde bei LIB-Brandversuchen der DEKRA getestet, ob z. B. Fluorwasserstoff mit der orientierenden Messtechnik, die öffentliche Feuerwehren in Deutschland üblicherweise zur Verfügung haben, nachgewiesen werden kann. Dies konnte bestätigt werden und mittels Prüfröhrchen wurden unter anderem Kohlenstoffmonoxid, Ketone und Fluorwasserstoff detektiert (DEKRA Crash Test Center Neumünster 2021, S. 68).

Interessanterweise scheint jedoch auch die Produktion von Fluorwasserstoff von mehreren Faktoren bzw. dem Zellzustand abhängig zu sein. So beschreiben Rappsilber *et al.*, dass sie beobachtet haben, dass die Produktion von Fluorwasserstoff mit steigendem Ladezustand der LIB bei LFP-Zellen abnahm (Rappsilber et al. 2023, S. 13).

Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass das Gefahrstofffreisetzungsverhalten von LIB, wie beschrieben, von einer Vielzahl von Faktoren (z. B. Ladezustand, Triggermechanismus, Temperatur, Zellchemie etc.) abhängig ist und für Einsatzkräfte an einer Schadensstelle nicht sicher antizipiert werden kann.

Auch Schelb *et al.* kommen in ihrem Forschungsbericht zu dem Schluss, dass Brände von (modernen) Fahrzeugen stets zu einer Freisetzung von toxischen Brandgasen führen, unabhängig von ihrer Antriebsart. Gleichwohl stellt die Beteiligung von LIB am Brandgeschehen ein weiteres Indiz dafür dar, dass sehr genau auf diese Gefährdungen gegenüber der Einsatzkräfte geachtet werden muss (Schelb und Jordan 2020, S. 70).

Eine erhebliche chemische Gefährdung stellen darüber hinaus die krebserzeugenden Eigenschaften von Nickel und Cobalt beim Menschen dar, insbesondere wenn die beiden Schwermetalle in Form von Staub freigesetzt werden, was in Folge eines *thermal runaway* der Fall sein kann. So konnten z. B. Bari *et al.* bei einer Partikelanalyse aus einer Prüfkammer mit abgebrannten NMC-LIB zeigen, dass metallische Elemente (Nickel, Cobalt, Mangan, Aluminium, Lithium) vorhanden sind. Rund 74 % der gemessenen Partikelmasse stammt dabei von der Kathode der NMC-LIB (Di Bari 2020).

Zahlreiche weitere Untersuchungen bestätigen diese Beobachtung (Tschirschwitz *et al.* 2023), (Held *et al.* 2022), (Sturm *et al.* 2022), (Schwank 2022), (Pitzke 2021a), (Pitzke 2021b).

In mehreren Veröffentlichungen wird die Gasfreisetzung als Problem gesehen. So stellt Thomas fest, dass die Freisetzung giftiger Gase während des thermischen Durchgehens von LIB eine ernsthafte Gefahr darstellt und daher ein aktives Forschungsgebiet ist (Thomas 2018).

Auch Amano *et al.* stellen fest, dass die Konzentrationen der freiwerdenden brennbaren Gase und Dämpfe ausreichend sein können, um eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre zu erzeugen (Amano *et al.* 2022).

Dies stellt eine nicht zu unterschätzende Gefahr für Einsatzkräfte dar. So kommen Dinkov *et al.* ebenfalls zu dem Schluss, dass eine 18650-Rundzelle zirka 44 Liter Rauchgas beim thermischen Durchgehen generieren kann, welches giftig und in der Regel brennbar ist (Dinkov *et al.* 2022).

Diese Einschätzung deckt sich mit den Erkenntnissen von Held *et al.*, die von Messungen in mehreren Studien berichten, welche erhebliche Konzentrationen von unter anderem Wasserstoff, sowie verschiedener Kohlenwasserstoffe wie z. B. Methan, Ethen, Propan, Ethan, Buten, Propan und Butan ermittelten. Auch hierbei wurde beobachtet, dass eine Abhängigkeit zwischen der entstehenden Gasmenge und -art und dem Ladezustand der untersuchten Zellen besteht (Held *et al.* 2022, S. 112474).

Es kann daher festgestellt werden, dass chemische Gefährdungen sowohl bei desintegrierten LIB, vor allem aber beim Durchlaufen von LIB-internen Reaktionen, wie z. B. Propagation, *Venting* oder Brand vorhanden sein können. Die Auswirkungen auf Einsatzkräfte, insbesondere wenn die chemische Gefährdung nicht oder zu spät erkannt wird, können dabei sehr schwerwiegend sein.

6.1.4 Brand- und Explosionsgefährdung

Das vermutlich am stärksten im Fokus stehenden Phänomen bei Havarien von LIB sind zunächst Brandereignisse, auch durch entsprechende Berichterstattungen in der Tagespresse dazu (Im Elektroauto-Höllenfeuer 2021).

Wie in 6.1.3 bereits umfangreich dargelegt wurde, verursachen Propagationsreaktionen in LIBs in den allermeisten Fällen Ventingereignisse. Dabei werden brennbare Dampf- / Gasgemische freigesetzt, die auch bei scheinbar kleinen LIBs in kurzer Zeit große Volumina erreichen können. Die austretenden Gase können durch die thermischen Reaktionen in der LIB oder aber auch durch externe Zündquellen gezündet werden. Dies führt entweder zu einer Verpuffung bzw. einer Explosion oder zu einem Brand.

Dabei spielt es gemäß Sun *et al.* zunächst keine Rolle, durch welches Ereignis die Reaktion in der LIB ausgelöst wurde. Egal, ob physikalische Einwirkung (z. B. Schlag, Desintegrieren), interne Fehlfunktion (z. B. fehlerhaftes BMS) oder sonstige Einflüsse (z. B. Überladung, Überhitzung). Im Resultat einer Propagation werden giftige und brennbare Dämpfe und Gase ausgestoßen, die sich entzünden können oder eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre bilden (Sun et al. 2020, S. 1368).

Auch die vfdb beschreibt das Phänomen der Gasfreisetzung bei Fehlfunktionen in LIB. Laut deren Beobachtungen setzt die Produktion der Gase innerhalb der Zellen bereits vor der eigentlichen Propagation ein, die dann beim Brechen der Zellhülle schlagartig freiwerden und die bereits beschriebenen Zustände, insbesondere gefährliche explosionsfähige Gemische verursachen (Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. 2021a).

Typischerweise verbrennen die unter Druck austretenden Gase in Form einer gebündelten Strahlflamme, auch *jetflame* genannt, wie Feng *et al.* beschreiben. Oft können mehrere Abfolgen solcher Strahlflammenbrände beobachtet werden, die mit zeitlichem Versatz aufeinanderfolgen. Feng *et al.* erklären dies damit, dass die verschiedenen Bestandteile der Elektrolytflüssigkeit unterschiedliche Siedepunkte aufweisen und daher nicht alle zur selben Zeit in die Gasphase übergehen, sondern getrennt voneinander. In ihren Versuchen hatten sie bis zu drei getrennte Strahlflammenbildungen beim Abbrand einer LIB beobachtet (Feng et al. 2020, S. 749).

Dies kann zu erheblichen Gefährdungen von Einsatzkräften führen, die das Verlöschen einer Strahlflamme irrtümlicherweise mit dem Erlöschen des LIB-Brandes gleichsetzen und sich dem BEV ungeschützt nähern.

Ebenso problematisch wie das plötzliche Zünden der austretenden Ventinggase kann für Einsatzkräfte das kontinuierliche Austreten brennbarer Dämpfe und Gase aus einer LIB über einen längeren Zeitraum sein, wie Schelb und Jordan feststellen. Im Rahmen eines Versuchs traten aus einer absichtlich in Propagation versetzten LIB über rund 40 Minuten lediglich Elektrolytdämpfe aus. Die Temperatur in der LIB stieg kontinuierlich an, nach 40 Minuten war die Temperatur so weit gestiegen, dass es zur Zündung der Dämpfe kam. Während dadurch zunächst nur eine Strahlflamme entstand, zündete kurz

darauf ein explosives Gasgemisch im Inneren des Fahrzeugs mit lautem Knall (Schelb und Jordan 2020, S. 66).

Auch Hendriksen *et al.* betonen die Gefahr der Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre beim *Venting* einer LIB durch die als Elektrolyt verwendeten Carbonate. Sie haben die am häufigsten zum Einsatz kommenden Elektrolyte hinsichtlich ihrer Explosionsparameter verglichen und kommen zu dem Schluss, dass diese denen von Propan ähnlich sind. Ein Umstand, der vielen Einsatzkräften vermutlich (noch) nicht bewusst sein dürfte (Henriksen *et al.* 2019, S. 7).

Auch Erbe führt aus Sicht der Feuerwehr an, dass die Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre im Zusammenhang mit einer Beschädigung einer LIB, gerade im umschlossenen Bereichen eine der Hauptgefährdungen für Einsatzkräfte darstellt (Erbe 2024, S. 15).

Das beschriebene Prinzip der Strahlflammenbildung und Verursachen einer Explosion ist aber nicht auf den Automobilbereich beschränkt, wie Schelb *et al.* betonen. Gerade auch im Bereich von Elektrofahrrädern, Elektroroller oder *hoverboards* spielt dies gerade im häuslichen Umfeld bei der Brandentstehung zunehmend eine Rolle. Erfahrungsgemäß sind hier auch die Sicherheitseinrichtungen auf einem niedrigeren Niveau als im Fahrzeugbereich und auch die Einhaltung der Gebrauchs- und Sicherheitshinweise nicht immer gegeben. Als besonders brandanfällig haben sich hierbei insbesondere die Ladevorgänge erwiesen (Schelb und Jordan 2020, S. 69).

Hier liegt der Fokus der Gefährdung für Einsatzkräfte weniger auf den direkten Brander eignissen der LIB von z. B. Elektrofahrrädern, sondern auf den dadurch entstehenden Sekundärbränden, z. B. in Wohngebäuden.

Auch wenn Fahrzeuge mit elektrischen Speichersystemen einige spezifische Brand- und Explosionsgefährdungen für Einsatzkräfte darstellen, ist die freiwerdende Energie beim Brand eines BEV mit der eines ICEV vergleichbar, wie Loschinsky beschreibt. Wie er ausführt, wird die freigesetzte Wärme weniger durch das vorhandene Antriebssystem bzw. dessen Energievorrat generiert, vielmehr spielen die im gesamten Fahrzeug verbauten Kunststoffe die entscheidende Rolle (Loschinsky 2020).

Bisschop *et al.* und weitere Veröffentlichungen unterstreichen diese Feststellung. Sowohl die freigesetzte Energiemenge als auch z. B. die Wärmefreisetzungsrate unterscheiden sich bei BEV nicht wesentlich von konventionellen Fahrzeugen. (Bisschop *et al.* 2020, S. 2676), (Sun *et al.* 2020, S. 1367)

Auch was die Brandhäufigkeit angeht, kann keine erhöhte Gefährdung von Einsatzkräften durch Fahrzeuge mit elektrischen Speichersystemen beobachtet werden. So erläutert die Bundesregierung in einer Anfrage, dass bei Elektrofahrzeugen kein erhöhtes Brandaufkommen zu beobachten ist (Bundestag 2021).

Es sind Brandereignisse möglich, die unabhängig von der Antriebsart elektrisch oder konventionell zu erheblichen Gefährdungen von Einsatzkräften führen können. Dies sind insbesondere Brände in umschlossenen Räumen wie Tiefgaragen oder Tunnels. Durch die Rauchentwicklung und Hitzefreisetzung stellen solche Einsätze stets eine große Herausforderung für Einsatzkräfte dar, wie Stanzel feststellt (Stanzel 2020).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei Bränden von BEVs in Summe keine größeren Energiemengen freigesetzt bzw. Temperaturen erreicht werden als bei konventionellen Fahrzeugen gleichen Entwicklungsstandes (Baujahr). Hieraus resultieren keine anderen oder größeren Gefahren für Einsatzkräfte durch den Einsatz von BEV. Wobei sich BEVs jedoch deutlich vom Brandverhalten herkömmlicher Fahrzeuge unterscheiden, kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Freisetzen von brennbaren Dämpfen- und Gasen (Venting) aus einer propagierenden LIB, die zum Teil schwerer als Luft sind, unvermittelt zünden oder bei Ansammlung in geschlossenen Räumen explodieren können.
- Auftreten von Strahlflammen, die mit einer Flammenlänge von bis zu zwei Metern und zum Teil und hoher Geräuschentwicklung abbrennen können. Das Auftreten mehrerer Strahlflammenereignisse hintereinander kann von länger andauernden Pausen unterbrochen sein.
- Zeitverzögerte Brandentstehung in beschädigten LIB, die sich zum Teil auch mehrere Tage nach einem initialen Ereignis (wieder-) entzünden können.

Diese Eigenschaften sind alle für sich bzw. in Summe geeignet, erhebliche Gefährdungen mit schwerwiegenden Folgen für Einsatzkräfte zu erzeugen.

6.1.5 Biologische Gefährdungen

Bei Einsätzen an Fahrzeugen mit elektrischen Antriebssystemen können momentan keine biologischen Gefährdungen erkannt werden, die durch die Antriebsart bedingt sind. Daher werden biologische Gefährdungen in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

6.1.6 Thermische Gefährdungen

Wie unter 6.1.4 bereits beschrieben wurde, können Einsatzkräfte bei Arbeiten an verunfallten BEVs unter Umständen durch spontan zündende Dampf-/Gasgemische und das Auftreten von Strahlflammen gefährdet werden.

Diese Phänomene stellen in erster Linie erhebliche thermische Gefährdungen durch die Einwirkungen von direkter Beflammung und Infrarotstrahlung auf die Einsatzkräfte dar.

6.1.7 Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen

Unter physikalischen Einwirkungen am Arbeitsplatz subsummiert die BAuA z. B. Belastungen durch Lärm, Vibrationen oder abweichende atmosphärische Druckverhältnisse. Aber auch Einwirkungen von optischer, elektromagnetischer oder ionisierender Strahlung wird hierbei betrachtet (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2021). Der Einsatz von elektrischen Speichersystemen als Energieträger im Straßenverkehr führt nicht zu derlei Arten von Gefährdungen für Einsatzkräfte.

6.1.8 Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen

Die Tätigkeiten von Einsatzkräften im Zusammenhang mit verunfallten Fahrzeugen ist per se nicht frei von Gefährdungen. Insbesondere die weder vorausseh- noch planbaren Arbeitsumgebungsbedingungen an Einsatzstellen, z. B. im Zusammenhang mit Verkehrsunfällen können zum Teil nicht unerhebliche Gefährdungen, wie durch den fließenden Verkehr, durch die Topografie, die Tageszeit oder durch Witterungseinflüsse, darstellen. Der Energieträger elektrisches Speichersystem der z. B. bei einem Verkehrsunfall beteiligten Fahrzeuge hat in der Regel keinen Einfluss auf die Arbeitsumgebungsbedingungen der beteiligten Einsatzkräfte. Daher werden die Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen in dieser Arbeit nicht betrachtet, obgleich sie in der Gesamtschau sehr wohl eine Rolle spielen, jedoch nicht durch elektrische Speichersysteme der Fahrzeuge beeinflusst werden.

6.1.9 Gefährdungen durch physische Belastungen

Unter physischen Belastungen führt die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin z. B. manuelles Heben, Ziehen und Tragen von Lasten, manuelle Arbeitsabläufe, Ganzkörperbewegungen aber auch Zwangshaltungen auf (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2021).

All diese Belastungen können auf Einsatzkräfte im Rahmen von Einsätzen der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen wirken. Ein Zusammenhang zwischen der Antriebsart bzw. der Art des Energieträgers von Verkehrsträgern und daraus resultierenden, spezifischen physischen Belastungen, lässt sich im Falle von elektrischen Speichersystemen nicht erkennen.

6.1.10 Gefährdungen durch psychische Faktoren

In der Normung wird der Begriff der psychischen Belastung wie folgt definiert: „[...] Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse, die von außen auf den Menschen zukommen und psychisch auf ihn einwirken [...]“ (DIN EN ISO 10075-1).

Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin subsummiert unter anderem Zeitdruck, unzulängliche Qualifikation für die zu bewältigende Arbeitsaufgabe und traumatisierende Ereignisse als wesentliche psychische Faktoren bei der Arbeit (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2021).

Insbesondere das Thema unzureichende Qualifikation für die zu bewältigende Arbeitsaufgabe kann ein relevanter Faktor für eine psychische Gefährdung von Einsatzkräften sein. So stellt z. B. Georgiev bei einer Umfrage unter österreichischen Einsatzkräften fest, dass aus deren Sicht eine der Hauptgefahren beim Einsatz an Verkehrsträgern mit elektrischen Speichersystemen das fehlende Fachwissen bzw. ein Mangel an umfassender Schulung im Umgang mit dieser Technik ist (Georgiev 2021).

6.2 Gefährdungen bei Wasserstoff als Energieträger

6.2.1 Mechanische Gefährdungen

Wie Bertau beschreibt, erfolgt die Bevorratung von Wasserstoff in Fahrzeugen unter hohem Druck in Tanks. Dieser kann, je nach Ausführung, bis zu 700 bar betragen. Daher ist es theoretisch vorstellbar, dass es z. B. durch Materialfehler zum Bersten eines Tanks kommt. Aufgrund der hohen Druckverhältnisse kann dies zu erheblichen mechanischen Gefährdungen von Einsatzkräften durch wegschleudernde Fahrzeugteile führen (Bertau 2016)

Zum gleichen Schluss kommen Sun und Li, die ebenfalls eine Gefährdung durch stark beschleunigte Teile durch einen Tankzerknall und die daraus auftretende Druckwelle identifiziert haben (Sun und Li 2021, S. 37680–37681).

Aufgrund der chemischen Eigenschaften von Wasserstoff ist es jedoch nur schwer vorstellbar, dass lediglich ein Behälterzerknall erfolgt. Wahrscheinlicher ist es, dass dieser mit einer Entzündung einhergeht und dadurch noch weitere Gefährdungen für Einsatzkräfte resultieren.

6.2.2 Elektrische Gefährdungen

Wie unter 5.2 bereits beschrieben wurde, geht die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger in den meisten Technologiekonzepten mit dem Einsatz der Brennstoffzellentechnik einher, um die notwendige elektrische Energie zum Antrieb zu erzeugen. Daher verfügen diese Fahrzeuge ebenfalls über ein Hochvoltsystem mit Speicher. Dieser ist in der Regel zwar mit weniger Kapazität ausgeführt, vom Prinzip her aber identisch wie bei BEV. Für solche Fahrzeuge können daher die gleichen Gefährdungen wie bereits unter 6.1.2 beschrieben angenommen werden. Zum gleichen Schluss kommen auch Sun und

Li. Auch sie identifizieren, neben der Eigenschaften des Wasserstoffs, die Komponenten des Hochvoltsystems als Risiko für die Einsatzkräfte (Sun und Li 2021, S. 37680–37681). Wird die notwendige Energie durch direkte Verbrennung des Wasserstoffs im Motor erzeugt, sind die zu erwartenden elektrischen Gefährdungen vergleichbar mit einem ICEV mit einem 12 oder 24 Volt Bordsystem.

6.2.3 Chemische Gefährdungen

Die chemischen Gefährdungen für Einsatzkräfte spielen, neben der Brand- und Explosionsgefährdung, eine eher untergeordnete Rolle. So weist die GESTIS Stoffdatenbank der DGUV lediglich auf die Möglichkeit der Sauerstoffverdrängung bei massiver Wasserstofffreisetzung hin, da bisher keine weiteren toxischen Wirkungen nachgewiesen werden konnten (DGUV e. V. 2024d). Auch Sun und Li identifizieren in ihren Ausführungen ebenfalls lediglich die sauerstoffverdrängende Wirkung von Wasserstoff, merken aber gleichzeitig an, dass dieses Szenario in Verbindung mit Fahrzeugen im Freien eher unwahrscheinlich sein wird (Sun und Li 2021, S. 37681).

6.2.4 Brand- und Explosionsgefährdung

Aufgrund der chemisch-physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff (siehe auch Punkt 5.2.2) sind die potenziellen Brand- und Explosionsgefährdungen für Einsatzkräfte im Zusammenhang mit Einsatzmaßnahmen sehr ausgeprägt. So kann - gemäß Bertau - austretender Wasserstoff, je nach Druck im Tank des Fahrzeugs und Durchmesser der Austrittsöffnung mit einer Flammenlänge von bis zu zwanzig Meter brennen. Die dabei freigesetzte Energie würde auch noch in vierzig Meter Entfernung zu drittgradigen Verbrennungen auf der ungeschützten Haut führen (Bertau 2016).

Erschwerend kommt hinzu, dass Wasserstoff nahezu ohne Lichtemission verbrennt, wie Sun betont. Gerade bei Tageslicht ist auch eine große Wasserstofflamme ohne technische Hilfsmittel wie z. B. eine Wärmebildkamera nur schwer zu erkennen (Sun und Li 2021, S. 37680).

Auch der österreichische Bundesfeuerwehrverband erachtet diese Eigenschaft, neben z. B. der niedrigen notwendigen Zündenergie und der möglichen Selbstentzündung bei hoher Abströmgeschwindigkeit als wichtige Information in seinen Schriften für Einsatzkräfte. Er empfiehlt daher die möglichen Abblasstellen sorgfältig zu kontrollieren (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 14). Gemäß Schelb und Jordan erfolgt beim Ausströmen von Wasserstoff eine schnelle Durchmischung mit der Umgebungsluft. Dadurch erfolgt im Freien in der Regel eine schnelle Verdünnung bis unterhalb der un-

teren Explosionsgrenze. Dem kann jedoch die sogenannte Rezirkulation entgegenwirken: freiwerdender Wasserstoff vermischt sich mit bereits entstandenem Wasserstoff-Luft-Gemisch, z. B. in umschlossenen Räumen. Dies kann dazu führen, dass sehr schnell zündfähige Gemische, unter Umständen auch mit großer Ausdehnung, entstehen (Schelb und Jordan 2020).

Neben der Brennbarkeit ist die Explosionsfähigkeit von Wasserstoff in Mischung mit der Umgebungsluft eine äußerst nachteilige Eigenschaft für Einsatzkräfte. Diese wird insbesondere dann wirksam, wenn Wasserstoff nicht im Freien, sondern in umschlossenen Räumen austritt.

So hat Brzezinska analysiert, dass in Tiefgaragen ohne technische Lüftungsmaßnahmen stets eine hohe Explosionsgefahr zu erwarten ist, wenn Wasserstoff aus einem Fahrzeug austritt. Nur beim Vorhandensein solcher Anlagen konnte die Wasserstoffkonzentration so gesenkt werden, dass keine akute Explosionsgefahr mehr bestand (Brzezińska D.2020).

Laut den Ausführungen von Schelb und Jordan sind die Wirkungen von Wasserstoffexplosionen je nach den Umgebungsbedingungen sehr unterschiedlich, zumindest was die Druckwelle betrifft. Entzünden sich unverdämmte Gaswolken im Freien, entsteht kaum eine Gefährdung durch einen Druckanstieg. Im Gegensatz dazu treten in umschlossenen Räumen hohe Drücke auf, die sich zum Teil auch über weite Strecken ausdehnen können. Als eindrucksvolles Beispiel geben Schelb und Jordan eine Wasserstofffreisetzung in einem Straßentunnel an: erfolgt dort die Zündung der Gaswolke, läuft die dabei entstehende Druckwelle nahezu ungebremst durch den Tunnel und kann selbst noch an den Portalen eine erhebliche Gefährdung für Einsatzkräfte darstellen (Schelb und Jordan 2020, S. 72–73).

6.2.5 Biologische Gefährdungen

Bei Einsätzen an Fahrzeugen mit Wasserstoff als Energieträger können momentan keine biologischen Gefährdungen erkannt werden, die durch die Antriebsform verursacht werden. Daher werden biologische Gefährdungen in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

6.2.6 Thermische Gefährdungen

Wie unter 6.2.4 bereits ausgeführt, verbrennt Wasserstoff bei guten Lichtverhältnissen (Tageslicht) mit für das Auge des Menschen nahezu unsichtbarer Flamme. Damit besteht die Gefahr, dass Einsatzkräfte, die sich einem Fahrzeug mit abströmender und brennender Wasserstoffflamme nähern, dies zu spät erkennen und dann erheblichen thermischen Gefährdungen ausgesetzt sein können.

Wie Bertau beschreibt, besteht bei entsprechend großer Flammenlänge bereits bei einer Annäherung ab zwanzig Meter die Gefahr der drittgradigen Verbrennung auf ungeschützter Haut (Bertau 2016).

Eine zusätzliche Gefährdung kann laut Kirschke die extrem niedrige Temperatur von flüssigem Wasserstoff darstellen, die bei Hautkontakt zu massiven Gewebeschäden führen kann (Kälteverbrennungen). Tritt tiefkalter Wasserstoff aus, kann dies zu Lachenbildung führen, die jedoch sehr schnell verdunsten (Kirschke 2020, S. 42).

6.2.7 Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen

Wie unter 6.2.4 bereits beschrieben, ist die Gefährdung durch die Entzündung von Wasserstoff-Luftgemischen eine nicht zu unterschätzende Gefährdung für Einsatzkräfte. Neben den unmittelbaren Auswirkungen einer Explosion können auch physikalische Einwirkungen wie z. B. Druckwellen zu sekundären Gefährdungen für Einsatzkräfte führen. Insbesondere in umschlossenen Räumen können sich diese sehr schnell über weite Distanzen fortpflanzen und somit auch Einsatzkräfte gefährden, die sich weitab der eigentlichen Explosionsstelle befinden (Schelb und Jordan 2020, S. 72–73). Ein weiterer Aspekt ist der hohe Schalleistungspegel, der beim (unkontrollierten) Abströmen von Wasserstoff entsteht. Je nach Druck und Austrittsöffnung ist hier eine erhebliche Lärmgefahr möglich, die auf die Einsatzkräfte vor Ort einwirkt.

6.2.8 Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen

Habib *et al.* beschreiben eine Fallkonstellation, bei welcher in der Tat die Umgebungsbedingungen dazu beitragen können, eine Gefährdung herbeizuführen. Gelangt flüssiger Wasserstoff, z.B. aus einem Tankfahrzeug oder einem Schienenkesselwagen unter bzw. auf Wasser, kann es zu einem sehr schnellen Phasenübergang kommen. Dies führte in ihren Versuchen reproduzierbar zum Entzünden der entstandenen Wasserstoffwolke, was mit entsprechenden Druckwellen und Schallemissionen einherging (A. K. Habib 2024).

6.2.9 Gefährdungen durch physische Belastungen

Ein Zusammenhang zwischen der Antriebsart bzw. der Art des Energieträgers von Verkehrsträgern und daraus resultierenden, spezifischen physischen Belastungen, lässt sich im Falle von Wasserstoffgetriebenen Fahrzeugen nicht erkennen, siehe hierzu auch Punkt 6.1.9.

6.2.10 Gefährdungen durch psychische Faktoren

Insbesondere das Thema unzureichende Qualifikation für die zu bewältigende Arbeitsaufgabe kann ein relevanter Faktor für eine psychische Gefährdung von Einsatzkräften sein. So stellt z. B. Georgiev bei einer Umfrage unter österreichischen Einsatzkräfte fest, dass aus deren Sicht eine der Hauptgefahren beim Einsatz an Verkehrsträgern mit elektrischen Speichersystemen das fehlende Fachwissen bzw. ein Mangel an umfassender Schulung im Umgang mit dieser Technik ist (Georgiev 2021).

Da Fahrzeuge mit Wasserstoff als Energieträger momentan noch sehr viel weniger als BEV im öffentlichen Straßenverkehr anzutreffen sind, kann davon ausgegangen werden, dass dies für die Art des Energieträgers ebenfalls als gültig betrachtet werden kann.

6.3 Gefährdungen bei LNG als Energieträger

6.3.1 Mechanische Gefährdungen

Wie unter 6.2.1 bereits beschrieben, besteht bei unter Druck gelagerten Gasen bzw. unter Druck verflüssigten Energieträgern im Fahrzeug stets eine mechanische Gefährdung für Einsatzkräfte, wenn ein Druckbehälter schlagartig versagt und es dadurch zum Zerknall des Druckbehälters kommt. Teile des Druckbehälters bzw. weitere Fahrzeugteile können dadurch erheblich beschleunigt werden und Einsatzkräfte treffen. Wie unter anderem Steller beschreibt, wird dieser physikalische Prozess *boiling liquid expanding vapour explosion* (BLEVE) genannt. Dieser kann z. B. durch das Versagen der Überdruckeinrichtungen und gleichzeitiger Erwärmung im LNG-Tank erfolgen. Steigt die Temperatur im Tank über den Siedepunkt des LNGs, kann beim Versagen oder zu geringer Abfuhrleistung des Überdrucksystems das LNG im Tank zu sieden beginnen. Die damit verbundene Drucksteigerung kann zum spontanen Versagen des Tanks und damit der plötzlichen Freisetzung des Inhalts führen. (Wolbers et al 2015) (Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. 2021b), (Steller 2021).

6.3.2 Elektrische Gefährdungen

Bei Einsätzen an Fahrzeugen mit LNG als Energieträger können momentan keine elektrischen Gefährdungen erkannt werden, die durch die Antriebsform verursacht werden und über die elektrischen Gefährdungen von ICEV hinausgehen. Daher werden elektrische Gefährdungen beim Energieträger LNG in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

6.3.3 Chemische Gefährdungen

Methan wird gemäß der GESTIS-Datenbankauskunft weder über die Haut noch über den Magen-trakt in den Körper aufgenommen. Der Hauptaufnahmeweg ist daher durch Einatmen, wobei Methan an sich nahezu keine humantoxischen Effekte aufweist (DGUV e. V. 2024c). Als wesentliche chemische Gefährdung kann daher die sauerstoffverdrängende Wirkung identifiziert werden, insbesondere wenn die Exposition in umschlossenen Räumen stattfindet, wie Steller beschreibt (Steller 2021).

6.3.4 Brand- und Explosionsgefährdung

Kommt es zur unfallartigen Freisetzung von LNG sind zum Teil erhebliche Gefährdungen durch das Entstehen von Bränden oder Explosionen sehr wahrscheinlich. Gasförmiges Methan ist in einer Konzentration zwischen 4,4 und 17 Vol % in der Umgebungsluft explosionsfähig (DGUV e. V. 2024c).

Wolbers *et al.* beschreiben, dass im Falle einer LNG-Freisetzung sich dieses als Wolke ausbreitet und nach einer Zündung diese mit einer Geschwindigkeit von 90-120 Meter pro Sekunde abbrennt. Bildet das ausgetretene LNG z. B. auf Beton eine Flüssigkeitslache, brennen ca. 14 mm des LNG-Spiegels pro Minute ab. Da die Verbrennung von LNG mit sehr wenig Rußbildung einhergeht, ist die freigesetzte Strahlungswärme hoch, da Ruß die entstehende Energie zum Teil absorbiert (Wolbers et al 2015).

Gemäß Ramsde *et al.* wird das Abbrandverhalten von LNG auch dadurch beeinflusst, ob sich die Lache auf dem Wasser oder an Land befindet. Gemäß ihrer Einschätzung können ausgedehnte, brennende LNG-Lachen nicht gelöscht werden, solange LNG weiterhin in die Lache zuströmt. Um einen Löscherfolg zu erzielen, muss daher zunächst die weitere LNG-Zufuhr unterbunden werden (Ramsde et al. 2015).

Eine weitere Gefährdung beschreiben Ramsde *et al.* beim verzögerten Zünden von LNG-Wolken im Freien: Durch die schnelle und schlagartige Flammenausbreitung kann es, z. B. bei dichter Bebauung zu Überdrücken bzw. Druckwellen und damit verbundenen Schäden und Gefährdungen für Einsatzkräfte und Strukturen kommen (Ramsde et al. 2015).

Tritt LNG unter Druck aus und bildet dabei Dampf Wolken, besteht gemäß Ramsde *et al.* auch die Gefahr eines Strahlbrandes nach der Zündung. Dieser breitet sich vom Punkt der Freisetzung strahlförmig aus und erzeugt eine hohe Wärmeintensität von bis zu 300 kW/m². Werden insbesondere metallische Strukturen bzw. Bauteile damit direkt beflammt, kann es sehr schnell zum strukturellen Versagen der Konstruktion kommen. Insbesondere wenn benachbarte LNG- oder andere Gastanks von einem Strahlbrand beaufschlagt werden, können diese schnell und spontan versagen und zu einem BLEVE genannten Behälterversagen führen (Ramsde et al. 2015).

Vor dem Behälterversagen durch eine direkte Beflammung kommt es gemäß Ramsde *et al.* in der Regel zu einem Temperatur- und Druckanstieg durch die Wärmeeinwirkung. Öffnet sich dann die Hülle, z. B. weil der Innendruck die Materialfestigkeit (evtl. geschwächt durch eine Beflammung) übersteigt, kommt es zum schlagartigen Freisetzen und Verdampfen der siedenden Flüssigkeit. Dies hat in der Regel einen massiven Feuerball sowie damit verbundene Druckwellen zur Folge. Die Gefährdungen für die in der Nähe eines BLEVE befindlichen Einsatzkräfte sind immens (Ramsde *et al.* 2015).

Im Gegensatz z. B. zu Wasserstoff ist die Verdunstung von ausgeströmten LNG durchaus mit erheblichem Zeitverzug verbunden. So berichten Wolbers *et al.* davon, dass das restlose Verdampfen einer 30 Zentimeter tiefen LNG-Lache, in Abhängigkeit von den Bodenbeschaffenheiten und der klimatischen Einflüsse, bis zu zehn Stunden in Anspruch nehmen kann (Wolbers *et al.* 2015). Während dieser Zeit besteht für die beteiligten Einsatzkräfte stets auch eine Brand- und Explosionsgefahr. Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei LNG-Freisetzen die Gefährdungen durch Brände, Explosionen oder durch Strahlbrände verursachte Sekundärereignisse ein erhebliches Risiko für Einsatzkräfte darstellen können.

6.3.5 Biologische Gefährdungen

Bei Einsätzen an Fahrzeugen mit LNG als Energieträger können momentan keine biologischen Gefährdungen erkannt werden, die durch die Antriebsform verursacht werden. Daher werden biologische Gefährdungen beim Energieträger LNG in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

6.3.6 Thermische Gefährdungen

Ähnlich wie bei der Verbrennung von Wasserstoff, ist auch eine LNG-Flamme bei Tageslicht nur schlecht sichtbar. Steller beschreibt die visuelle Wahrnehmung mit einem Flimmern der Luft, ähnlich wie man es von Hitzeblimmern kennt. Trotzdem ist die dabei freiwerdende Wärmestrahlung rund 60% höher als z. B. bei Dieselmotorkraftstoff (Steller 2021). Einsatzkräfte laufen also auch bei brennendem LNG Gefahr, erhebliche thermische Schäden durch unbeabsichtigtes Annähern an eine LNG-Flamme zu erleiden.

Ein weiterer Aspekt ist, wie unter 5.3.2 bereits beschrieben, dass LNG zumeist mit einer Temperatur von -140°C im Fahrzeugtank gelagert wird.

Kommt es zur Freisetzung, ist das kalte Gas zunächst schwerer als Luft, wie Wolbers *et al.* beschreiben. Wird es auf über -105°C erwärmt, beginnt es aufzusteigen und kann auch dann noch zu Kälteverbrennungen führen (Wolbers *et al.* 2015).

Steller beschreibt darüber hinaus auch noch die Gefahr der Lungenschädigung beim Einatmen des kalten Gases. Haut- und Augenkontakt mit LNG direkt, z. B. durch Spritzer, führen stets zu schweren Verletzungen durch Kälteverbrennung. Er weist in diesem Zusammenhang ebenfalls darauf hin, dass die gängige persönliche Schutzausrüstung (PSA9 der Einsatzkräfte nicht wirksam vor diesen Gefährdungen schützt (Steller 2021). Auch Wolbers *et al.* führen diese Gefährdungen auf, ergänzen aber noch den Aspekt der Wirkung von LNG auf Material und Umgebung: hier kann es durch LNG-Beaufschlagung zum Verspröden und damit zum Versagen von Material und Anlagen, wie z. B. Rohrleitungen kommen, was wiederum Gefährdungen für Einsatzkräfte mit sich bringen kann (Wolbers et al 2015).

Die kryogenen Lagerbedingungen von LNG bedeuten, wie beim Wasserstoff, zusätzliche Gefährdungen für Einsatzkräfte. Herkömmliche Einsatzkleidung der Feuerwehr bietet hiergegen keinen Schutz.

Erschwerend kommt beim LNG hinzu, dass freigesetztes LNG zur Lachenbildung neigt und die Verdunstung zum Teil einen erheblichen Zeitraum in Anspruch nimmt.

6.3.7 Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen

Tritt ein Gas unter Druck (un)kontrolliert aus, geht dies in der Regel mit einem hohen Schalleistungspegel einher. Bei entsprechend hohen Drücken kann also auch ein LNG-Austritt zu einer Gefährdung durch Lärm für Einsatzkräfte führen. Auch Einwirkungen durch Schall- und Druckwellen, ausgelöst durch die Explosion von verdämmten LNG/Luftgemischen sind vorstellbar.

6.3.8 Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen

Ramsde *et al.* beschreiben eine Fallkonstellation, bei welcher in der Tat die Umgebungsbedingungen dazu beitragen können, eine Gefährdung herbeizuführen. Gelangt LNG in warmes Wasser, kann es zu einem schnellen Phasenübergang kommen. Wird das tiefkalte LNG sehr schnell mit Wasser vermischt, das wärmer als 12 °C ist, beginnt es zu sieden und spontan zu verdampfen. Dies kann zu heftigen Reaktionen bis hin zum Entzünden führen (Ramsde et al. 2015).

6.3.9 Gefährdungen durch physische Belastungen

Physische Belastungen können auf Einsatzkräfte im Rahmen von Einsätzen der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen wirken. Ein Zusammenhang zwischen der Antriebsart bzw. der Art des Energieträgers von Verkehrsträgern und daraus resultierenden,

spezifischen physischen Belastungen, lässt sich im Falle von LNG getriebenen Fahrzeugen nicht erkennen.

6.3.10 Gefährdungen durch psychische Faktoren

Insbesondere das Thema unzureichende Qualifikation für die zu bewältigende Arbeitsaufgabe kann ein relevanter Faktor für eine psychische Gefährdung von Einsatzkräften sein, siehe hierzu auch Punkt 6.1.10..

Da Nutzfahrzeuge mit LNG als Energieträger momentan noch eher selten im öffentlichen Straßenverkehr anzutreffen sind, kann davon ausgegangen werden, dass dies für diese Art des Energieträgers ebenfalls als gültig betrachtet werden kann.

6.4 Gefährdungen bei CNG als Energieträger

6.4.1 Mechanische Gefährdungen

Wie unter 6.2.1 bereits beschrieben, besteht bei unter Druck gelagerten Gasen / Energieträgern im Fahrzeug stets eine mechanische Gefährdung für Einsatzkräfte, wenn ein Druckbehälter schlagartig versagt und es dadurch zum Zerknall des Druckbehälters kommt. Teile des Druckbehälters bzw. weitere Fahrzeugteile können dadurch erheblich beschleunigt werden und Einsatzkräfte treffen.

Auch Barilo beschreibt dieses, zum Teil spontan auftretende Phänomen bei CNG-Fahrzeugtanks, merkt jedoch an, dass durch Verbesserungen in der Produktion der Gasspeicher das spontane Versagen von Gasspeichern erheblich reduziert werden konnten. Er führt dies insbesondere auf die Einführung von Qualitätskontrollen und die Schaffung von Normen in diesem Bereich zurück (Barilo 2018, S. 5).

6.4.2 Elektrische Gefährdungen

Bei Einsätzen an Fahrzeugen mit CNG als Energieträger können momentan keine elektrischen Gefährdungen erkannt werden, die durch die Antriebsform verursacht werden und über die elektrischen Gefährdungen von ICEV hinausgehen. Daher werden elektrische Gefährdungen beim Energieträger CNG in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

6.4.3 Chemische Gefährdungen

Methan wird gemäß der GESTIS-Datenbankauskunft weder über die Haut noch über den Magentrakt in den Körper aufgenommen. Der Hauptaufnahmeweg ist daher durch Einatmen, wobei Methan an sich nahezu keine human-toxischen Effekte aufweist

(DGUV e. V. 2024b). Als wesentliche chemische Gefährdung kann daher die sauerstoffverdrängende Wirkung identifiziert werden, insbesondere wenn die Exposition in umschlossenen Räumen stattfindet, wie Steller beschreibt (Steller 2021).

6.4.4 Brand- und Explosionsgefährdung

Bei Fahrzeugen mit CNG-Gasspeichern geht, wie bei LNG-Fahrzeugen auch, die größte Brand- und Explosionsgefahr von dem mitgeführten Methan aus.

Gasförmiges Methan ist in einer Konzentration zwischen 4,4 und 17 Vol % in der Umgebungsluft explosionsfähig (DGUV e. V. 2024c).

Gemäß dem österreichischen Bundesfeuerwehrverband werden bei PKWs bis zu 35 m³ Methan mitgeführt. Bei dessen Freisetzung können bis zu 700 m³ an gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre entstehen. Bei Nutzfahrzeugen wie LKWs oder Bussen können Größenordnungen von bis zu rund 4.500 m³ an gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre erreicht werden (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 16).

Lönnermark und Ingason setzen die freiwerdende Energie beim Versagen und anschließendem Zünden eines 130-Liter CNG-Tanks mit der Wirkung von 1,85 Kilogramm des Sprengmittels Trinitrotoluol – TNT gleich. Ihrer Einschätzung zufolge ist allein die dabei entstehende Druckwelle in einem Radius von zwölf Metern um den Tank tödlich. Wie schwer die Auswirkung einer zündenden Methan-Dampfwolke ist, hängt nach ihrer Einschätzung auch mit dem Zündzeitpunkt zusammen: erfolgt diese zeitnah nach der Freisetzung, ergeben sich weniger gravierende Auswirkungen als nach der intensiven Durchmischung mit der Umgebungsluft. Dies kann zu einem stöchiometrisch günstigen Mischungsverhältnis und damit zu energiereicheren Reaktionen führen (Lönnermark und Ingason 5-6, 2016, S. 248).

Welche Faktoren können zu einem Versagen des Gasspeichers und damit zum Freisetzen des darin gelagerten CNGs führen?

Wie Schelb und Jordan ausführen, ist dazu in der Regel eine Einwirkung von außen notwendig. Am häufigsten sind ihrer Einschätzung nach mechanische Einwirkungen (z. B. Unfall), Beflammung von außen und Betankungsvorgänge die Auslöser für ein Behälterversagen. Theoretisch ist auch ein Behälterzerknall ohne anschließende Zündung der CNG-Dampfwolke möglich, jedoch eher selten zu beobachten. In der Regel kommt es, wenn auch mitunter etwas verzögert, zu einer Zündung. Als besonders kritische Belastung sehen Schelb und Jordan die Beflammung von außen: nur wenn die Überdruckeinrichtung funktionsfähig ist und früh genug anspricht, ist diese in der Lage den Überdruck im Behälter so weit zu reduzieren, dass der Behälter nicht versagt. Bei sehr intensiver Beflammung von außen kann der Innendruck so schnell steigen, dass die Druckentlas-

tung nicht ausreicht und es trotzdem zum Bersten kommt. Gleiches gilt bei längerer Beflammung von Kohlefaserverbundbehältern: wird die Behälterstruktur zu stark erhitzt, verlieren diese ihre strukturelle Integrität und können dem Innendruck nicht mehr standhalten (Schelb und Jordan 2020, S. 72).

Lönnermark und Ingason berichten auch über eine internationale Erhebung zur Ursache von CNG-Behälterexplosionen bei Fahrzeugen: im untersuchten Zeitraum von 1976 bis 2010 wurden 50 Ereignisse ermittelt, die nicht auf Vorsatz oder missbräuchliche Anwendung zurückzuführen waren. Die meisten davon wurden durch Brandeinwirkung von außen oder beim Betanken verursacht. Sie leiten daher daraus ab, dass Einsatzkräfte dies bei ihren Einsätzen beachten und ihre Taktik entsprechend anpassen müssen (Lönnermark und Ingason 5-6, 2016, S. 248).

Auch eine Studie des US-Verkehrsministeriums kommt gemäß Lönnermark und Ingason zu einem ähnlichen Ergebnis: bei den meisten Fällen gingen Brände bzw. Explosionen nicht vom CNG-Behälter aus, sondern von anderen Bereichen der Fahrzeuge. Es waren also zumeist sekundäre Erscheinungen, die durch äußere Einflüsse auf den Gasspeicher entstanden. Interessant ist in diesem Zusammenhang jedoch auch, dass in rund 35% der dokumentierten Fälle die thermische Überdruckeinrichtung des Gasspeichers nicht funktioniert hat. Dies führt nahezu unweigerlich zum schlagartigen Versagen des Behälters. In mehr als 40 % der Fälle hat die Überdruckeinrichtung das CNG nach außen abgeführt, dieses wurde dabei in der überwiegenden Zahl der Fälle auch gezündet und erzeugte dadurch Strahlflammen (Lönnermark und Ingason 2018, S. 98).

Ein weiterer Aspekt ist das Freiwerden von CNG im umschlossenen Bereich von Verkehrsanlagen, z. B. in Tunneln oder Tiefgaragen.

Bei entsprechenden Simulationen kommen Schelb und Jordan zu dem Schluss, dass in einer Tiefgarage schnell eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre entsteht, wenn Methan aus einem Gasspeicher eines Fahrzeugs ausströmt. Diese Atmosphäre wird auch über raumluftechnische Anlage transportiert und kann somit zu einer räumlichen Ausdehnung des Gefahrenbereichs beitragen. Bei einer Zündung ist damit zu rechnen, dass es innerhalb der Lüftungsanlage zu einem hohen Druckanstieg und einem großflächigen Versagen der Anlage kommt. Dies kann zusätzliche Risiken für Einsatzkräfte darstellen (Schelb und Jordan 2020, S. 56).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei CNG-betriebenen Fahrzeugen die Gefährdungen durch Brände, Explosionen oder durch Strahlbrände verursachte Sekundäreignisse ein erhebliches Risiko für Einsatzkräfte darstellen können.

6.4.5 Biologische Gefährdungen

Bei Einsätzen an Fahrzeugen mit CNG als Energieträger können momentan keine biologischen Gefährdungen erkannt werden, die durch die Antriebsform verursacht werden. Daher werden biologische Gefährdungen beim Energieträger CNG in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

6.4.6 Thermische Gefährdungen

Wie bei Wasserstoff und LNG besteht auch bei CNG die Gefahr der Strahlflammenbildung, wenn Gasspeicher beflammt werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn eine thermische Überdrucksicherung des Lagerbehälters anspricht.

So warnt auch der österreichische Bundesfeuerwehrverband vor diesem Phänomen. Gemäß seinen Ausführungen können unvermittelt Strahlflammen von mehreren Metern Länge auftreten. Eine Abstrahlrichtung ist nicht normativ festgelegt und kann je nach Fahrzeug sehr unterschiedlich sein (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 16).

6.4.7 Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen

Tritt ein Gas unter Druck (un)kontrolliert aus, geht dies in der Regel mit einem hohen Schalleistungspegel einher. Bei entsprechend hohen Drücken kann also auch ein CNG-Austritt, z. B. beim Ansprechen einer thermischen Überdruckeinrichtung zu einer Gefährdung durch Lärm für Einsatzkräfte führen. Auch Einwirkungen durch Schall- und Druckwellen, ausgelöst durch die Explosion von verdämmten CNG/Luftgemischen sind vorstellbar.

6.4.8 Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen

Die Tätigkeiten von Einsatzkräften im Zusammenhang mit verunfallten Fahrzeugen ist per se nicht frei von Gefährdungen. Insbesondere die weder vorausseh- noch planbaren Arbeitsumgebungsbedingungen an Einsatzstellen, z. B. im Zusammenhang mit Verkehrsunfällen können zum Teil nicht unerhebliche Gefährdungen, wie durch den fließenden Verkehr, durch die Topografie, die Tageszeit oder durch Witterungseinflüsse darstellen. Die Art des Energieträgers der z. B. bei einem Verkehrsunfall beteiligten Fahrzeuge hat in der Regel wenig Einfluss auf die Arbeitsumgebungsbedingungen der beteiligten Einsatzkräfte. Daher werden die Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen in dieser Arbeit nicht betrachtet, obgleich sie in der Gesamtschau sehr wohl eine Rolle spielen, jedoch nicht durch den Energieträger CNG der Fahrzeuge beeinflusst werden.

6.4.9 Gefährdungen durch physische Belastungen

Physische Belastungen können auf Einsatzkräfte im Rahmen von Einsätzen der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen wirken. Ein Zusammenhang zwischen der Antriebsart bzw. der Art des Energieträgers von Verkehrsträgern und daraus resultierenden, spezifischen physischen Belastungen, lässt sich im Falle von CNG getriebenen Fahrzeugen nicht erkennen.

6.4.10 Gefährdungen durch psychische Faktoren

Insbesondere das Thema unzureichende Qualifikation für die zu bewältigende Arbeitsaufgabe kann ein relevanter Faktor für eine psychische Gefährdung von Einsatzkräften sein.

Da Fahrzeuge mit CNG als Energieträger momentan noch eher selten im öffentlichen Straßenverkehr anzutreffen sind, kann davon ausgegangen werden, dass dies für diese Art des Energieträgers ebenfalls als gültig betrachtet werden kann.

6.5 Gefährdungen bei LPG als Energieträger

6.5.1 Mechanische Gefährdungen

Wie unter 6.2.1 bereits beschrieben, besteht bei unter Druck gelagerten Gasen / Energieträgern im Fahrzeug stets eine mechanische Gefährdung für Einsatzkräfte, wenn ein Druckbehälter schlagartig versagt und es dadurch zum Zerknall des Druckbehälters kommt. Teile des Druckbehälters bzw. weitere Fahrzeugteile können dadurch erheblich beschleunigt werden und Einsatzkräfte treffen.

6.5.2 Elektrische Gefährdungen

Bei Einsätzen an Fahrzeugen mit LPG als Energieträger können momentan keine elektrischen Gefährdungen erkannt werden, die durch die Antriebsform verursacht werden und über die elektrischen Gefährdungen von ICEV hinausgehen. Daher werden elektrische Gefährdungen beim Energieträger LPG in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

6.5.3 Chemische Gefährdungen

Der Hauptbestandteil von LPG, Propan wird gemäß der GESTIS-Datenbankauskunft weder über die Haut noch nennenswert über den Magen-trakt in den Körper aufgenommen. Der Hauptaufnahmeweg ist daher durch Einatmen, wobei Propan an sich nahezu keine human-toxischen Effekte aufweist (DGUV e. V. 2023b).

Als wesentliche chemische Gefährdung kann daher die sauerstoffverdrängende Wirkung identifiziert werden, insbesondere wenn die Exposition in umschlossenen Räumen stattfindet.

6.5.4 Brand- und Explosionsgefährdung

Bei Fahrzeugen mit LPG-Gasspeichern geht die größte Brand- und Explosionsgefahr von dem mitgeführten Propan/Butangemisch aus.

Gasförmiges LPG ist in einer Konzentration zwischen 2 und 10 Vol % in der Umgebungsluft explosionsfähig (DGUV e. V. 2023b).

Flüssiggasdampf breitet sich auch über weite Strecken auf dem Boden aus und kann so auch vermeintlich weit entfernte Zündquelle erreichen und gezündet werden (Brzezińska 2019).

Auch der österreichische Bundesfeuerwehrverband warnt vor dieser Gefährdung. Einsatzkräften muss bewusst sein, dass beim Umgang mit LPG-Freisetzen die Gas- / Ex-Messungen im Bodenbereich stattfinden müssen und dass sich verdampftes LPG am Boden kriechend ausbreitet (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 38–39).

Tritt LPG als Flüssigphase aus, zeigt es zunächst ein vergleichbares Verhalten wie Benzin, verdampft jedoch deutlich zügiger. Gerade das Verdampfen kühlt das noch flüssige, meist in Lachen stehende LPG zunächst ab und verzögert so das vollständige Verdampfen (Schelb und Jordan 2020, S. 36).

Gerade in der Anfangsphase einer Einsatzfähigkeit bei Fahrzeugen mit LPG als Energieträger können Einsatzkräfte also mit Gefährdungen durch brennbare Flüssigkeiten wie auch durch explosionsfähige Gas-Luftgemische konfrontiert werden.

Auch bei LPG-Gasspeichern in Fahrzeugen kann es zum Versagen von Sicherheitseinrichtungen kommen, wie Lönnermark und Ingason berichten. Sie beschreiben einen Zwischenfall aus dem Jahr 2014 in Deutschland. Dort war ein LPG-betriebener PKW infolge eines Unfalls in Brand geraten. Kurz nach dem Eintreffen der Einsatzkräfte kam es zum Versagen des Gasspeichers mit anschließender Zündung der entstandenen LPG-Dampf Wolke. Dabei wurden zehn Einsatzkräfte verletzt. Unfallursächlich war eine verstopfte Druckentlastungseinrichtung des LPG-Radmuldentanks (Lönnermark und Ingason 5-6, 2016, S. 107).

Kritisch ist auch die Beflammung eines LPG-Gasspeichers von außen, wie der österreichische Bundesfeuerwehrverband beschreibt. Auch hier kann es, analog zu den anderen gasförmigen Energieträgern, zum Versagen des Behälters kommen, obwohl die

Sicherheitseinrichtung ausgelöst hat, wenn der Behälterüberdruck durch zu hohe Energiezufuhr von außen nicht abgebaut werden kann (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 38–39).

Schelb und Jordan beschreiben einen weiteren Aspekt, der für Einsatzkräfte von Bedeutung ist: kommt es z. B. in einer Tiefgarage zu einer LPG-Freisetzung, ist eine wirksame Entfernung der gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre aufgrund der relativen Gasdichte weitaus schwieriger als bei den Energieträgern Methan oder Wasserstoff. Das verdampfte LPG sammelt sich am tiefsten Punkt der umschlossenen Verkehrsanlage und strömt nicht, wie z.B. CNG oder Wasserstoff im Bereich der Decken über Zu- und Abfahrtsrampen ins Freie (Schelb und Jordan 2020, S. 64).

6.5.5 Biologische Gefährdungen

Bei Einsätzen an Fahrzeugen mit LPG als Energieträger können momentan keine biologischen Gefährdungen erkannt werden, die durch die Antriebsform verursacht werden.

6.5.6 Thermische Gefährdungen

Wie bei Wasserstoff, CNG und LNG besteht auch bei LPG die Gefahr der Strahlflammenbildung, wenn Gasspeicher beflammt werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn eine Überdruckeinrichtung des Lagerbehälters anspricht.

So warnt auch der österreichische Bundesfeuerwehrverband vor diesem Phänomen. Gemäß seinen Ausführungen können unvermittelt Strahlflammen von mehreren Metern Länge auftreten. Eine Abstrahlrichtung ist nicht normativ festgelegt und kann je nach Fahrzeug sehr unterschiedlich sein. Eine Besonderheit weisen dabei LPG getriebene Fahrzeuge auf, die sich im Dachlage befinden: hier kann es dazu kommen, dass LPG als Flüssigphase durch die Überdruckeinrichtung austritt. Die geht mit einem erhöhten Energiegehalt der Strahlflamme sowie auch einem deutlich intensiveren Abbrand und einer größeren Flammenlänge einher (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 16), (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 38–39).

Eine weitere thermische Gefährdung stellt ein Flüssigphasenaustritt von LPG ohne Zündung dar: diese hat in der Regel eine Temperatur von -40°C und führt bei Berührung mit ungeschützter Haut zu Kälteverbrennungen (DGUV e. V. 2023b).

6.5.7 Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen

Tritt ein Gas unter Druck (un)kontrolliert aus, geht dies in der Regel mit einem hohen Schalleistungspegel einher. Bei entsprechend hohen Drücken kann also auch ein LPG-

Austritt, z. B. beim Ansprechen einer thermischen Überdruckeinrichtung zu einer Gefährdung durch Lärm für Einsatzkräfte führen. Auch Einwirkungen durch Schall- und Druckwellen, ausgelöst durch die Explosion von verdämmten LPG/Luftgemischen sind vorstellbar.

6.5.8 Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen

Aufgrund seiner relativen Gasdichte von 1,55 (DGUV e. V. 2023b) spielt die Geländeform bei einer Freisetzung von LPG eine Rolle. Tritt LPG aus und verdampft, sammelt sich das Propan in Senken, Geländeeinschnitten, Bachläufen und sonstigen tiefergelegenen Bereichen wie Tunnel, Tiefgaragen oder Keller.

6.5.9 Gefährdungen durch physische Belastungen

Physische Belastungen können auf Einsatzkräfte im Rahmen von Einsätzen der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen wirken. Ein Zusammenhang zwischen der Antriebsart bzw. der Art des Energieträgers von Verkehrsträgern und daraus resultierenden, spezifischen physischen Belastungen, lässt sich im Falle von LPG getriebenen Fahrzeugen nicht erkennen.

6.5.10 Gefährdungen durch psychische Faktoren

Insbesondere das Thema unzureichende Qualifikation für die zu bewältigende Arbeitsaufgabe kann ein relevanter Faktor für eine psychische Gefährdung von Einsatzkräften sein.

Da Fahrzeuge mit LPG als Energieträger momentan eher selten im öffentlichen Straßenverkehr anzutreffen sind, kann davon ausgegangen werden, dass dies für diese Art des Energieträgers ebenfalls als gültig betrachtet werden kann.

7 Einsatzgeschehen bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben

7.1 Zwischenfälle bei Fahrzeugen mit elektrischen Speichersystemen

Brände von BEV waren bereits sehr früh von großem Medieninteresse. Insbesondere der Umstand, dass verunfallte BEVs noch Stunden und Tage nach einem Ereignis in Brand geraten können, führte zu einer breiten Reaktion in Medien und Fachöffentlichkeit. Auch Bisschop *et al.* führen den Brand eines Chevrolet Volt im Jahr 2011 rund vier Wochen nach einem Crashtest als eines dieser Beispiele an, die zu einer langanhaltenden internationalen Berichterstattung geführt haben. Sie berichten auch über Fälle, wo Fahrzeuge gebrannt haben, abgelöscht wurden und beim Abschleppen oder der anschließenden Lagerung wieder in Brand gerieten. Sie führen dies hauptsächlich auf die im Hochvoltpeicher vorhandene Restenergie, interne Kurzschlüsse, z. B. durch insbesondere salzhaltiges (Lösch)Wasser oder ausgefallene Kühlsysteme zurück (Bisschop et al. 2020, S. 2676).

Wie unter 1.1 bereits ausgeführt, suggeriert die mediale Berichterstattung zum Teil, dass BEV mit deutlich höherer Wahrscheinlichkeit in Brand geraten als Fahrzeuge mit konventionellen Energieträgern. Doch entspricht das der Realität?

Willstrand *et al.* sind dieser Frage für die Länder Schweden und Norwegen nachgegangen und haben Einsatzberichte der Feuerwehren dahingehend ausgewertet. Sie haben in den Jahren 2018 und 2019 für Schweden 14 Brände von BEV identifiziert, Brandstiftungen wurden dabei nicht berücksichtigt. Dabei ereigneten sich zwei Brände während des Ladens und vier traten während der Fahrt auf. Darüber hinaus wurden 95 weitere Brände dokumentiert, diese fanden im Zusammenhang mit Elektrofahrrädern, -rollern und *hoverboards* statt.

Für Norwegen identifizierten sie für die Jahre 2016 bis 2018 45 Brände von BEVs. Inwieweit die statistische Erfassung durch die Feuerwehren vollständig war, konnte nicht nachvollzogen werden, wie Willstrand *et al.* einschränkten. In Bezug auf die Zulassungszahlen von BEV und ICEV in den genannten Zeiträumen kamen sie zu dem Schluss, dass die Wahrscheinlichkeit eines BEV-Brandes in Norwegen ca. 5 mal und in Schweden etwa 20 mal niedriger als ein ICEV-Brand ist (Willstrand et al. 2020).

Für China hat Linja-aho eine Quote von ca. 5,2 BEV-Brände pro 10.000 Fahrzeugen ermittelt. Auch hier wurde versucht mittels Datenbankauswertungen Zahlen zu Unfällen und Bränden mit BEV-Beteiligung zu erheben. Gemäß seinen Angaben wurden für die Jahre 2015 – 2019 lediglich 11 Brände und 19 Unfälle von HEV bzw. BVE identifiziert (Linja-aho 2020).

Das erscheint für die Anzahl an bereits in Betrieb befindlichen BEV in der Volksrepublik China eine sehr geringe Zahl und muss daher unter Vorbehalt gesehen werden.

Passend dazu beschreibt Di Bari, dass die umfassende internationale Auswertung von Unfällen und Bränden aufgrund fehlender Datengrundlagen schwierig ist. Als Gründe werden ungenaues oder mangelndes Meldeverhalten aber auch fehlende geeignete Meldesysteme angeführt. Insbesondere wird das Problem von Di Bari für China gesehen, dass er als momentan größten Markt für BEV einschätzt. Verlässliche Zahlen zum Unfallgeschehen sind in China, im Gegensatz zu anderen Regionen, seiner Ansicht nach nicht öffentlich verfügbar (Di Bari 2020).

Ohne konkrete Zahlen zu nennen, führen Sun *et al.* als häufige Brandursache bei BEV in China neben Brandstiftung die Propagation im LIB auf. Ihren Beobachtungen zufolge wird diese oft durch Missbrauch, während der Ladung oder durch eine extreme mechanische Belastung im Rahmen eines Unfalls verursacht (Sun et al. 2020, S. 1363).

Auch Di Bari kommt zu ähnlichen Ursachen bei Bränden von BEV und stellt fest, dass Brandereignisse über den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeuges auftreten können. So werden Batterieproduktion, Ladevorgänge und Unfälle als Situationen beschrieben, wo es zu einem gehäuften Brandgeschehen kommt. Ein weiterer Aspekt ist seiner Beobachtung nach auch noch der Kontakt mit salzhaltigem Wasser. Dies kann insbesondere nach Überflutungen mit Meerwasser der Fall sein (Di Bari 2020).

Die Flutung eines BEV mit Meerwasser scheint in der Tat mit einem erhöhten Brandrisiko einherzugehen, insbesondere dann, wenn das Wasser wieder abgelaufen ist. So berichteten Medien nach dem Hurrikan Ian im September 2022 in Florida von mehreren Brandfällen in diesem Zusammenhang (Focus online 2023).

Georgiev kommt zu dem Schluss, dass bei BEV die Brandursache oft auch eben nicht die LIB ist. Auch andere Möglichkeiten, wie mechanische Probleme oder Kurzschlüsse in der Fahrzeugelektrik sind häufige Brandursachen. Exemplarisch schildert er einen Fall eines brennenden Teslas in Österreich, der sehr medienwirksam als LIB-Brand dargestellt wurde. Brandursache hierbei war jedoch ausgetretenes Kühlmittel nach einem Unfall und nicht die LIB (Georgiev 2021).

Auffällig bei der Literaturrecherche war, dass umfängliche Daten bzw. Statistiken oft nicht Grundlagen der Auswertungen sind. Häufig wird keine systematische Statistik verwendet, um Brandursachen bzw. -häufigkeiten zu ermitteln, sondern lediglich kleinere Stichproben wie z. B. bei Ghiji, Feng sowie Lönnermark und Ingason (Ghiji et al. 2020; Feng et al. 2018; Lönnermark und Ingason 5-6, 2016).

Einen guten Überblick über Zwischenfälle mit BEV auf internationaler Ebene bietet die Statistik von *EV fire safety*⁴, eine australische Initiative, welche unter anderem vom australischen Verteidigungsministerium unterstützt wird. Ziel von *EV fire safety* ist unter anderem, eine umfassende internationale Statistik zu dem Thema bereitzustellen. Seit 2010 wurden dort 511 bestätigte Brände von BEV erfasst, weitere 100 Fälle befinden sich dort momentan in der Prüfung / Auswertung.

- Bei rund 24% waren mechanische Einwirkungen, z. B. durch Verkehrsunfälle oder dem Überfahren von Trümmerteilen brandursächlich, in rund 6% der Fälle löste eine Überflutung des Fahrzeuges den Brand aus, bei ca. 45 der Fälle breitete sich ein Brand in weiteren Verlauf auf das BEV aus. Bei rund der Hälfte der registrierten Fälle konnte keine eindeutige Brandursache ermittelt werden.
- Von den rund 511 bestätigten Bränden fanden ca. 24% in unterirdischen Anlagen wie Tunneln oder Tiefgaragen statt, ca. 30 % traten im Freien während der Fahrt auf und ca. 33% im Freien während des Parkens. Bei einigen Fällen ist der Ort unbekannt.
- In 95 % der Fälle kam es zu einer Flammenbildung, wie z. B. einer Strahlflamme.
- In etwas weniger als 5% der Ereignisse kam es zu Explosionen von ausgetretenen Ventinggasen. Rund 63% dieser Explosionen ereignete sich in umschlossenen Räumen.
- In 16 % der Brandfälle befand sich das BEV im Ladevorgang, bei ca. 2% der Fälle wurde der Ladevorgang bis zu 60 Minuten vor dem Brandausbruch beendet.
- Bei keinem Ereignis wurde eine elektrische Gefährdung / Körperdurchströmung dokumentiert.

(EV FireSafe research team 2024).

Larsson *et al.* haben bereits 2016 versucht, die Brandhäufigkeit des Model S der Firma Tesla zu ermitteln. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass durchschnittlich etwa 5 Brandereignisse pro 100.000 verkauften Fahrzeugen des Models S auftreten. Bei der Interpretation der Zahlen geben sie als Einschränkung an, dass zum Erhebungszeitpunkt nur sehr wenige ältere Fahrzeuge dieser Baureihe zugelassen waren und damit die ermittelte Anzahl der Brandereignisse auf längere Sicht hin womöglich zu niedrig sei. Sie kommen jedoch trotzdem zu dem Schluss, dass nicht von einer Häufung von Brandereignisse bei BEV im Vergleich zu ICEV die Rede sein kann (Larsson *et al.* 2016).

⁴ <https://www.evfiresafe.com/>

Dies deckt sich mit jüngeren Vergleichen, wie sie z. B. Erbe anführt. Er beruft sich auf Daten einer nordamerikanischen KFZ-Versicherungsfirma, die im Durchschnitt 25 Brandereignisse pro 100.000 verkauften Fahrzeugen bei BEVs registriert. Bei ICEV sind es dem Unternehmer zufolge rund 1.530 Brände pro 100.000 verkaufter Fahrzeuge. Ähnliche Aussagen hat Erbe auch von Seiten der DEKRA ermittelt. Er gibt jedoch zu bedenken, dass die Laufzeit von BEVs bis dato bei weitem kürzer als die von ICEV ist. Es ist seiner Ansicht nach daher nicht unwahrscheinlich, dass die Anfälligkeit für Brände mit dem Fahrzeugalter ansteigt (Erbe 2024, S. 11).

Einen anderen Aspekt betrachteten Edwards *et al.* in ihrer Untersuchung zu Unfallhäufigkeiten von BEV mit Fußgängern. Sie zeigten auf, dass in Großbritannien das Risiko für Fußgänger in eine Kollision mit einem BEV verwickelt zu werden, verglichen mit ICEV, im ländlichen Gebieten etwa doppelt und im städtischen Umfeld sogar rund dreimal höher ist. Eine mögliche Erklärung könnte laut Edwards *et al.* die geringere Lärmemission sein, die gerade im geräuschintensiven Stadtverkehr die BEVs nahezu lautlos erscheinen lässt. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass BEVs überdurchschnittlich oft von jüngeren Personen gefahren werden, die – unabhängig von der Antriebsart ihres Fahrzeugs – häufiger in Unfälle verwickelt sind (Edwards et al. 2024, S. 489).

Diese Zahlen beziehen sich in der Regel auf Personenfahrzeuge. Im Bereich der Nutzfahrzeuge sind bis dato noch deutlich weniger Daten verfügbar, da diese Fahrzeugklasse noch selten im Straßenverkehr anzutreffen ist. Scholzen hat jedoch bereits einige Schlüsse aus den vorhandenen Zahlen des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft - GDV gezogen. Er interpretiert die Daten des GDV dahingehend, dass sich in Europa durchschnittlich ca. 3 Elektrobüsbrände pro Jahr ereignen. Dem gegenüber stehen allein in Deutschland in den letzten 16 Jahren 19 Brände von Busbetriebshöfen. Nur bei einem davon konnte ein Elektrobüs als Brandursache ermittelt werden. Er schlussfolgert daraus, dass elektrisch betriebene Busse nicht überdurchschnittlich öfter in Brand geraten als mit Diesel betriebene Fahrzeuge (Scholzen 2023).

Was den Einsatz bei elektrisch betriebenen Nutzfahrzeugen jedoch unterscheidet, ist in der Regel die oft fehlende Einsatzerfahrung der Einsatzkräfte damit. Anschaulich wird dies in einem Beispiel, das Rosmüller *et al.* beschreiben. Hierbei war Anfang 2019 ein elektrisch angetriebener Bus in Brand geraten. Die Einsatzkräfte berichteten, dass sie die Brandbekämpfung insofern vor Herausforderungen gestellt hat, da es zu diesem Zeitpunkt noch keine konkreten Handlungsanweisungen, z. B. in Form von Standardeinsatzregeln oder Gefährdungsbeurteilungen, gab. So bestanden während der Einsatzmaßnahmen die Befürchtungen einen Stromschlag zu erleiden (Rosmüller et al. 2020).

Es kann festgestellt werden, dass sich die oft in den Medien zu findende Ansicht, dass Fahrzeuge mit elektrischen Speichersystemen gehäuft in Brand geraten und somit deren Betrieb mit einem höheren Risiko verbunden ist, nicht mit den momentan verfügbaren statistischen Auswertungen begründbar ist. Vielmehr zeichnet sich zurzeit das Bild ab, dass BEV ein geringeres Brandrisiko als ICEV aufweisen. Die mediale Aufmerksamkeit scheint gegenüber dieser Feststellung, zumindest in der Vergangenheit, oft indirekt proportional zu sein. Berichte über in Brand geratene BEVs fanden und finden immer noch eine zum Teil erstaunlich intensive Reichweite bzw. Verbreitung.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass eine mögliche Ursache dieses Verhältnisses darin liegen kann, dass BEV erst seit wenigen Jahren in nennenswerter Stückzahl produziert und damit in Verkehr gebracht werden, siehe hierzu auch Punkt 4.1. Wenn man, wie es Larsson und auch Erbe bereits postuliert haben, davon ausgeht, dass das Risiko ein technisch bedingtes Brandereignis, z. B. durch Verschleiß, mangelnde Wartung oder einen technischen Defekt zu erleiden, mit dem Alter des Fahrzeuges steigt, ist es auch wahrscheinlich, dass sich die Zahlen der Brandereignisse bei BEV mit deren zunehmenden Alter ebenfalls erhöhen.

7.2 Zwischenfälle bei Fahrzeugen mit gasförmigen Energieträgern

Fahrzeuge mit gasförmigen Energieträgern nehmen schon seit deutlich längerer Zeit am Straßenverkehr teil als elektrisch betriebene Fahrzeuge. Daher existieren bereits seit Ende der 1970er Jahre Statistiken zu Zwischenfällen mit gasgetriebenen Fahrzeugen. So analysieren Lönnermark und Ingason Daten des US-Verkehrsministeriums aus den Jahren 1976 bis 2010. Bei einer Erhebung wurden die Brandursachen von rund 135 Brandereignissen von gasgetriebenen Fahrzeugen weltweit analysiert. In den wenigsten Fällen ging der Brand vom Gasspeicherbehälter aus, sondern resultierte aus anderen Gründen wie elektrische Defekte, heiß gelaufenen Bremsen oder Unfälle. Bei den untersuchten Gasaustritten war der häufigste Grund das Versagen der Druckgasbehälterhülle beim Betankungsvorgang und das Versagen der Überdruckeinrichtung. Bei rund einem Drittel der untersuchten Brände wurde die Überdruckeinrichtung nicht aktiviert und es kam zu unkontrollierten Gasfreisetzungen (Lönnermark und Ingason 2018, S. 98).

Einen Unfall, der sich in Deutschland ereignete und dessen Ursache mit der Analyse des US-Verkehrsministeriums deckt, heben Lönnermark und Ingason bereits in einer früheren Publikation hervor: hier war ein Fahrzeug mit Radmulden-CNG-Tank alleinbeteiligt

gegen einen Baum geprallt und infolgedessen in Brand geraten. Beim Eintreffen der örtlichen ehrenamtlichen Feuerwehr brannte das Fahrzeug in voller Ausdehnung. Zu Beginn der Brandbekämpfung kam es unvermittelt zum Versagen des Radmuldentank mit anschließender Explosion. Dabei wurden zehn Einsatzkräfte zum Teil schwer verletzt. Die getragene persönliche Schutzausrüstung hat noch schlimmere Folgen für die Einsatzkräfte verhindert. Ursache dafür war die Überdruckeinrichtung, die durch einen gelösten Kunststoffschlauch blockiert und damit unwirksam wurde (Lönnermark und Ingason 5-6, 2016, S. 115).

Im Rahmen einer Bachelorarbeit-Recherche identifizierte Franke in Deutschland in den Jahren 2012 – 2020 rund 34 Feuerwehreinsätze im Zusammenhang mit gasbetriebenen Fahrzeugen. Da diese Recherche lediglich auf frei zugängliche online-Einsatz- und Presseberichten der beteiligten Feuerwehren beruhte, ist davon auszugehen, dass das tatsächliche Einsatzgeschehen höher ist, da nicht jeder Einsatz Eingang in die mediale Berichterstattung bzw. die Öffentlichkeitsarbeit findet (Franke 2021).

Rylander hat ebenfalls untersucht, wie Unfälle mit gasbetriebenen Fahrzeugen verursacht werden. Sein Fazit, insbesondere für mit LPG betriebenen Fahrzeuge ist, dass nur wenig Daten dazu vorhanden sind. Eine Feststellung von ihm war jedoch, dass ein Zusammenhang zwischen Alter und Wartungszustand mit der Häufigkeit von unkontrollierten LPG-Freisetzungen besteht. Er führt dies unter anderem auf undichte Verbindungen des Kraftstoffsystems zurück (Rylander 2021).

Bei LNG-getriebenen Fahrzeugen ist die Datenlage zu Unfällen und Leckageursachen noch sehr unvollständig. Das könnte damit zusammenhängen, dass diese Energieträger momentan nur bei Nutzfahrzeugen und darüber hinaus in absoluten Zahlen noch sehr wenig im Straßenverkehr anzutreffen sind. Exemplarisch sei ein Unfall in den Niederlanden im Jahr 2018 erwähnt, der im Nachgang zu einer umfänglichen Befassung der niederländischen Feuerwehr mit dem Thema geführt hat. Auch der internationale Verband der Feuerwehren und Rettungsdienste – CTIF hat diese Aufarbeitung in seine Empfehlungen aufgenommen (Vollmacher und Esbroeck 2018).

Bereits im Jahr 2015 haben Betteridge und Phillips von zwei Unfällen mit LKW in Spanien, die LNG als Ladung transportierten, berichtet. Dabei kam es jeweils zu BLEVE-ähnlichen Vorkommnissen (Betteridge und Phillips 2015).

Inwieweit das auf LNG-getriebene Fahrzeuge übertragbar ist, bleibt momentan fraglich. Zum einem ist die mitgeführte Menge an LNG deutlich geringer als bei den beschriebenen Unfällen der Tankwagen, zum anderen verfügten diese lediglich über einwandige Tanks. Moderne LNG-Tanks sind in der Regel doppelwandig ausgeführt.

Obwohl auch Wasserstoff momentan noch ein sehr selten anzutreffender Energieträger im Straßenverkehr ist, konnte im Rahmen der *Hydrogen safety panel* Untersuchung im Jahr 2020 bereits 67 Zwischenfälle mit Wasserstoff analysiert werden. Im Unterschied zu anderen gasförmigen Energieträgern führte bei diesen Ereignissen eine Wasserstofffreisetzung in der allermeisten Fällen auch zu einer Zündung des freigesetzten Wasserstoffes (Hydrogen Safety Panel 2020).

Exemplarisch sei hier der Brand in einer kurz davor eröffneten Wasserstofftankstelle in Gersthofen im Juni 2024 erwähnt. In der nur seit rund einer Woche in Betrieb befindlichen Anlage kam es aus zunächst unbekannter Ursache zu einer Wasserstofffreisetzung mit anschließendem Brand. Eine Fahrzeugbetankung hat zum Zeitpunkt des Brandausbruches nicht stattgefunden. Die örtliche Feuerwehr brachte den Brand schnell unter Kontrolle (Philipp Kinne 2024).

8 Mögliche Einsatzszenarien bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben

8.1 Überblick

Wie in den vorherigen Kapiteln deutlich geworden ist, sind bei akzidentiellen Ereignissen von Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern eine Vielzahl von verschiedenen Szenarien denkbar, mit welchen Einsatzkräfte konfrontiert sein können. Die Gefährdungen, die sich aus diesen unterschiedlichen Szenarien für Einsatzkräfte ergeben können, sind zum Teil sehr Szenarien-spezifisch und different in ihrer Ausprägung.

Um eine umfassende Beurteilung der verschiedenen Gefährdungen vorzunehmen, ist es daher zunächst erforderlich, die erwartbaren Szenarien systematisch darzustellen und nach Möglichkeit zu kategorisieren. Es ist ebenfalls wichtig, dort Szenarien-basierte Untergruppen / Unterteilungen zu bilden, wo es notwendig ist. Dies kann z. B. aus einsatztaktischen Gesichtspunkten oder aufgrund unterschiedlicher Gefährdungen notwendig werden. Diese Vorgehensweise entspricht im Allgemeinen der Herangehensweise, wie auch eine Gefährdungsbeurteilung im klassischen Arbeitsschutzkontext zu beginnen wäre.

So sieht das Handbuch Gefährdungsbeurteilung der BAuA ebenfalls diese Vorbereitung als Einstieg in den Prozess der Gefährdungsbeurteilung vor. Dazu zählen unter anderem die Identifikation des Arbeitssystems, der Arbeitsmittel und der möglichen Gefährdungen (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2021).

Die Gefährdungen wurden im Kapitel 6 bereits ausführlich dargelegt.

8.2 Klassifizierung der erwartbaren Einsatzszenarien

Um einen systematischen Überblick über die Einsatzszenarien zu erhalten, wird in dieser Arbeit folgender Ansatz verfolgt:

Zunächst werden vier übergeordnete Modelle (M) von Einsatzarten definiert, die auf den grundsätzlichen Schadensarten *Verkehrsunfall* oder *Brand* beruhen, unterschieden durch die möglichen Arten der dabei involvierten Energieträger:

- Modell 1: *Verkehrsunfall mit BEV-Beteiligung*
- Modell 2: *Brand eines BEV*
- Modell 3: *Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug (alle Gasarten)*
- Modell 4: *Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs (alle Gasarten)*

Die Erfahrung zeigt, dass diese grundlegenden Schadensarten oft nicht immer vollkommen trennscharf voneinander betrachtet werden können, da es durchaus zu einem

Brand als Folge eines Verkehrsunfalls kommen kann. Dies wurde in der weiteren Kategorisierung berücksichtigt und führt daher auch zu kombinierten Szenarien.

Die Modelle werden mit mehreren Szenarien (S) untersetzt, die die jeweilige Betroffenheit von möglichen Insassen der Fahrzeuge bzw. weiteren betroffenen Personen beschreiben. Dies ist insofern relevant, da die direkte Beteiligung von (verletzten) Personen andere Einsatzstrategien der Einsatzkräfte erfordert. Als Beispiel sei ein Verkehrsunfall mit eingeklemmter Person im Vergleich zu einem Brand eines unbesetzten Fahrzeugs genannt. Im ersten Fall sind unter Umständen umfangreiche technische und medizinische Maßnahmen - gegebenenfalls unter Zeitdruck bzw. über einen längeren Zeitraum hinweg - am und im Fahrzeug erforderlich, im zweiten können Löscharbeiten zunächst aus sicherer Entfernung begonnen werden. Die Szenarien werden wie folgt unterschieden:

- Szenario 1: *Person(en) ist/sind im Fahrzeug eingeklemmt*
- Szenario 2: *Person(en) ist/sind im Fahrzeug eingeschlossen*
- Szenario 3: *es befindet sich keine Personen im Fahrzeug*

Die Unterscheidung in Szenario 1 und 2 wurde daher gewählt, da hier in der Regel eine Abstufung in technischer und zeitlicher Hinsicht vorliegt. Muss durch die Einsatzkräfte eine technisch-medizinische Rettung mit physischer Entklemmung/Befreiung durchgeführt werden, ist in der Regel ein höherer Aufwand im Vergleich zu einer reinen Öffnung des Fahrzeuges nötig.

Jedes der Szenarien wird wiederum mit unterschiedlichen Risikofaktoren (R) kombiniert, um die jeweilige Modell-Szenario Kombination zu konkretisieren. Die Risikofaktoren wurden so gewählt, dass die möglichen Gefährdungen durch den jeweiligen Energieträger unterschieden und somit in der Bewertung berücksichtigt werden können:

Bereich Hochvoltspeicher als Energieträger (M1 / M2)

- Risikofaktor 1: *Speicher betroffen*
- Risikofaktor 2: *Zustand des Speichers kritisch / Speicher durch sekundären Brand beaufschlagt*
- Risikofaktor 3: *Zustand des HV-Speichers unbekannt aber primär stabil*
- Risikofaktor 4: *BEV mit Ladeinfrastruktur verbunden*

Bereich Gas als Energieträger - alle Gasarten (M3 / M4)

- Risikofaktor 1: *Gasspeicher betroffen, Gas tritt brennend aus*
- Risikofaktor 2: *Gasspeicher betroffen, Gas tritt aus*
- Risikofaktor 3: *Zustand des Gasspeichers unbekannt aber primär stabil*

- Risikofaktor 4: *Fahrzeug mit Tankinfrastruktur verbunden*

Die jeweilige Kombination aus den Faktoren Modell, Szenario und Risikofaktor ergibt eine Kategorie (K). Um die Variationsmöglichkeiten übersichtlich darzustellen, wurden diese graphisch in Form von Entscheidungsbäumen angeordnet, welche ausgehend vom Modell über das Szenario und den passenden Risikofaktor zu einer Kategorie führen (siehe hierzu die Abbildungen 4 bis 7).

Eine Kategorie entspricht einem Einsatzszenario, vgl. hierzu die Tabellen 6 bis 9, die die möglichen Kombinationen und deren Bedeutung nochmals kompakt darstellen.

Durch diese Herangehensweise können insgesamt 48 verschiedene Kategorien unterschieden werden.

Jede Kategorie ist sowohl im Freien als auch in umschlossenen Bereichen wie z. B. Tiefgaragen und Tunnel vorstellbar. Die dabei auftretenden Gefährdungen für Einsatzkräfte können zum Teil erheblich unterschiedlich ausfallen, siehe hierzu Kapitel 6 und Tabelle 6. Beispielfhaft sei nochmals auf die Überlegungen von Schelb *et al.* verwiesen, die diesen Umstand sehr plastisch beschreiben (Schelb und Jordan 2020).

Daher wurden alle Szenarien, Risikofaktoren und Kategorien dupliziert, um diesem Unterschied im weiteren Verlauf der Bewertung Rechnung zu tragen. Um ein gewisses Maß an Übersicht zu behalten und da es sich um das einzige distinkte Unterscheidungsmerkmal handelt, wurde eine zusätzliche Kennzeichnung mittels „*“ eingeführt. So entscheidet sich z. B. die Kategorie 1.1.1 von der Kategorie 1.1.1* lediglich dahingehend, dass letztere in einem umschlossenen Bereich definiert ist.

Grundlage für diese Festlegungen sind zum einem die Erkenntnisse, die aus den im Kapitel 7 dargestellten Unfällen und Brandereignissen von Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern gewonnen werden konnten. Zum anderen wurden die persönlichen Erfahrungen des Verfassers in seiner Funktion als Feuerwehreinsatzkraft bei zahlreichen Verkehrsunfällen und einschlägige Fachschriften wie z. B. dem Merkblatt 06/01 „*Technisch-medizinische Rettung nach Verkehrsunfällen*“ der vfdb e. V. genutzt (Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. 2020).

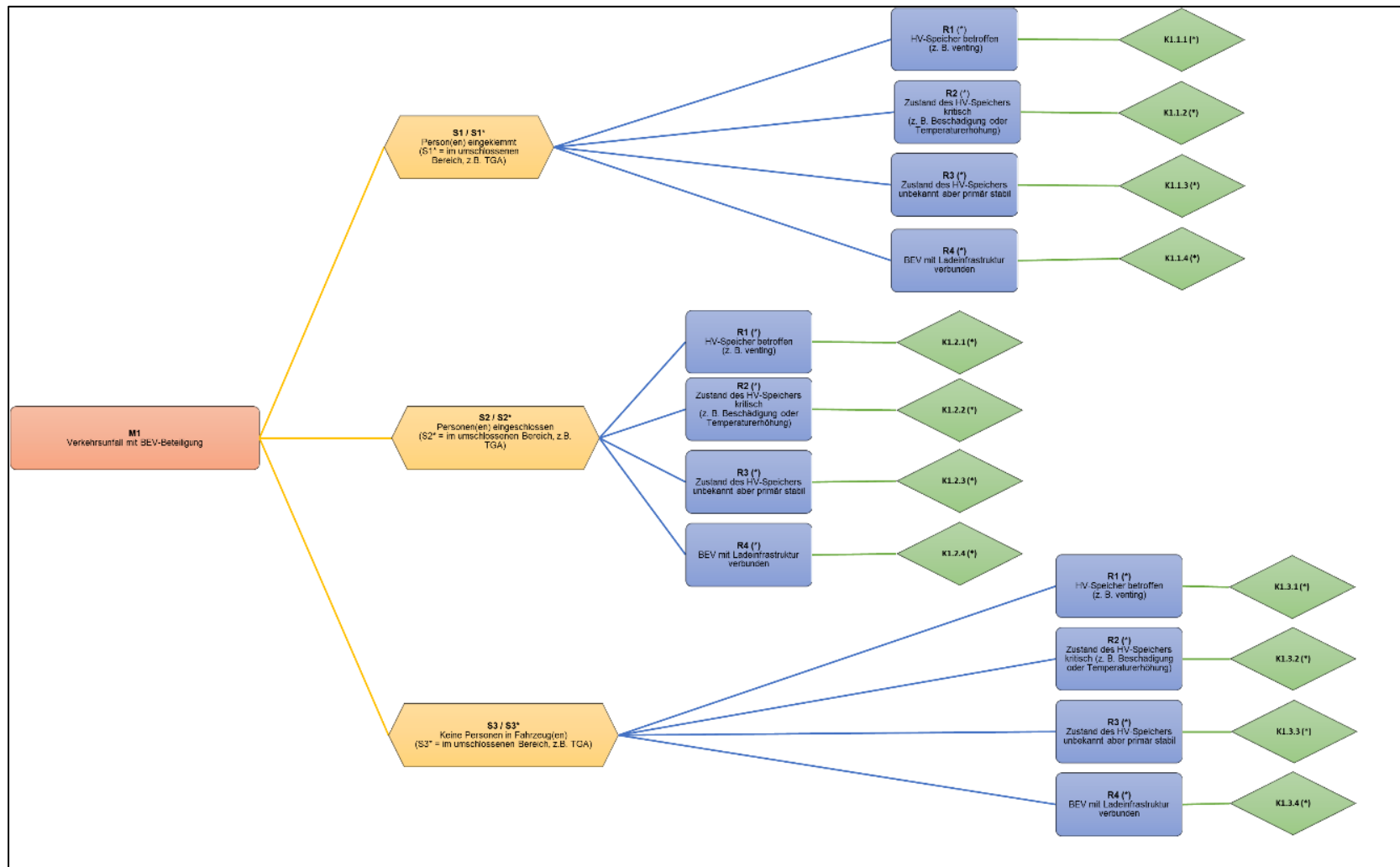


Abbildung 2: Entscheidungsbaum Modell 1 Verkehrsunfall mit BEV-Beteiligung

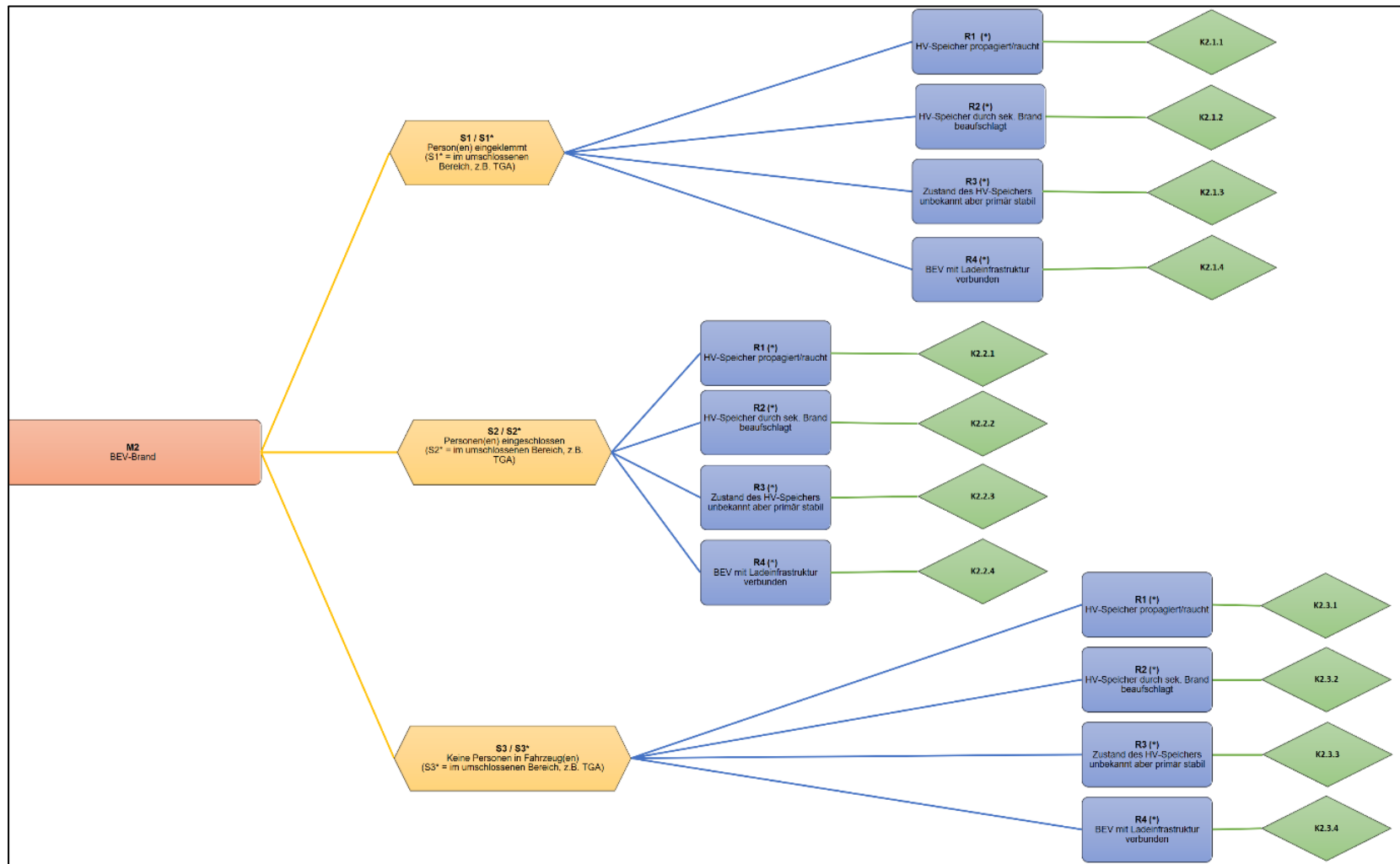


Abbildung 3: Entscheidungsbaum Modell 2 Brand eines BEV

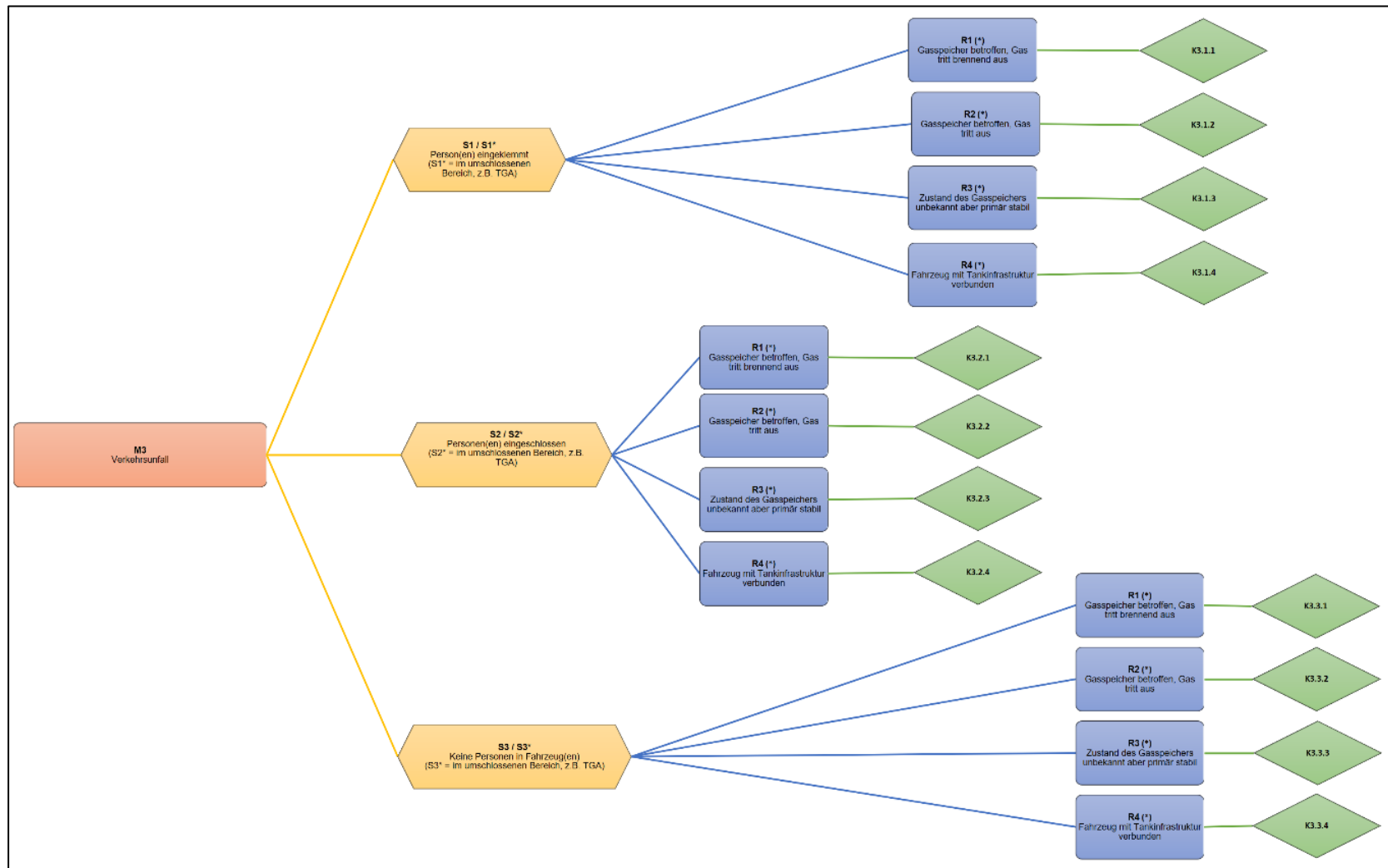


Abbildung 4: Entscheidungsbaum Modell 3 Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug

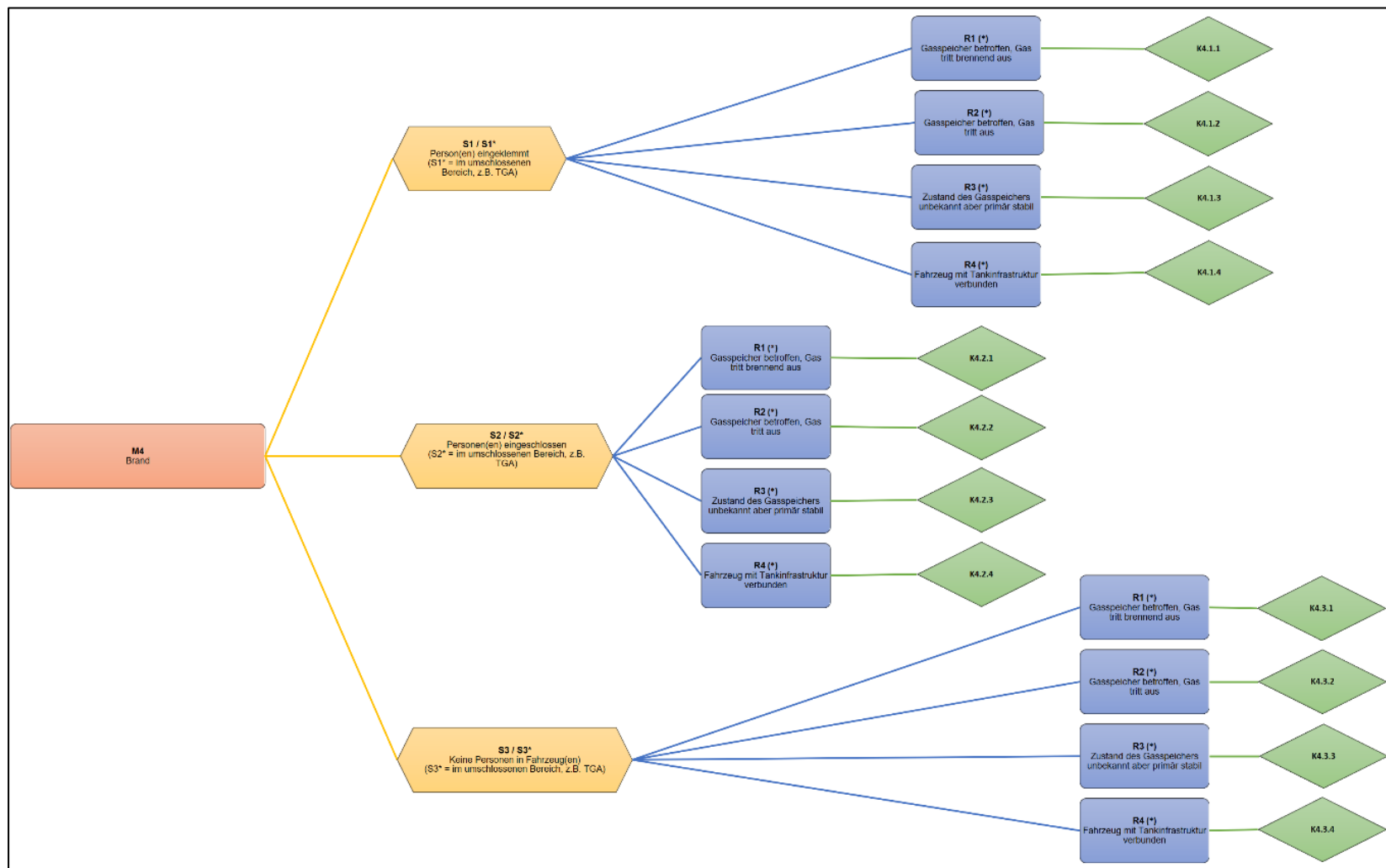


Abbildung 5: Entscheidungsbaum Modell 4 Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs

Tabelle 7: Modell 1 - Verkehrsunfall mit BEV-Beteiligung

Modell 1 Verkehrsunfall mit BEV-Beteiligung				
#	1	2	3	4
Szenario (Sx* = im umschlossenen Bereich, z. B. Tiefgarage)	Person(en) eingeklemmt	Personen(en) eingeschlossen	Keine Personen in Fahrzeug(en)	--
Risikofaktor	HV-Speicher betroffen z. B. venting	Zustand des HV-Speichers kritisch z. B. Beschädigung oder Temperaturerhöhung	Zustand des HV-Speichers unbekannt aber primär stabil	BEV mit Ladeinfrastruktur verbunden
Kategorie	1.1.1 – 1.1.4 1.1.1* – 1.1.4*	1.2.1 – 1.2.4 1.2.1* – 1.2.4*	1.3.1 – 1.3.4 1.3.1* – 1.3.4*	

Tabelle 8: Modell 2 - Brand eines BEV

Modell 2 Brand eines BEV				
#	1	2	3	4
Szenario (Sx* = im umschlossenen Bereich, z. B. Tiefgarage)	Person(en) eingeklemmt	Personen(en) eingeschlossen	Keine Personen in Fahrzeug(en)	--
Risikofaktor	HV-Speicher propagiert / raucht	HV-Speicher durch sekundären Brand beaufschlagt	Zustand des HV-Speichers unbekannt aber primär stabil	BEV mit Ladeinfrastruktur verbunden
Kategorie	2.1.1 – 2.1.4 2.1.1* – 2.1.4*	2.2.1 – 2.2.4 2.2.1* – 2.2.4*	2.3.1 – 2.3.4 2.3.1* – 2.3.4*	

Tabelle 9: Modell 3 - Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug

Modell 3 Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug				
#	1	2	3	4
Szenario (Sx* = im umschlossenen Bereich, z. B. Tiefgarage)	Person(en) eingeklemmt	Personen(en) eingeschlossen	Keine Personen in Fahrzeug(en)	--
Risikofaktor	Gasspeicher betroffen, Gas tritt brennend aus	Gasspeicher betroffen, Gas tritt aus	Zustand des Gasspeichers unbekannt aber primär stabil	Fahrzeug mit Tankinfrastruktur verbunden
Kategorie	3.1.1 – 3.1.4 3.1.1* – 3.1.4*	3.2.1 – 3.2.4 3.2.1* – 3.2.4*	3.3.1 – 3.3.4 3.3.1* – 3.3.4*	

Tabelle 10: Modell 4 - Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs

Modell 4 Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs				
#	1	2	3	4
Szenario (Sx* = im umschlossenen Bereich, z. B. Tiefgarage)	Person(en) eingeklemmt	Personen(en) eingeschlossen	Keine Personen in Fahrzeug(en)	--
Risikofaktor	Gasspeicher betroffen, Gas tritt brennend aus	Gasspeicher betroffen, Gas tritt aus	Zustand des Gasspeichers unbekannt aber primär stabil	Fahrzeug mit Tankinfrastruktur verbunden
Kategorie	4.1.1 – 4.1.4 4.1.1* – 4.1.4*	4.2.1 – 4.2.4 4.2.1* – 4.2.4*	4.3.1 – 4.3.4 4.3.1* – 4.3.4*	

Ziel soll sein, möglichst viele der potenziellen Einsatzszenarien, mit welchen Einsatzkräfte konfrontiert werden können, hierbei abzudecken.

Es kann jedoch kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Alle je möglichen bzw. denkbaren Konstellationen abbilden zu wollen, wäre unrealistisch. Es wurde daher bei der Auswahl der Faktoren Wert darauf gelegt, erwartbare Konstellationen zu beschreiben, deren Eintrittswahrscheinlichkeit nicht zu gering ist.

Natürlich sind auch darüber hinaus weitere Szenarien denkbar. Aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit, dass Einsatzkräfte damit konfrontiert werden, wurde auf deren Berücksichtigung verzichtet und diese Limitation in der gewählten Herangehensweise in Kauf genommen.

9 Methoden von Entscheidungsfindung und Gefährdungsbeurteilung

9.1 Entscheidungsfindung im Einsatzgeschehen

Es ist ein gesellschaftliches Phänomen, dass Risiken immer mehr aus dem Bewusstsein der Bevölkerung verdrängt werden, wie das britische *Health and Safety Executive* bereits im Jahr 2001 ausführte. Dies ist gemäß deren Ausführungen vor allem durch die zunehmende Lebensdauer und stetigen technischen Fortschritt bedingt. Das gerade aber dieser technische Fortschritt auch neue Risiken mit sich bringen kann, wird oftmals verdrängt (Health & Safety Executive 2001).

Wie bei Punkt 1.3 bereits festgestellt wurde, ist die Thematik der Entscheidungsfindung im Feuerwehreinsatz von großer Bedeutung, müssen doch zum Teil schwerwiegende Entscheidungen in kurzer Zeit und womöglich aufgrund weniger oder unvollständiger Informationen gefällt werden. Werden falsche Entscheidungen getroffen oder verstreicht zu viel Zeit bei der Entscheidungsfindung, kann dies mit Risiken für Einsatzkräfte und andere Personen verbunden sein.

Was beeinflusst die Entscheidungsfindung, wenn man mit risikobehafteten Situationen konfrontiert wird? Gibt es positive oder negative Faktoren?

Sallis *et al.* stellen dazu fest, dass Personen unter anderem dazu neigen, bei belastenden Situationen auf ihre gewohnten Handlungs- bzw. Entscheidungsmuster zurückzugreifen und dadurch nicht ihre vollen kognitiven Fähigkeiten ausschöpfen. Bei vergleichbaren Entscheidungsfindungsprozessen ohne eine Belastung durch Stress fällt hingegen die Abwägung bzw. Entscheidung oft reflektierter aus (Sallis et al. 2022, S. 2).

Aßmann *et al.* stellen darüber hinaus fest, dass oft nicht nur eine Strategie zum Fällen einer Entscheidung angewandt wird, sondern durchaus unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. So kann beobachtet werden, dass Personen Entscheidungen mit nur wenig geistigem Aufwand treffen und dabei Informationen nicht beachten bzw. diese nicht reflektieren. Diese Strategie erscheint auf den ersten Blick wenig sinnvoll, kann aber gemäß Aßmann *et al.* in bestimmten Fällen durchaus erfolgreich sein, z. B. wenn entsprechende Erfahrungen vorhanden sind. Es kann also durchaus sinnvoll sein, ökonomisch mit der zu leistenden Arbeit bei der Entscheidungsfindung vorzugehen (Aßmann et al. 2022, S. 2–3).

Müssen jedoch komplexe Entscheidungen gefällt bzw. Probleme bearbeitet werden, haben Betsch *et al.* beobachtet, dass dies zu belastendem Stress führen kann. Diese

neuronale Reaktion wird auch kognitive Notfallreaktion genannt. Dies ist eine genetisch prädispositionierte Eigenschaft, die dazu dienen soll, eine schnelle und eher unspezifische Handlungsbereitschaft herzustellen.

Bei risikobehafteter Entscheidungsfindung in sehr belastenden Situationen kann die kognitive Notfallreaktion jedoch kontraproduktiv sein, wie Betsch *et al.* ausführen. Klassischerweise führt sie zur Senkung von kognitiven und intellektuellen Fähigkeiten und dem Aufgeben (teilweise oder völlig) von zuvor geplanten Absichten. An deren Stelle treten Fluchtinstinkt, der Drang zu schneller Vorgehensweise und Steigerung der Risikobereitschaft. Das emotionale Handeln dominiert, das Kognitive wird eher unterdrückt (Betsch *et al.* 2011, S. 172).

Es ist unschwer erkennbar, dass dieses unbewusste Verhalten, das den Menschen angeboren ist, für eine schnelle und rationale Entscheidungsfindung in angespannten Einsatzsituationen in der Regel kontraproduktiv ist.

Aber auch bei Abwesenheit der instinktiv verursachten kognitiven Notfallreaktion können Entscheidungsfindungen problematisch sein. So berichten Aßmann *et al.*, dass auch der Umgang mit den verfügbaren Informationen die Entscheidungsfindung beeinflussen kann. So haben bei ihren Untersuchungen einige Personen weiterhin nach Informationen gesucht, obwohl sie bereits alle für die Entscheidung notwendigen Daten vorliegen hatten. Aßmann *et al.* interpretieren dies dahingehend, dass das Vorhandensein mehrerer kongruenter Informationen die subjektive Sicherheit bei der Entscheidungsfindung erhöht. Sind die zusätzlichen Informationen jedoch nicht kongruent, erschwert dies die Entscheidungsfindung und damit die Auswahl der richtigen Option (Aßmann *et al.* 2022, S. 11).

Ein Übermaß an wenig- bis nichtrelevanter und widersprüchlicher Informationen führt also gemäß Aßmann *et al.* eher dazu, dass die untersuchten Personen noch weiter nach verwertbaren Informationen suchen, um eine gesicherte Datenlage für ihre Entscheidung zu haben. Dass die nicht notwendigen Informationen schlicht nicht beachtet wurden, wurde stattdessen in den meisten Fällen nicht beobachtet. Zu viele (irrelevante) Informationen führen also eher zu einer Hemmung bei der Auswahl der richtigen (und damit in der Regel sicheren) Entscheidung (Aßmann *et al.* 2022, S. 12).

Es kann festgestellt werden, dass das Treffen von (richtigen) Entscheidungen von einer Vielzahl Faktoren abhängen kann. Sowohl genetische Disposition, die zu instinktivem Verhalten führt, als auch das Fehlen oder ein Überangebot von Informationen können

dazu führen, dass Entscheidungen beeinflusst werden und nicht optimal getroffen werden.

Das führt direkt zu der Frage, inwieweit das Treffen von Entscheidungen unter Stress trainiert bzw. gelernt werden kann.

Der Psychologe Tilmann Betsch hat dazu in einem Interview ausgeführt, dass beim Erlernen von schnellen Entscheidungen bei risikobehafteten Situationen insbesondere folgende Faktoren eine Rolle spielen. Zum einen ist es die Tatsache zu verstehen bzw. zu trainieren, dass in bestimmten Situationen schnell Entscheidungen getroffen werden müssen, da ein Zuwarten oder Prokrastinieren zu einem unerwünschten Ausgang führen wird. Zum anderen ist es eine Fähigkeit, die Betsch als „*recognition primed decision making*“ bezeichnet. Also die Fähigkeit zu erkennen, dass man diese oder eine ähnliche Situation bereits schon einmal erlebt und -im Idealfall- erfolgreich gelöst hat. Dann kann man darauf zurückgreifen und schnell und routiniert eine Entscheidung treffen, die in der Regel auf der Erfahrung der bereits erlebten Situation beruht. Ein dritter Aspekt, den Betsch hierbei beschreibt, ist jedoch ebenfalls von großer Bedeutung: nämlich die Fähigkeit zu erkennen, inwieweit Abweichungen in der konkreten Situation vorliegen, die nicht mit den bereits erfahrenen, früheren Erlebnissen übereinstimmen und daher evtl. zu neuen Einschätzungen und anderen Entscheidungen führen müssen. Routinen sind also wichtig und können erlernt und auch trainiert werden, müssen jedoch stets mit der konkreten Situation abgeglichen werden, um auch Risiken zu erkennen, die bis dato noch nicht erfahren wurden (Silvia Feist 08.08.2018).

Daraus kann gefolgert werden, dass ständiges Training und Übungs- und Einsatzerfahrung dabei helfen können, einen Erfahrungsschatz zu entwickeln, der das schnelle und sichere Entscheiden im Feuerwehreinsatz erleichtern und unterstützen kann. Sallis *et al.* stellt jedoch fest, dass dies allein keine Garantie für eine sichere Einsatzabwicklung ist. Nach seiner Beobachtung können auch Feuerwehrführungskräfte zuweilen Fehler unterlaufen. Er führt dies unter anderem auf mangelndes Bewusstsein bei der Verarbeitung von Informationen zurück. So können ihm zufolge z. B. vorliegende Informationen falsch interpretiert oder der Fokus bei der Entscheidung auf mangelhaften Informationen beruhen. Aber auch eine gewisse situative Prägung kann laut Sallis *et al.* eine Ursache für falsche Beurteilungen bei der Entscheidungsfindung sein. Dies bedeutet, dass eine Situation fälschlicherweise als Routine identifiziert wird und dann ungünstige Entscheidungen anhand der bereits erlebten Situationen gemacht werden, die aktuell aber nicht zum Erfolg führen (Sallis et al., 2022, S. 1).

Interessanterweise kommen auch Hagemann *et al.* zu dem Schluss, dass mit zunehmender Erfahrung einer Feuerwehrlührungskraft das Risiko steigen kann, das Entscheidungen nicht mehr aufgrund der vorgefundenen konkreten Situation bewertet und getroffen werden, sondern lediglich nur noch durch abgerufenes Erfahrungswissen aus (vermeintlich) vergleichbaren Ereignissen. Hagemann *et al.* sprechen daher von einer „Illusion der Kontrollierbarkeit“ in diesem Zusammenhang. Diese geht oft einher mit dem Überschätzen der eigenen Fähigkeit und dem Unterschätzen des Risikos der Einsatzsituation (Hagemann et al. 2022b).

Im Prinzip entspricht dies den Erläuterungen von Betsch, der wie bereits beschrieben wurde, darauf hingewiesen hat, dass routinierten Verhalten allein nicht ausreicht, wenn unbekannte oder abweichende Gegebenheiten angetroffen, diese aber nicht erkannt werden.

Er spricht bei Experten von einer „Vorwärtsstrategie“, das heißt erfahrene Einsatzkräfte greifen auf ihr angesammeltes Wissen zurück und übertragen dies auf die konkrete, zu bewältigende Situation (Betsch et al. 2011, S. 170).

Ein weiterer Aspekt neben der reinen Entscheidungsfindung der Einsatzkräfte ist jedoch auch, wie die Kräfte innerhalb der taktischen Einheiten Informationen austauschen und damit ein gemeinsames Verständnis über das geplante Vorgehen bzw. die getroffenen risikobehafteten Entscheidungen herstellen können.

Hagemann *et al.* messen diesem Zusammenspiel eine besondere Bedeutung zu. Das schnelle Weitergeben von Informationen, Lageänderungen sowie weiterer relevanter Informationen ist ihrer Ansicht nach sehr wichtig für ein erfolgreiches Agieren der taktischen Einheit bzw. des Teams (Hagemann et al. 2012).

Hinzu kommt laut Hagemann, dass Einsatzkräfte zum Teil erheblichem Stress bei ihrer Tätigkeit ausgesetzt sind. Sie müssen nicht nur risikobehaftete Entscheidungen für ihre Kolleginnen und Kollegen bzw. für Dritte treffen, auch ihre eigene Sicherheit und Gesundheit können dadurch bedroht sein. Das unterscheidet diese Gruppe von z. B. medizinischem Personal, welches zwar ebenfalls weitreichende Entscheidungen treffen muss, dabei aber nicht selbst in ihrer körperlichen Unversehrtheit bedroht ist. Hinzu kommen weitere Einflussgrößen wie z. B. klimatische Faktoren, unbekannte Umgebungen bzw. Objekte, Zeitdruck, hohe Komplexität, plötzliche Lageänderungen und mangelhafte Informationen (Hagemann et al. 2012).

Ein zusätzliches Phänomen, das bei Einsatzkräften erheblichen Stress induzieren kann, tritt dann auf, wenn grundlegende Vorgaben der Tätigkeit und der erhoffte Einsatzerfolg nicht in Einklang zu bringen sind. So führen Hagemann *et al.* beispielsweise an, dass Feuerwehreinsatzkräfte stets nach dem Prinzip vorgehen, zunächst für den eigenen Schutz zu sorgen und erst danach Dritte in Sicherheit zu bringen (Hagemann *et al.* 2012).

Dieses Vorgehen ist auch im feuerwehrspezifischen Vorschriften- und Regelwerk der DGUV zu finden und wird dort mit dem Leitsatz „*Eigenschutz geht vor Fremdschutz*“ prägnant zusammengefasst (DGUV e. V. 2018).

Hagemann *et al.* sprechen in diesem Zusammenhang von Zielkonflikten, wenn Einsatzkräfte objektiv (oder auch nur subjektiv) wahrnehmen, dass der gewünschte Einsatzerfolg nur dann erreicht werden kann, wenn z. B. der Eigenschutz bzw. der der anderen Mitglieder der taktischen Einheit nicht gewährleistet wird. Erleben Einsatzkräfte solche Zielkonflikte bei ihrer Entscheidungsfindung, führt dies in der Regel zu einer starken emotionalen Belastung. Dies kann eine objektive und rationale Entscheidungsfindung (negativ) beeinflussen und führt oft auch zu riskanten Entscheidungen. Als Gründe führen Hagemann *et al.* an, dass in solchen Situationen gehäuft intuitiv, also „aus dem Bauch heraus“ und mit uneindeutiger Priorisierung entschieden wird (Hagemann *et al.* 2022b).

Weitere Zielkonflikte können die Notwendigkeit von sehr schnellem, aber zwingend fehlerfreiem Handeln sein. Hierbei ist es oft so, dass die Schere zwischen dem zügigen Umsetzen einer angeordneten Maßnahme und der gewährleisteten Sicherheit auseinander geht (Hagemann *et al.* 2022a).

Die Tatsache, dass einschlägige Sicherheitsaspekte bzw. -vorschriften außer Acht gelassen werden müssen, um das Einsatzziel zu erreichen, ist laut Hagemann *et al.* ein äußerst starker Zielkonflikt. Dieses Vorgehen ist stets mit der Möglichkeit verbunden, dass Einsatzkräfte dadurch zu Schaden kommen. Das Entstehen von Zielkonflikten ist daher zu vermeiden, um Entscheidungsfindungen nicht zu erschweren (Hagemann *et al.* 2022a).

Ein weiteres Phänomen, dass die Entscheidungsfindung (oder auch Führung) im Einsatzgeschehen beeinflussen kann, ist laut Heinemann *et al.* der Umstand, dass sich Stress nicht nur individuell, sondern auch innerhalb einer taktischen Einheit negativ auswirken kann. Im schlimmsten Fall bedeutet dies, dass durch stressbedingte Fehlleistung einer Einsatzkraft der Einsatzerfolg des ganzen Teams verloren gehen kann.

Das Erkennen, Umgehen und Entgegenwirken einer Induktion von Stress einer einzelnen Person auf das Team ist daher eine wichtige Fähigkeit, um Einsatzerfolg und Sicherheit zu gewährleisten (Heinemann et al. 2024).

Was sollte also beachtet werden, um schnelle und rationale Entscheidungen bei Feuerwehreinsätzen treffen zu können?

Aust *et al.* gehen davon aus, dass die Kenntnis und die Anwendung von effektiven Teamprozessen innerhalb einer taktischen Einheit dabei helfen, die Kommunikation zu verbessern und das Stresslevel deutlich zu reduzieren. Dies führt gemäß Aust *et al.* zu souveränen Entscheidungen und kann daher das Unfallrisiko der Einsatzkräfte senken (Fabienne Aust 2021).

Ein Weg, um dies zu erreichen wird von Aust *et al.* wie folgt vorgeschlagen: Durch Schulungs- und Trainingsmaßnahmen soll erreicht werden, dass die Mitglieder der taktischen Einheit eine sogenannte *Flow*-Erfahrung erleben. Aust *et al.* beschreiben dies als „Zustand [...], in dem sich Individuen vollständig in eine herausfordernde Aufgabe vertieft fühlen“ (Aust et al. 2023, S. 340). Im stressbelasteten Einsatzgeschehen kann das Arbeiten im *Flow* zu gesteigerter Leistung und einem positiven Empfinden führen (Aust et al. 2023, S. 340).

Eine weitere Steigerung dazu beschreiben Aust *et al.* im *Team-Flow*. Dies bedeutet das gemeinsame Erleben eines *Flow*-Ereignisses aller Einsatzkräfte innerhalb einer taktischen Einheit. Es wird angenommen, dass es gerade in risikobehafteten, dynamischen Schadenslagen von Vorteil ist, wenn die Einsatzkräfte durch das Erleben des *Team-Flows* Entscheidungen effizienter treffen und dadurch ihre spezifischen Aufgaben sicherer ausführen können. *Team-Flow* ist also mit einer gesteigerten Effizienz und Sicherheit in der Leistung der taktischen Einheit verbunden (Aust et al. 2023, S. 340). Voraussetzung für ein *Team-Flow* Ereignis ist zum einen eine gute Kommunikation innerhalb der taktischen Einheit, aber auch mit Dritten, haben Aust *et al.* festgestellt. Zum anderen ist die Qualität und der Umfang der weitergegebenen Informationen ein entscheidender Faktor (Aust et al. 2023, S. 357).

Ein weiterer wesentlicher Aspekt für gute Teamergebnisse und auch das Erleben des *Team-Flow* Effektes ist laut Aust *et al.* das Führungsverhalten in der taktischen Einheit. Erleben die Einsatzkräfte ihre Führungskraft als wichtige und verlässliche Ressource, führt dies in der Regel auch zu guten Teamergebnissen (Aust et al. 2023, S. 353).

Dies ist insofern nachvollziehbar, da in der Regel die Führungskräfte dafür verantwortlich sind, ihre Entscheidungen klar zu kommunizieren und das richtige Maß an relevanten Informationen zu einem geeigneten Zeitpunkt an ihre Mannschaft weiterzugeben. Einen weiteren hilfreichen Aspekt zum sicheren Tätigwerden beschreiben Hagemann *et al.* mit dem Begriff eines „*shared mental model*“, also einer gemeinsamen Basis an Wissen über Abläufe und strategisch-taktische Zusammenhänge. Die Idee dahinter ist, dass bei dem Vorhandensein eines gemeinsamen Verständnisses zu Vorgehensweisen, Entscheidungen und fachlichem Wissen die Teamleistung gesteigert werden kann (Hagemann *et al.* 2012).

Gute Teamleistung kann in der Regel mit Einsatzerfolg und sicherem Tätigwerden assoziiert werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Treffen von risikobehafteten Entscheidungen unter Zeitdruck durch zahlreiche Faktoren sowohl negativ wie auch positiv beeinflusst werden kann.

9.2 Gefährdungsbeurteilung im Feuerwehreinsatz

Wie in Punkt 9.1 dargelegt, ist die Entscheidungsfindung dann erschwert und weniger reflektiert, wenn z. B. Zielkonflikte auftreten, zu wenig, zu viele bzw. unspezifische Informationen vorliegen, Zeitdruck herrscht und das Entscheiden mit persönlichen Risiken bzw. für Dritte verbunden ist. Unspezifische, intuitive und wenig rationale Entscheidungen können also mit größerer Wahrscheinlichkeit zu unsicheren, risikobehafteten Ergebnissen führen.

Um zu verhindern, dass es zu solchen ungeregelten Situationen kommt, wurde im Arbeitsschutz das Prinzip der Gefährdungsbeurteilung eingeführt (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2021).

Der Grundgedanke dazu ist, bereits im Vorfeld der Aufnahme der Tätigkeit die potenziellen Gefährdungen zu antizipieren und durch das präventive Festlegen geeigneter Maßnahmen nicht wirksam werden zu lassen. Auch im Bereich der ehrenamtlichen (also freiwilligen) Feuerwehreinsatzkräfte ist das Prinzip der Gefährdungsbeurteilung dem Grunde nach eingeführt, wenn auch mit gewissen Erleichterungen, die der Tatsache der ehrenamtlichen Tätigkeit geschuldet sind.

Die DGUV Vorschrift 49 setzt mit dem §4 den rechtlichen Rahmen für Sicherheit und Gesundheit im Bereich der Freiwilligen Feuerwehr:

„Die Unternehmerin oder der Unternehmer hat Gefährdungen im Feuerwehrdienst zu ermitteln und erforderliche Maßnahmen für Sicherheit und Gesundheitsschutz für alle Feuerwehrangehörigen zu treffen. Diese Maßnahmen sind insbesondere aus dem feuerwehrspezifischen Regelwerk abzuleiten.“ (DGUV e. V. 2018, S. 15).

Um den Spezifika des ehrenamtlichen Einsatzdienstes Rechnung zu tragen, sind gerade im Hinblick auf die Beurteilung von Gefährdungen einiger Erleichterungen im autonomen Satzungsrecht der Unfallversicherungsträger enthalten. So beschreibt die DGUV Information 205-021 *„Leitfaden zur Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung im Feuerwehrdienst“*, dass nicht für jede Tätigkeit des Feuerwehrdienstes eine Gefährdungsbeurteilung erstellt werden muss. Der Grund hierfür liegt im §3(5) der DGUV Vorschrift 1 *„Grundsätze der Prävention“*, der ermöglicht, dass ehrenamtliche Feuerwehrangehörige gleichwertige Maßnahmen ergreifen können, die einer Gefährdungsbeurteilung entsprechen. Die Erläuterungen der DGUV -Information 205-021 können wie folgt zusammengefasst werden:

„Ergreifen Feuerwehren Maßnahmen gemäß den Inhalten des Vorschriften- und Regelwerks der Unfallversicherungsträger und den Feuerwehr-Dienstvorschriften ist dies in der Regel gleichwertig zu den Maßnahmen, die bei Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung ermittelt werden würden. Werden diese berücksichtigt, kann die Gleichwertigkeit gemäß der DGUV Vorschrift 1 unterstellt werden. Dennoch gibt es Anlässe im Feuerwehrdienst, die einer Gefährdungsbeurteilung bedürfen. Das ist z. B. dann der Fall, wenn für bestimmte Tätigkeiten im Feuerwehrdienst keine bzw. zu wenig konkrete Regelungen durch das Vorschriften- und Regelwerk der Unfallversicherungsträger bzw. Dienstvorschriften bestehen. Aber auch darüber hinaus sind Anlässe vorstellbar, die auch im ehrenamtlichen Einsatzdienst das Durchführen einer Gefährdungsbeurteilung notwendig machen, z. B.:

- sofern ein Abweichen von DGUV-Regeln, -Informationen und -Grundsätzen geplant ist,*
- bei Beschaffung und Umrüstung von Arbeitsmitteln (z. B. Werkzeuge, Maschinen),*
- beim Einsatz neuer Arbeitsstoffe (z. B. Desinfektionsmittel, Schaummittel),*
- nach Unfällen oder Beinaheunfällen im Feuerwehrdienst oder tätigkeitsbedingten Erkrankungen,*
- wenn bauliche Anlagen nicht den Anforderungen des feuerwehrspezifischen Regelwerks entsprechen,*
- bei Hinweisen zu gefährlichen Situationen, z. B. von Behörden, Unfallversicherungsträgern oder Feuerwehrverbänden,*

- *bei Vorbereitung auf Übungen.*“ (DGUV e. V. 2019, S. 10–11).

Für den Bereich der Fahrzeuge, die mit alternativen Energieträgern betrieben werden, kann also festgestellt werden, dass das Erstellen einer Gefährdungsbeurteilung eine Möglichkeit ist, die Anforderungen z. B. der gesetzlichen Unfallversicherung hinsichtlich Sicherheit und Gesundheit von Einsatzkräfte zu erfüllen.

Es existieren zwar bereits seit dem Jahr 2012 DGUV-Informationen zu diesem Thema (DGUV e. V. 2012), die notwendige Tiefe bzw. der erforderliche Detaillierungsgrad, um daraus abschließend alle zu ergreifenden Maßnahmen ableiten zu können, ist noch nicht vorhanden.

9.3 Ansätze zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung

Um Gefährdungen bzw. Risiken ermitteln und beurteilen zu können, sind mehrere Vorgehensweisen denkbar. Um die unterschiedlichen Ansätze bewerten zu können, ist es zunächst hilfreich, die Begrifflichkeiten zu definieren, um präzise differenzieren zu können.

Die DGUV legt mit ihren Begriffsbestimmungen in der DGUV Information 205-021 *„Leitfaden zur Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung im Feuerwehrdienst“* den im deutschsprachigen Raum üblicherweise verwendeten Sprachgebrauch sinngemäß wie folgt fest:

„Der Begriff Gefahr beschreibt eine mögliche Ursache für einen Gesundheitsschaden. Erst jedoch das räumliche und zeitliche Aufeinandertreffen einer Gefahr und einer Einsatzkraft führt zu einer Gefährdung. Diese kann, muss aber nicht wirksam werden.“ (DGUV e. V. 2019, S. 14).

Im Arbeitsschutz werden Gefährdungen üblicherweise in zehn verschiedene Kategorien unterteilt, siehe hierzu auch die Ausführungen im Punkt 6.

Das Risiko kann laut DGUV ermittelt werden, wenn aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und den potenziellen Folgen das Produkt gebildet wird (DGUV e. V. 2019, S. 16).

Einen durchaus ähnlichen Ansatz beschreiben Nagels *et al.*, erweitern den Risikobegriff jedoch noch um den Aspekt der Freiwilligkeit. Ihrer Auffassung nach ist das Risiko, im Gegensatz zur Gefahr ein Umstand, dem sich Handelnde in der Regel freiwillig aussetzen. Bei der Beschreibung der Gefahr führen sie aus, dass z. B. ein Naturereignis

erst dann zur Gefahr wird, wenn es auf menschliches Leben bzw. deren Schutzgüter trifft (Nagels et al. 2021).

Dies ähnelt wiederum dem Prinzip Gefahr – Gefährdung wie es im Regelwerk der DGUV beschrieben ist.

Nagels *et al.* kommen zu dem Schluss, dass eine einheitliche Definition des Begriffes Risiko und damit dessen Art der Bestimmung nicht sinnvoll möglich ist. Ermitteln von Risiken bzw. im übertragenen Sinne daher auch Gefährdungsbeurteilungen können, je nach Ausgangsfragestellung in mehreren Verfahren durchgeführt werden. Sie unterscheiden hierbei folgende drei Ansätze bzw. Herangehensweisen (Nagels et al. 2021):

- semi-probabilistischer/semi-quantitativer Ansatz:

Hierbei kann das Risiko durch das Bilden des Produktes von Eintrittswahrscheinlichkeit und antizipierte Schadenshöhe bzw. -auswirkung numerisch ausgedrückt werden. Dadurch können Risiken miteinander verglichen und geeignete Maßnahmen festgelegt bzw. priorisiert werden. Das Belegen von Risiken mit Zahlenwerten ermöglicht es auch (gesellschaftlich akzeptierte), Grenzkrisiken zu definieren.

- psychologisch-kognitiver Ansatz:

Hier wird die einzelne Person in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt. Dies führt zwangsläufig zu einer eher individuellen, weniger objektiven Beurteilung des Risikos. Betrachtet werden hierbei z. B., ob bei einer Person Zwang oder Freiwilligkeit besteht, sich einem Risiko auszusetzen, oder ob die Person für sich einschätzt, die riskante Situation beherrschen zu können. Auch die individuelle Wahrnehmung spielt eine Rolle: so schätzen Personen Ereignisse als wahrscheinlicher ein, wenn z. B. schon in Medien darüber berichtet wurde. Greif- und vorstellbare Ereignisse werden oft mit einer erhöhten Eintrittswahrscheinlichkeit assoziiert.

- soziokultureller Ansatz:

Bei dieser Herangehensweise wird das Risiko aus gesellschaftlicher und soziokultureller Sicht bewertet. Die Mehrheitsmeinung und z. B. die gesellschaftliche Risikokommunikation sind hierbei wesentliche Einflussfaktoren. Gemeinschaftliche Risikoakzeptanz und der gesellschaftlich erwartete Umgang mit einem Risiko können, unter anderem auch durch politische Schwerpunktbildung geprägt bzw. diskutiert und damit festgelegt werden. (Nagels et al. 2021).

Je nach Art der Betrachtung kann es also sinnvoll sein, sich dem Thema Risiken und Gefährdungen auf verschieden Arten zu nähern bzw. differierende Methoden anzuwenden. Über die bereits beschriebenen Ansätze hinaus gibt es jedoch noch weitere

Denkweisen. Im Feld der industriellen Sicherheit bzw. im Qualitätssicherungsbereich beschreibt z. B. das britische *Health and Safety Executive* bereits im Jahr 2001 verschiedene Standards, die zur Festlegung eines Grenzrisikos herangezogen werden können. Das Prinzip *so far as is reasonably practicable* - so weit wie vernünftigerweise durchführbar (SFAIRP) wurde bereits im Jahr 1974 im *Health and Safety at Work Act* in Großbritannien eingeführt (HASpod 2021). Dies wird oft gleichgesetzt mit dem Term *as low as reasonably practicable* - so niedrig wie vernünftigerweise praktikabel (ALARP), wobei es sich aber um unterschiedliche Stufen der Risikominimierung handelt. Grundgedanke dabei ist jedoch in beiden Fällen, dass Risiken nicht oder nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand völlig ausgeschlossen werden können. Ziel sollte daher sein, mit vertretbarem Aufwand ein möglichst hohes Schutzniveau zu erreichen (Health & Safety Executive 2001).

Allen diesen Methoden ist gemeinsam, dass sie in der Regel antizipativ, also im Vorfeld einer eventuell wirksamen Gefährdung angewandt werden. Gerade aber im Einsatzgeschehen von Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen ist dies oft nicht möglich. Hier wird daher auf das Prinzip der *ad hoc* Beurteilung im Rahmen des Einsatzführungsvorganges zurückgegriffen. Dies ist in der Feuerwehrdienstvorschrift 100 „*Führung und Leitung im Einsatz*“ verankert und legt fest, dass während des Führungsvorganges, der aus Lagefeststellung, Planung und Befehlsgebung besteht, die möglichen Gefährdungen erkannt und priorisiert werden (Staatliche Feuerweherschule Würzburg 1999). Hierbei wird jedoch nicht nur die Gefährdung der eigenen Einsatzkräfte betrachtet, sondern auch die für weitere Personen, Tiere, Sachwerte und die Umwelt. Es erfolgt eine enge Verknüpfung mit strategisch-taktischen Überlegungen, die dazu dienen, möglichst effizient den gewünschten Einsatzerfolg festzulegen und zu erzielen (Staatliche Feuerweherschule Würzburg 2023). Da es sich um einen Beurteilungsprozess handelt, der spontan in der jeweiligen Einsatzlage durchgeführt wird, bedarf er nicht der Schriftform und kann, je nach Dringlichkeit der Lage, zumindest zu Beginn der Einsatzmaßnahmen auch nur sehr kurz sein. Es ist jedoch vorgesehen, den Prozess im Führungsvorgang iterativ zu wiederholen, um auch Lageveränderungen adäquat festzustellen und im Entscheidungsprozess abzubilden. Richtschnur für das Erkennen von Gefährdungen ist dabei das 4AC4E-Schema, dass mit Hilfe dieser Abkürzung den Führungskräften das Erkennen von Gefahren der

- Ausbreitung
- Atemgifte
- Angstreaktion
- Atomare Gefahren

- Chemische Gefahren
- Erkrankung
- Elektrizität
- Einsturz
- Erkrankung

erleichtern soll (Staatliche Feuerweherschule Würzburg 2023).

Momentan läuft in der Fachwelt die Diskussion, diese Auflistung um weitere Gefahren zu ergänzen. So schlagen z. B. Cimolino *et al.* vor, die Aufzählung um die Schlagworte „*Absturz*, *Biologische Gefahren* und *Ertrinken*“ zu 5ABC5E zu erweitern (Cimolino U. und Knorr K.-H. 2024).

Die DGUV erkennt diesen, in der FwDV 100 verankerten Prozess als Gefährdungsbeurteilung im Einsatz an, verknüpft dies jedoch mit der Einschränkung, dass stets abgewogen werden muss, inwieweit das verbleibende Restrisiko durch den zu erwartenden Einsatzerfolg gerechtfertigt ist (DGUV e. V. 2018).

Es kann festgestellt werden, dass Risiken und Gefährdungen auf verschiedenste Arten und Methoden ermittelt und bewertet werden können. Nicht alle diese Methoden sind geeignet, die Gefährdungen zu ermitteln und zu bewerten, die beim Einsatz von Einsatzkräften der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern wirksam werden können. Entweder ist der methodische Ansatz für die Fragestellung nicht oder nur bedingt geeignet, siehe z. B. die von Nagels *et al.* beschriebene soziokulturelle oder psychisch-kognitive Herangehensweise. Oder die Methode ist nicht differenziert genug, um probabilistische Aussagen zuzulassen, wie z. B. der Ansatz des Führungsvorganges gemäß FwDV 100. Dieser ist ein adäquates Mittel, um strukturiert rasche Entscheidungen in einer dynamischen Lage zu treffen, erfasst aber nicht in der notwendigen Tiefe und Detailliertheit die Komplexität der Fragestellungen dieser Arbeit.

Der bereits erwähnte semi-quantitative Ansatz scheint nach den eben getroffenen Abwägungen ein sinnvoller Ansatz zu sein, eine Risikoabschätzung bzw. Gefährdungsbeurteilung in dieser Arbeit durchzuführen, um die Gefährdungen bei Einsatzmaßnahmen an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern systematisch zu ermitteln. Ein weiterer Aspekt zur Wahl dieser Methode ist, dass die DGUV in ihrem feuerwehrspezifischen Regelwerk ebenfalls diese Herangehensweise gewählt hat. Sie kommt in der DGUV Information 205-005 (DGUV e. V. 2011), der DGUV Information 205-021 (DGUV

e. V. 2019) sowie in der DGUV Information 205-014 (DGUV e. V. 2024a) zur Anwendung und stellt somit eine eingeführte Methodik im Bereich der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen dar. Die Wahl einer vergleichbaren Systematik kann als zielführend betrachtet werden, auch um eine gewisse Vergleichbarkeit zu erreichen. Um die Aussagekraft zu erhöhen, werden die wichtigsten Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilungen mit Hilfe einer Nutzwertanalyse auf ihre Wirksamkeit bzw. Effektivität hin untersucht, siehe hierzu Punkt 12.

10 Gefährdungsbeurteilung für relevante Einsatzszenarien

10.1 Festlegen von Schutzziele

Um die richtigen und auch wirksamen Maßnahmen zu Sicherheit und Gesundheitsschutz für Einsatzkräfte festlegen zu können, ist es zunächst erforderlich sich über die zu erreichenden Schutzziele im Klaren zu sein. Erst das Definieren der Schutzziele ermöglicht es, adäquate Maßnahmen festzulegen, die nicht zu mild (und damit unwirksam) aber auch nicht ungerechtfertigt (und damit überzogen) sind.

Die DGUV führt dazu aus, dass Schutzziele eine zu erreichende Soll-Situation bedeuten, anhand derer angemessene Maßnahmen abgeleitet werden können. Existieren z. B. Grenzwerte im Vorschriften- und Regelwerk, stellt deren Einhalten ein Schutzziel dar (DGUV e. V. 2019, S. 18).

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Festlegung, welches Risiko für die Einsatzkräfte gerade noch als tolerabel angesehen wird, da Einsatz Tätigkeiten der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen in der Regel nicht völlig ohne Risiko erfolgen können. Auch dieses, gerade noch akzeptierte Grenzkrisiko stellt einen Soll-Wert dar, der durch die zu treffenden Maßnahmen erreicht werden muss. Je größer die Differenz zwischen dem festgestellten Risiko (Ist-Wert) und dem gerade noch tolerablen Grenzkrisiko (Soll-Wert) ist, desto weitreichender müssen die anzuwendenden Maßnahmen angelegt sein, siehe hierzu auch Abbildung 8 (DGUV e. V. 2019, S. 18).

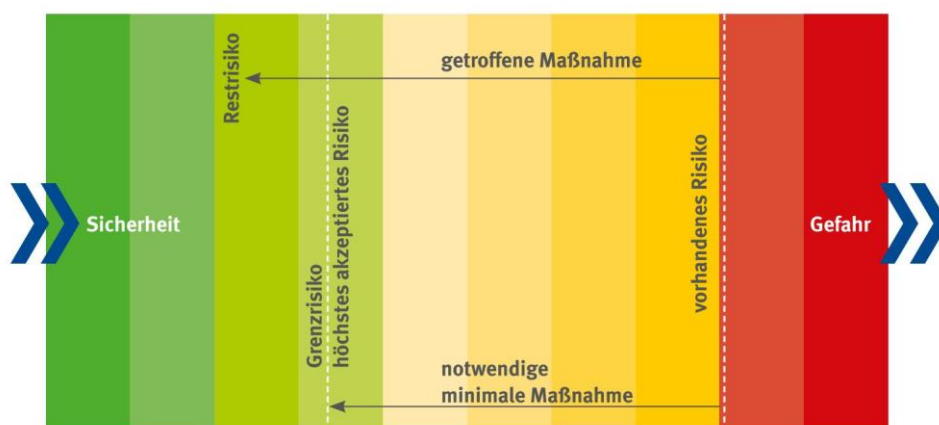


Abbildung 6: Maßnahmen-Restrisiko-Beziehung (DGUV e. V. 2019, S. 18)

Die festzulegenden Maßnahmen können in ihrer Reichweite bzw. in ihrer Wirksamkeit stark variieren. Es ist daher im Arbeitsschutz üblich, eine Wertigkeit der Maßnahme vorzunehmen, um sicherzustellen, dass stets die Maßnahme mit der höchsten Reichweite gewählt wird, sofern diese zur Verfügung steht und auch zur Anwendung kommen kann. Erst wenn dies nicht der Fall ist, darf eine Maßnahme mit einer geringeren Reichweite gewählt werden.

Die BAuA beschreibt die Maßnahmenhierarchie wie folgt:

„Zunächst ist zu prüfen, ob Gefährdungen an der Quelle zu beseitigen oder zu reduzieren sind.

Ist dies nicht möglich, ist zu prüfen, ob die Gefährdungen durch technische Maßnahmen zu beseitigen oder zu reduzieren sind.

Sind technische Maßnahmen nicht möglich oder nicht ausreichend, ist zu prüfen, ob die Gefährdungen durch organisatorische Maßnahmen zu beseitigen oder zu reduzieren sind.

Sind organisatorische Maßnahmen nicht möglich oder nicht ausreichend, ist zu prüfen, ob die Gefährdungen durch den Einsatz von persönlicher Schutzausrüstung zu vermeiden oder zu reduzieren sind.

Sind die vorgenannten Maßnahmen nicht möglich oder nicht ausreichend, ist zu prüfen, ob die Schutzziele durch Qualifikation der Beschäftigten zu erreichen sind.

Zum Erreichen der Schutzziele ist es in den meisten Fällen erforderlich, Maßnahmen zu kombinieren, wobei die Hierarchiestufen und die damit verbundene Wirksamkeit der Maßnahmen zu beachten sind. Ziel ist, das Risiko auf ein akzeptables Maß zu reduzieren.“ (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2021, S. 31).

Die Hierarchie der Maßnahmen wird sehr häufig auch mit dem Akronym STOP zusammengefasst, wobei dies für die Begriffe

- **S**ubstitution
- **T**echnische Maßnahmen
- **O**rganisatorische Maßnahmen
- **P**ersonenbezogene Maßnahmen steht.

Diese Systematik findet im Bereich der Gefährdungsbeurteilungen in der Feuerwehr ebenfalls Anwendung, z. B. in der DGUV Regel 100-001 (DGUV e. V. 2014), der DGUV Information 205-021 (DGUV e. V. 2019) oder auch im Lehrbuch der Feuerwehr (Feuerwehr-Zeitung 2022).

Wobei die DGUV Regel 105-049 auch eine spezifische Eigenschaft in dieser Systematik für den Bereich der Einsatzkräfte beschreibt, da gerade die unplanbaren Einsatz Tätigkeiten es oft nicht zulassen, dass Maßnahmen zur Substitution oder technische Lösungen angewandt werden können. Daher kommen im Bereich der Einsatz Tätigkeiten von Einsatzkräften der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen den organisatorischen und personenbezogenen Maßnahmen besondere Bedeutungen zu (DGUV e. V. 2018).

Die globalen Schutzziele für Einsatzkräfte (EK) in dieser Arbeit werden in Tabelle 11, unter Berücksichtigung der unter Punkt 6. aufgeführten Gefährdungen, definiert.

Tabelle 11: Schutzziele der Einsatzszenarien gemäß Modell 1-4

Gefährdung	Schutzziel
Mechanisch	EK müssen vor gefährdenden mechanischen Einwirkungen geschützt werden.
Elektrisch	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.
Chemisch	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.
Brand/Explosion	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen (im umschlossenen Bereich) geschützt werden.
Biologisch	EK müssen vor gefährdenden biologischen Agenzien geschützt werden.
Thermisch	EK müssen vor gefährdenden thermischen Einwirkungen geschützt werden.
Physikalisch	EK müssen vor gefährdenden physikalischen Einwirkungen geschützt werden.
Arbeitsumgebung	EK müssen vor gefährdenden Einwirkungen durch die Arbeitsumgebung geschützt werden.
Physisch	EK müssen vor gefährdenden physischen Einwirkungen geschützt werden.
Psychisch	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.

Bei der Anwendung auf die unter Punkt 8.2 eingeführten Modellsystematik im folgenden Kapitel können je nach Einsatzszenario und der Art des Energieträgers einzelne Schutzziele auch entfallen, da z. B. keine Gefährdung im jeweiligen Modell bzw. einer Unterkategorie davon identifiziert werden konnte.

10.2 Gefährdungsbeurteilung der definierten Einsatzszenarien

Wie unter Punkt 9.3 bereits ausgeführt wurde, soll in dieser Arbeit der semi-quantitative Ansatz der Gefährdungsbeurteilung zur Anwendung kommen. Die in Punkt 8.2 festge-

legten Einsatzszenarien sollen einzeln einer Gefährdungsbeurteilung unterzogen werden, dabei wird die Systematik gemäß Nohl und Thiemecke zugrunde gelegt (Nohl 1988).

Nohl und Thiemecke haben 1988 erstmals vorgeschlagen, das erwartbare Schadensausmaß sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit zu klassifizieren und daraus Maßnahmengringlichkeiten abzuleiten. Mit dem so ermittelbaren Risikowert können Grenzkrisiken festgelegt und Vergleiche angestellt werden (Nohl 1988). Die Systematik wurde stetig weiterentwickelt (Andrlik 2012), findet weite Verbreitung bei vergleichbaren Arten der Gefährdungsbeurteilung und ist auch Grundlage der bereits erwähnten Mustergefahrungsbeurteilungen der DGUV. Bei einer Umfrage durch Andrlik im Jahr 2012 betrachteten rund 90 % der befragten Arbeitsschutzexpertinnen und -experten die Systematik nach Thiemecke und Nohl als sehr gut geeignet bzw. geeignet, um eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen (Andrlik 2012).

Um die Methodik von Thiemecke und Nohl zur Anwendung bringen zu können, ist es zunächst notwendig, die zu verwendenden Parameter

- Eintrittswahrscheinlichkeit (W),
- Auswirkung / Schweregrad (A),
- Risiko (R) und
- Risikogruppen

für diese Arbeit zu definieren.

Tabelle 12 gibt die Definitionen der Eintrittswahrscheinlichkeiten wieder, die als Grundlage der Gefährdungsbeurteilung in dieser Arbeit dienen. Hierbei ist zu beachten, dass ein abweichender Ansatz als üblicherweise gewählt wird. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird nicht als Häufigkeit pro Zeiteinheit angegeben, sondern als Häufigkeit pro Einsatzfall. Das ist darin begründet, dass Einsatz Tätigkeiten der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen, insbesondere im ehrenamtlichen Bereich, nicht arbeitstätig über einen definierten Zeitansatz durchgeführt werden, wie es z. B. in einem Beschäftigungsverhältnis in Industrie oder Handwerk üblich ist.

Einsätze der Feuerwehr oder der Hilfeleistungsorganisationen hingegen treten akzidentiell, unplanbar und in der Regel unabhängig voneinander auf. Eine Festlegung der Eintrittswahrscheinlichkeit auf sonst übliche Zeiteinheiten wie z. B. einmal pro Woche oder einmal pro Jahr erscheinen unter den beschriebenen Gegebenheiten als nicht aussagekräftig genug. Bezieht man sich jedoch auf die Zahl der Einsatzereignisse, erhält man eine deutlich aussagekräftigere Definition der Eintrittswahrscheinlichkeit.

Tabelle 12: Definition der Eintrittswahrscheinlichkeit (W)

(W)	Eintrittswahrscheinlichkeit
0	Nie (bei 0% der Einsätze)
1	Ausnahmsweise (bei weniger als 10% der Einsätze)
2	gelegentlich (bei >10 % - < 25 % der Einsätze)
3	häufig (bei > 25 % - < 50 % der Einsätze)
4	Sehr häufig (bei > 50% - 100% der Einsätze)

Es ergeben sich somit insgesamt fünf Auswahlmöglichkeiten der Eintrittswahrscheinlichkeit, siehe hierzu Tabelle 12. Es wird unterschieden zwischen Ereignissen, die

- nie,
- bei weniger als jedem zehnten Einsatz,
- bei bis zu jedem vierten Einsatz,
- bei bis zu jedem zweiten und
- bei bis zu jedem Einsatz

eintreten.

Darunter werden in dieser Arbeit jedoch ausschließlich Einsätze mit mindestens einem Fahrzeug mit alternativen Energieträgern verstanden. Einsätze mit ausschließlicher ICEV-Beteiligung sind hierbei nicht berücksichtigt, da diese nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.

Auch für die Auswirkung (A), die den Schweregrad der Folgen beschreibt, werden spezifische Parameter für die Anwendung in dieser Arbeit festgelegt, sind dem Grundsatz nach ebenfalls an Thiemecke und Nohl angelehnt, jedoch erweitert und modifiziert.

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die hier zur Anwendung kommenden Festlegungen, bei welchen nicht nur Verletzungen berücksichtigt werden. Auch die Einwirkung unter anderem von kanzerogenen, mutagenen oder reproduktionstoxischen Gefahrstoffen, physischen und psychische Belastungen, Einwirkungen von außen und elektrischen Körperdurchströmungen wurde hierbei berücksichtigt, um eine möglichst adäquate Einstufung der Auswirkung vornehmen zu können.

Grundlage für die Festlegung der in Tabelle 13 beschriebenen Auswirkungen waren die Erkenntnisse über die ermittelten Gefährdungen des Kapitels 6. Hierbei wurde Wert daraufgelegt, dass eine möglichst passgenaue Einstufung zu den bereits ermittelten Gefährdungen ermöglicht wird. Je nach Energieträger können die Gefährdungen und

daher auch die Auswirkungen zum Teil sehr unterschiedlich sein. Dies wurde bei der Auswahl der Beispiele zum Schweregrad / Auswirkung der Folgen berücksichtigt.

Tabelle 13: Definition von Auswirkung (A) / Schweregrad

Auswirkung (A)	Schweregrad (Auswirkung der Folgen)	
0	keine Auswirkung	--
1	geringe Auswirkung (reversibel)	z. B. – leichte Prellung, – Abschürfung, oberflächliche Schnittwunde – kleinflächige (Kälte-)Verbrennung 1. Grades – reversibler Erschöpfungszustand.
2	mäßige Auswirkung (reversibel)	z. B. – Schnittwunde, die einer ärztlichen Behandlung bedarf, – Knochenbruch, – Bänderriss, – (Kälte-)Verbrennung 2. Grades, – lokaler elektrischer Schlag, – leichte Rauch- oder Ventinggasintoxikation, – Kontamination mit Gefahrstoffen, – reversible Kreislaufstörung bzw. Gehörstörung, – reversible psychische Belastung.
4	schwerwiegende Auswirkung (möglicherweise irreversibel)	z. B. – Blutung / Weichteilschaden / chirurgisches Trauma, – Schwere Rauch- oder Ventinggasintoxikation, – Einwirkungen von Explosionen, – gefährliche elektrische Körperdurchströmung, – akute Herz-Kreislaufkrankung, – großflächige (Kälte-) Verbrennungen 2. oder 3. Grades, – irreversible Gehörstörung, – Kontamination mit krebserzeugenden, mutagenen oder reproduktionstoxischen Gefahrstoffen, – Psychisch-traumatische Belastungsstörung.
8	extreme Auswirkung (irreversibel)	Tod

Beibehalten wurden eine möglichst trennscharfe Unterscheidung in reversible bzw. irreversibile Folgen, da dies für die Bewertung des Schweregrades von großer Bedeutung sein kann.

Gerade aber die Einstufung von reversibel zu irreversibel hin kann nicht immer völlig eindeutig getroffen werden. Daher ist die Auswirkung mit dem Wert 4 (A = 4) in dieser Arbeit als Übergangseinstufung von reversibel zu irreversibel definiert worden.

Des Weiteren muss betont werden, dass die Aufzählungen der Auswirkung der Folgen in Tabelle 13 lediglich beispielhaft sind, um eine Einstufung bzw. Einschätzung vornehmen zu können. Darüber hinaus sind weitere Auswirkungen und Folgen denkbar, z. B. solche, über die momentan noch keine (ausreichende) Kenntnis vorliegt. Die beispielhafte Aufzählung soll deren zukünftige Eingruppierung erleichtern und kann als Richtschnur dafür dienen.

Da nun die Eintrittswahrscheinlichkeiten (W) und die Auswirkungen der Folgen (A) festgelegt sind, kann eine Risikomatrix erstellt werden, die eine Übersicht der Kombinationsmöglichkeiten von A und W und den daraus resultierenden Risikowerten R darstellt. Dies kann der Tabelle 14 entnommen werden.

Tabelle 14: Risikomatrix

		Auswirkung				
		0	1	2	4	8
Wahrscheinlichkeit	0	0	0	0	0	0
	1	0	1	2	4	8
	2	0	2	4	8	16
	3	0	3	6	12	24
	4	0	4	8	16	32
		Risiko (R) = Eintrittswahrscheinlichkeit (W) x Auswirkung (A)				

In Tabelle 14 wurde bereits eine farbliche Gruppierung der Risikowerte vorgenommen. Das ist, angelehnt an ein Ampelsystem erfolgt, welches auch schon bei Thiemecke und Nohl, aber auch in den Publikationen der DGUV zur Anwendung kommt, und dient dazu, den ermittelten Risikowert unmittelbar einer Risikogruppe zuordnen zu können. Die jeweilige Risikogruppe gibt wiederum Aufschluss darüber, ob und wenn ja, wie dringlich der festgestellte Handlungsbedarf ist. Diese Einstufung ist in Tabelle 15 dargestellt. Anhand der farblich unterscheidbaren Risikogruppen ist es möglich, sehr schnell zu bewerten, welche der festgestellten Gefährdungen mit welcher Priorität betrachtet werden müssen.

Tabelle 15: Risikogruppen-Handlungsbedarf Beziehungen

Gruppe	Risiko	Handlungsbedarf
16 - 32	Extrem	Zwingend
8-15	sehr groß	Sehr dringend
3-7	Groß	dringend
1-2	Mäßig	Gering
0	Akzeptabel	Keiner

Wie aus der Tabelle 15 hervorgeht, besteht lediglich bei der Risikogruppe 0 (grün) kein Handlungsbedarf, da das ermittelte Risiko unterhalb des Grenzkrisikos liegt. Alle weiteren Risikogruppen erfordern, proportional zum ermittelten Risiko, einen steigenden Handlungsbedarf. Ein Vorteil der farblichen Gruppierung ist bereits in Tabelle 16 ersichtlich, die die Zusammenfassung der durchgeführten Gefährdungsbeurteilungen enthält. Mit Hilfe des Farbsystems können die ermittelten Risiken schnell den Gefährdungen bzw. den Szenarien / Clusterungen in den Szenarien zugeordnet werden. Da die einzelnen Gefährdungsbeurteilungen, die nach dem im Punkt 10 beschriebenen Verfahren durchgeführt wurden, in Summe sehr umfangreich sind, sind diese im Detail im **Anhang** (Punkt 17) zu finden.

Eine Zusammenfassung aller ermittelten Risiken (siehe hierzu auch Punkt 6) der in Punkt 8.2 beschriebenen Szenarien kann der Tabelle 16 entnommen werden.

Tabelle 16: Zusammenfassung der Gefährdungsbeurteilungen - ermitteltes Risiko

Szenario	Gefährdung / ermitteltes Risiko								
	Mechanisch	Elektrisch	Chemisch	Brand / Ex	Brand / Ex *	Thermisch	Physikalisch	Arbeitsumgebung	Psychisch
K 1.1.1	4	8	12	12	24	12	0	0	3
K 1.1.2	4	8	12	12	24	12	0	0	3
K 1.1.3	4	4	4	8	8	4	0	0	3
K 1.1.4	2	8	4	8	8	4	0	0	3
K 1.2.1	4	8	12	12	24	12	0	0	3
K 1.2.2	4	8	12	12	24	12	0	0	3
K 1.2.3	4	4	4	8	8	4	0	0	3
K 1.2.4	2	8	4	8	8	4	0	0	3
K 1.3.1	4	4	8	8	24	8	0	0	3
K 1.3.2	4	4	8	8	24	8	0	0	3
K 1.3.3	4	4	4	4	8	8	0	0	3
K 1.3.4	2	4	4	8	8	4	0	0	3
K 2.1.1	4	8	12	12	24	12	0	0	3
K 2.1.2	4	8	12	12	24	12	0	0	3
K 2.1.3	4	8	8	12	24	12	0	0	3
K 2.1.4	2	8	12	12	24	12	0	0	3
K 2.2.1	4	8	12	12	24	12	0	0	3
K 2.2.2	4	8	12	12	24	12	0	0	3
K 2.2.3	4	8	8	12	24	12	0	0	3
K 2.2.4	2	8	12	12	24	12	0	0	3
K 2.3.1	2	4	8	8	24	8	0	0	3
K 2.3.2	4	4	8	8	24	8	0	0	3
K 2.3.3	4	4	8	8	24	8	0	0	3
K 2.3.4	4	8	8	8	24	8	0	0	3
K 3.1.1	2	2	12	16	24	16	4	4	3
K 3.1.2	2	2	4	12	24	12	4	4	3
K 3.1.3	2	2	4	8	16	8	4	4	3
K 3.1.4	2	2	4	8	16	8	4	4	3
K 3.2.1	2	2	12	16	24	16	4	4	3
K 3.2.2	2	2	4	12	24	12	4	4	3
K 3.2.3	2	2	4	8	16	8	4	4	3
K 3.2.4	2	2	4	8	16	8	4	4	3
K 3.3.1	2	2	8	12	24	12	4	4	3
K 3.3.2	2	2	4	12	24	8	4	4	3
K 3.3.3	2	2	4	8	16	8	4	4	3
K 3.3.4	2	2	4	8	16	8	4	4	3
K 4.1.1	2	2	12	16	24	16	4	4	3
K 4.1.2	2	2	12	12	24	12	4	4	3
K 4.1.3	2	2	12	12	24	12	4	4	3
K 4.1.4	2	2	12	8	16	8	4	4	3
K 4.2.1	2	2	12	16	24	16	4	4	3
K 4.2.2	2	2	12	12	24	12	4	4	3
K 4.2.3	2	2	12	12	24	12	4	4	3
K 4.2.4	2	2	12	8	16	8	4	4	3

Szenario	Gefährdung / ermitteltes Risiko								
	Mechanisch	Elektrisch	Chemisch	Brand / Ex	Brand / Ex *	Thermisch	Physikalisch	Arbeitsumgebung	Psychisch
K 4.3.1	2	2	8	12	24	12	4	4	3
K 4.3.2	2	2	8	12	24	12	4	4	3
K 4.3.3	2	2	8	12	24	8	4	4	3
K 4.3.4	2	2	8	8	24	8	4	4	3

Da sich beim Durchführen der Gefährdungsbeurteilungen gezeigt hat, dass das in Punkt 8.2 mit dem „*-Symbol eingeführte Unterscheidungsmerkmal „*im umschlossenen Bereich*“, siehe hierzu auch die Tabellen 7 bis 10, insbesondere bei der Gefährdung „*Brand / Explosion*“ zum Teil erhebliche Unterschiede in der Risikohöhe ergeben, wurde dafür in Tabelle 16 eine eigene Spalte eingeführt, um dies ausreichend darstellen zu können.

Andererseits wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Darstellung der biologischen Gefährdung in Tabelle 16 verzichtet, da die Gefährdungsbeurteilungen dafür durchgehend ein Risiko von Null (grün) ergeben haben.

Beim Betrachten der Tabelle 16 fällt auf, dass die Gefährdungsbeurteilungen zu allen Einsatzszenarien bei den Gefährdungen „*chemisch*“, „*Brand / Explosion*“, und „*thermisch*“ regelmäßig zu Ergebnissen in den beiden höchsten Risikogruppen geführt haben, wobei die Gefährdung „*Brand / Explosion im umschlossenen Bereichen*“ nahezu ausschließlich, bis auf wenige Ausnahmen in der höchsten Risikogruppe einzustufen ist.

Noch deutlicher wird diese Verteilung in Tabelle 17, die die Häufigkeiten der Risikogruppen und der einzelnen Gefährdungen bei allen 48 beschriebenen Einsatzszenarien miteinander in Beziehung setzt.

Tabelle 17: Häufigkeiten der Risikogruppen und Gefährdungen

Gefährdung	Risikogruppe				
	0	1-2	3-7	8-15	16-32
Mechanisch	0	62,5% (30)	37,5% (18)	0	0
Elektrisch	0	50% (24)	14,6% (7)	35,4% (17)	0
Chemisch	0	0	31,3% (15)	68,7% (33)	0
Brand / Ex	0	0	2% (1)	89,5% (43)	8,5% (4)
Brand / Ex*	0	0	0	12,5% (6)	87,5% (42)
Thermisch	0	0	10,4% (5)	81,3% (39)	8,3% (4)
Physikalisch	50% (24)	0	50% (24)	0	0
Umgebung	50% (24)	0	50% (24)	0	0
Psychisch	0	0	100% (48)	0	0

* im umschlossenen Bereich

Gesamtanzahl der Szenarien: 48 / in Klammern: absolute Zahl

In Tabelle 17 wurde dargestellt, wie die ermittelten Gefährdungen innerhalb der in Tabelle 15 definierten Risikogruppen verteilt sind.

Von weiterem Interesse ist darüber hinaus auch die Fragestellung, inwieweit bei den vorgenommenen Gefährdungsbeurteilungen Kategorien identifiziert werden konnten, die ein hohes Risiko aufweisen. Um dieser Frage nachzugehen, wurden die ermittelten Risikowerte Kategorien-spezifisch addiert, um je einen Risikosummenwert (RSW) pro Kategorie zu erhalten. Mit dieser Hilfsgröße ist es möglich, die Kategorien miteinander zu vergleichen und z. B. solche mit einem hohen Risikosummenwert zu ermitteln.

Die Darstellung der Risikosummenwerte pro Kategorie und deren Zuordnungen wurde in den Tabellen 18 - 21 vorgenommen. Summenwerte über 50 werden hervorgehoben. Die weitere Interpretation der Ergebnisse aus den Tabellen 18 – 21 erfolgt im Punkt 13.1.

Tabelle 18: Risikosummenwerte (RSW) Modell 1

Modell	Szenario	Risikofaktor	Kategorie	RSW
M 1 Verkehrsunfall mit BEV	S1/S1* Person(en) eingeklemmt	R1/R1* HV-Speicher betroffen	1.1.1	51
			1.1.1*	63
		R2/R2* HV-Speicher kritisch	1.1.2	51
			1.1.2*	63
		R3/R3* HV-Speicher primär stabil	1.1.3	27
			1.1.3*	27
		R4/R4* BEV mit Ladeinfrastruktur ver- bunden	1.1.4	29
			1.1.4*	29
	S2/S2* Person(en) eingeschlossen	R1/R1* HV-Speicher betroffen	1.2.1	51
			1.2.1*	63
		R2/R2* HV-Speicher kritisch	1.2.2	51
			1.2.2*	63
		R3/R3* HV-Speicher primär stabil	1.2.3	27
			1.2.3*	27
		R4/R4* BEV mit Ladeinfrastruktur ver- bunden	1.2.4	29
			1.2.4*	29
	S3/S3* Keine Person im Fahrzeug	R1/R1* HV-Speicher betroffen	1.3.1	35
			1.3.1*	51
		R2/R2* HV-Speicher kritisch	1.3.2	35
			1.3.2*	51
		R3/R3* HV-Speicher primär stabil	1.3.3	27
			1.3.3*	27
		R4/R4* BEV mit Ladeinfrastruktur ver- bunden	1.3.4	25
			1.3.4*	25

* in umschlossenen Bereichen

Tabelle 19: Risikosummenwerte (RSW) Modell 2

Modell	Szenario	Risikofaktor	Kategorie	RSW
M 2 Brand eines BEV	S1/S1* Person(en) eingeklemmt	R1/R1* HV-Speicher propagiert / raucht	2.1.1	51
			2.1.1*	63
		R2/R2* HV-Speicher durch se- kundären Brand beaufschlagt	2.1.2	51
			2.1.2*	63
		R3/R3* Zustand des HV-Spei- chers unbekannt, primär stabil	2.1.3	47
			2.1.3*	59
		R4/R4* BEV mit Ladeinfrastruktur verbun- den	2.1.4	49
			2.1.4*	61
	S2/S2* Person(en) eingeschlossen	R1/R1* HV-Speicher propagiert / raucht	2.2.1	51
			2.2.1*	63
		R2/R2* HV-Speicher durch se- kundären Brand beaufschlagt	2.2.2	51
			2.2.2*	63
		R3/R3* Zustand des HV-Spei- chers unbekannt, primär stabil	2.2.3	27
			2.2.3*	27
		R4/R4* BEV mit Ladeinfrastruktur verbun- den	2.2.4	29
			2.2.4*	29
	S3/S3* Keine Person im Fahrzeug	R1/R1* HV-Speicher propagiert / raucht	2.3.1	33
			2.3.1*	49
		R2/R2* HV-Speicher durch se- kundären Brand beaufschlagt	2.3.2	35
			2.3.2*	51
		R3/R3* Zustand des HV-Spei- chers unbekannt, primär stabil	2.3.3	35
			2.3.3*	51
		R4/R4* BEV mit Ladeinfrastruktur verbun- den	2.3.4	39
			2.3.4*	55

* in umschlossenen Bereichen

Tabelle 20: Risikosummenwerte (RSW) Modell 3

Modell	Szenario	Risikofaktor	Kategorie	RSW
M 3 Verkehrsunfall mit gasbetriebenen Fahrzeug	S1/S1* Person(en) eingeklemmt	R1/R1* Gasspeicher be- troffen, Gas tritt brennend aus	3.1.1	59
			3.1.1*	67
		R2/R2* Gasspeicher be- troffen, Gas tritt aus	3.1.2	43
			3.1.2*	51
		R3/R3* Zustand des Gasspeichers unbekannt aber primär stabil	3.1.3	35
			3.1.3*	43
		R4/R4* Fahrzeug mit Tankinfrastruk- tur verbunden	3.1.4	35
			3.1.4*	43
	S2/S2* Person(en) eingeschlossen	R1/R1* Gasspeicher be- troffen, Gas tritt brennend aus	3.2.1	59
			3.2.1*	67
		R2/R2* Gasspeicher be- troffen, Gas tritt aus	3.2.2	43
			3.2.2*	55
		R3/R3* Zustand des Gasspeichers unbekannt aber primär stabil	3.2.3	35
			3.2.3*	42
		R4/R4* Fahrzeug mit Tankinfrastruk- tur verbunden	3.2.4	35
			3.2.4*	43
	S3/S3* Keine Person im Fahrzeug	R1/R1* Gasspeicher be- troffen, Gas tritt brennend aus	3.3.1	47
			3.3.1*	59
		R2/R2* Gasspeicher be- troffen, Gas tritt aus	3.3.2	39
			3.3.2*	51
		R3/R3* Zustand des Gasspeichers unbekannt aber primär stabil	3.3.3	35
			3.3.3*	43
		R4/R4* Fahrzeug mit Tankinfrastruk- tur verbunden	3.3.4	35
			3.3.4*	43

* in umschlossenen Bereichen

Tabelle 21: Risikosummenwerte (RSW) Modell 4

Modell	Szenario	Risikofaktor	Kategorie	RSW
M 4 Brand eines gas- betriebenen Fahrzeugs	S1/S1* Person(en) eingeklemmt	R1/R1* Gasspeicher betroffen, Gas tritt bren- nend aus	4.1.1	59
			4.1.1*	67
		R2/R2* Gasspeicher betroffen, Gas tritt aus	4.1.2	51
			4.1.2*	63
		R3/R3* Zustand des Gasspei- chers unbekannt aber primär stabil	4.1.3	51
			4.1.3*	63
		R4/R4* Fahrzeug mit Tankinfra- struktur verbunden	4.1.4	43
			4.1.4*	51
	S2/S2* Person(en) eingeschlossen	R1/R1* Gasspeicher betroffen, Gas tritt bren- nend aus	4.2.1	59
			4.2.1*	67
		R2/R2* Gasspeicher betroffen, Gas tritt aus	4.2.2	51
			4.2.2*	63
		R3/R3* Zustand Gasspeicher unbekannt aber primär stabil	4.2.3	51
			4.2.3*	63
		R4/R4* Fahrzeug mit Tankinfra- struktur verbunden	4.2.4	43
			4.2.4*	51
	S3/S3* Keine Person im Fahrzeug	R1/R1* Gasspeicher betroffen, Gas tritt bren- nend aus	4.3.1	47
			4.3.1*	59
		R2/R2* Gasspeicher betroffen, Gas tritt aus	4.3.2	47
			4.3.2*	59
		R3/R3* Zustand Gasspeicher unbekannt aber primär stabil	4.3.3	47
			4.3.3*	59
		R4/R4* Fahrzeug mit Tankinfra- struktur verbunden	4.3.4	39
			4.3.4*	51

* in umschlossenen Bereichen

11 Mögliche Maßnahmen als Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung

11.1 Ableitung von Maßnahmen

Als weiterer wichtiger Schritt beim Durchführen einer Gefährdungsbeurteilung ist die Ableitung bzw. Festlegung von geeigneten (Schutz-)Maßnahmen zu nennen. Diese setzen den konkreten Handlungsrahmen fest und sollen nach deren Umsetzung Sicherheit und Gesundheit verbessern bzw. sicherstellen. Je konkreter das Arbeitssystem bzw. dessen Arbeitsprozesse betrachtet werden, desto konkreter und spezifischer können auch die abgeleiteten Maßnahmen sein. Da in dieser Arbeit keine konkreten Arbeitssysteme, sondern vier theoretische Modelle bzw. deren untergeordnete Szenarien und daraus folgenden Kategorien beschrieben werden, ist der Konkretisierungsgrad relativ niedrig, was die Ableitung von Maßnahmen betrifft. Aus der Abstraktheit der Szenarien ergibt sich also auch eine gewisse Abstraktion der Maßnahmen. Diese Einschränkung muss im Weiteren berücksichtigt werden.

Wie in 10.1 bei der Definition der Schutzziele bereits ausgeführt wurde, unterliegen auch die abgeleiteten Maßnahmen einer gewissen Hierarchie. So ist z. B. die Substitution einer Gefährdung in ihrer Wirksamkeit eine deutliche stärkere Maßnahme als das Tragen von PSA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2021), jedoch in den hier betrachteten Szenarien in der Regel nicht möglich.

Bei der Durchführung der Gefährdungsbeurteilungen der Szenarien nach 10. (siehe Anhang) sind bereits stichwortartig Maßnahmen beschrieben worden, auf die nun im Weiteren eingegangen werden soll. Sie sind, wie zuvor beschrieben, entsprechend der folgenden Maßnahmenhierarchie gegliedert:

- T= technische Maßnahme,
- O= organisatorische Maßnahme,
- P= personenbezogene Maßnahme.

Gleichartige Maßnahmen werden zu Maßnahmengruppen zusammengefasst und werden, wie auch einzelne Maßnahmen, fortlaufend nummeriert. Dies dient dazu, die Bewertung der Maßnahmen mittels einer Nutzwertanalyse im Punkt 12 zu systematisieren und übersichtlich zu halten.

11.2 Technische Maßnahmen

11.2.1 Fahrzeughersteller

Es konnten zahlreiche übergeordnete Maßnahmen identifiziert werden, die vor allem die Hersteller von Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern adressieren. Dabei handelt es sich in den allermeisten Fällen um technische Maßnahmen. Im Einzelnen wurden folgende Maßnahmen identifiziert, um die festgestellten Gefährdungen nicht mehr wirksam werden zu lassen.

Maßnahme 1 (Mn1):

- BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte In-Bewegung-Setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann, z. B. durch das Unterbrechen der Zündung, den Antrieb deaktivieren (T).

Maßnahmengruppe 2 (Mn2):

- Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung, direkt aus dem Bordsystem des BEV, Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T).
- Möglichkeit schaffen, relevante Informationen / Fahrzeugdaten auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T).

Maßnahme 3 (Mn3):

- BEV technisch so herstellen, dass sich nach einem detektierten Unfall mit Airbag-Auslösung das Hochvoltsystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T).

Maßnahme 4 (Mn4):

- Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese sicher vor Ort durch die Einsatzkräfte spannungsfrei geschaltet werden können bzw. dann kein Erdschluss mehr besteht (T).

Maßnahmengruppe 5 (Mn5):

- Hochvoltpeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T).

- Hochvoltsspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T).
- Hochvoltsspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Überladen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T).
- Hochvoltsspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T).
- Hochvoltsspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T).
- Hochvoltsspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T).

Maßnahmengruppe 6 (Mn6):

- Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern / Gefahrstoffen kommen kann (T).
- Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T).
- Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T).
- Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T).
- Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T).
- Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T).

Maßnahmengruppe 7 (Mn7):

- Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass Zwischenfälle detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T).
- Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass der Tankvorgang durch EK standardisiert von außen unterbrochen werden kann (T).
- Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T).
- Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass Zwischenfälle (z. B. Brandereignis) detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T).

- Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T).
- Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass Zwischenfälle detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T).

Maßnahme 8 (Mn8):

- Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (O).

Da das Risiko einer Propagation des HV-Speichers mit einem daraus resultierenden Ventingereignis oder einem Brand bekannt ist, werden in der Fachwelt bereits viele Vorschläge diskutiert, die sich zum Teil auch in der Maßnahmengruppe 1-8 wiederfinden. So hat Georgiev im Jahr 2021 vorgeschlagen, dass HV-Speicher in Fahrzeugen mit Feuerlöschsystemen ausgestattet sein und einheitliche Deaktivierungsmöglichkeiten (Mn3) haben sollen (Georgiev 2021).

Im Rahmen des Forschungsprojektes *Recover-E* wurde festgestellt, dass von Seiten der Einsatzkräfte ein erheblicher Bedarf an Informationen über den Zustand des verunfallten Fahrzeugs bzw. dessen HV-Speicher besteht. Die momentan per *E-call* übermittelten Daten wurden als nicht ausreichend bezeichnet (Mn2). Auch die Möglichkeit für Einsatzkräfte direkt mittels des amtlichen Kennzeichens auf die Rettungsdatenblätter sowie weitere relevante Informationen der Fahrzeughersteller zugreifen zu können, wurde als notwendig erachtet (Mn8).

Einrichtungen zum Deaktivieren des HV-Systems sollten Hersteller-übergreifend einheitlich gekennzeichnet und positioniert werden (Mn3). Wenn gasförmige alternative Energieträger eingesetzt werden, sollen gemäß den Schlussfolgerungen des *Recover-E* Projektes, die verbauten Gasspeicher in den Fahrzeugen einer mindesten 50-minütigen Beflammung standhalten (Mn6). Darüber hinaus schlägt das Projektteam vor, dass bereits herstellerseits Möglichkeiten zum Einbringen von Löschmittel in den HV-Speicher vorgesehen werden sollen (Projektkonsortium RECOVER-E 2023).

Die Forderung von Georgiev und aus dem *Recover-E* Projekt nach festinstallierten Feuerlöscheinrichtungen bzw. definierten Öffnungen zu Einbringen von Löschwasser finden sich in den Mn 1-8 nicht wieder, da die in dieser Arbeit beschriebenen technischen Maßnahmen darauf abzielen, einen Brand im HV-Speicher konstruktiv bzw. durch die Verwendung intrinsisch sicheren Batterietechnik gar nicht erst entstehen zu lassen.

Ein weiterer Aspekt, warum in den HV-Speicher integrierte Löschanlagen nicht die beste Lösung sind, beschreiben Bisshop *et al.* wie folgt. Auch wenn ihrer Ansicht nach Löschanlagen dazu geeignet sein können, die Ausbreitung des Brands innerhalb bzw. auf die Umgebung des HV-Speichers zu verzögern, besteht die Gefahr einer weiteren, wenn auch verlangsamten Propagation, bei der es daher weiterhin zum Freisetzen von toxischen und brennbaren Gasen und Dämpfen kommt (Bisshop *et al.* 2020, S. 2691).

Einen etwas anderen Ansatz verfolgen daher Feng *et al.*. Statt einer Löschanlage im HV-Speicher schlagen sie vor, ein effizientes Kühlsystem vorzusehen. Wird eine Temperaturerhöhung detektiert, könnte gemäß ihren Annahmen ein *thermal runaway* durch gezielte und intensive Kühlung verhindert werden (Feng *et al.* 2020, S. 767). Dies ist eine Maßnahme, die der Mn5 zuzurechnen wäre.

Einen vergleichbaren Vorschlag haben auch Golubkov *et al.* unterbreitet. Auch sie gehen davon aus, dass eine frühe und punktgenaue Kühlung eine wirksame Maßnahme zur Unterdrückung einer weiteren Zellpropagation sein kann (Mn5) (Golubkov *et al.* 2018, S. 40183).

Hin und wieder finden sich auch Forderungen nach einer erhöhten Kapselung bzw. baulichen Trennung zwischen HV-Speicher und Fahrgastzelle. So schlägt Stanzel unter anderem eine Art Brandabschnittsbildung vor (Stanzel 2020).

Im Sinne eines Schutzes von Einsatzkräften erscheint diese Maßnahme jedoch wenig wirksam zu sein, da davon ausgegangen werden muss, dass im Falle einer Propagation ggf. mit Begleiterscheinungen wie Strahlflammenbildung bzw. *Venting* etc. nach wie vor eine erhebliche Gefährdung der Einsatzkräfte, die in unmittelbarer Nähe des Fahrzeuges Insassen befreien oder medizinisch versorgen müssen, besteht.

Ähnlich ist der Vorschlag von Vollmacher nach einem Gaswarnsystem in Innenräumen von Fahrzeugen mit gasförmigen Energieträgern zu bewerten (Vollmacher 2018). Zielführender ist es aus der Sicht der Einsatzkräftesicherheit, Gasspeicher so zu konstruieren, dass eine unbeabsichtigte Freisetzung ihres Inhaltes nicht möglich ist (Mn6).

Auch die Forderung nach einer technischen Vorrüstung zum Einbringen von Wasser in den HV-Speicher im Form einer Anschlussmöglichkeit für die Feuerwehr, wie sie unter anderem Vollmacher aufstellt (Vollmacher 2021), erscheint auf den ersten Blick plausibel, insbesondere da zahlreiche Untersuchungen inzwischen bestätigen, dass effektive Löscharbeiten nur beim Einbringen von Löschwasser in das Innere des HV-Speichers möglich sind wie z. B. Neske feststellt (Neske 2022).

Die Vorschläge von Lange zielen ebenfalls darauf ab, dass Einsatzkräfte Wasser in den HV-Speicher einbringen können. Er regt dazu an, dass die Fahrzeughersteller den Einsatz

von invasiven Löschsystemen freigeben, um z. B. Löschlanzen oder ähnliches verwenden zu können (Lange 2022, S. 11).

Jedoch ist aus Sicht von Sicherheit und Gesundheit der Einsatzkräfte ebenfalls ein intrinsisch sicherer HV-Speicher die weitreichendere und damit zu bevorzugende Maßnahme (Mn5).

Bei einem weiteren Maßnahmenvorschlag von Vollmacher sind deutliche Parallelen zu den Mn 1-3 erkennbar: er regt an, eine Hersteller-übergreifende standardisierte Steuer- bzw. Abschaltmöglichkeit bei BEVs zu implementieren. Dies könnte seiner Vorstellung nach dazu genutzt werden, um BEVs von außen gezielt zu deaktivieren bzw. bei Bedarf wieder zu aktivieren (Vollmacher 2021).

Bei Experteninterviews, die Franke durchführte, wurde die Anregung geäußert, die Rettungsdatenblätter um weitere, einsatzrelevante Informationen zu ergänzen. Beispielhaft wurde die chemische Zellzusammensetzung des HV-Speichers sowie Größe und Inhaltsmenge von Lagerbehältern mit gasförmigen Energieträgern genannt (Mn8) (Franke 2021). Ein weiterer wichtiger Aspekt zum Bereich Bereitstellen von Informationen für Einsatzkräfte ist es, möglichst früh Kenntnis über den oder die alternativen Energieträger des Unfallfahrzeuges zu erhalten. Idealerweise sollte diese Information bereits beim Absetzen des *E-calls* an die Leitstelle übertragen werden und somit den Einsatzkräften unmittelbar zu Einsatzbeginn zur Verfügung stehen. Auch Brauner *et al.* kommen zu diesem Schluss und betonten die Wichtigkeit der frühzeitigen Information für die Einsatzkräfte, z. B. über das Vorhandensein von Gasspeichern in brennenden Fahrzeugen. Das hat unmittelbare Auswirkung auf einzuhaltende Sicherheitsabstände (Mn8) (Brauner 2022).

Wie Hellmann ausführt, bringt auch die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugkomponenten wie z. B. Türgriffe und Verriegelungsmechanismen durchaus Probleme für die Einsatzkräfte mit sich. Oft ist dadurch eine intuitive, mechanische Öffnung z. B. einer Türe nicht mehr ohne weiteres möglich. Sie schlägt daher vor, redundante mechanische Notöffnungsmöglichkeiten zu implementieren und dies auch in den Rettungsdatenblättern darzustellen (Hellmann T. 2025). Das hat zudem den Vorteil, dass damit auch die Insassen bzw. Ersthelfer diese redundanten Systeme nutzen können.

11.2.2 Errichtung von Verkehrsinfrastrukturen

Da das Hauptaugenmerk dieser Arbeit nicht auf der sicheren Gestaltung von Verkehrsinfrastrukturen liegt, ist dies auch kein Schwerpunkt in der durchgeführten Gefährdungsbeurteilung. Es kann jedoch kein Zweifel daran bestehen, dass auch in diesem Bereich eine Vielzahl von sinnvollen Maßnahmen identifiziert werden können, um die Sicherheit beim Betrieb von umschlossenen baulichen Verkehrsanlagen in Bezug auf Fahrzeuge mit alternativen Energieträgern zu erhöhen. Daher wurde im Punkt 10 nur eine Maßnahme identifiziert, die jedoch geeignet ist, die Gefährdungen für Einsatzkräfte erheblich zu verringern.

Maßnahme 9 (Mn9):

- Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen sind so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären bzw. Hitze und Rauch frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt/unwirksam werden (z. B. durch geeignete raumluftechnische Anlagen) (T).

Die Gefährdungen durch den Austritt gasförmiger Energieträger in umschlossenen verkehrstechnischen Anlagen sind in zahlreichen Publikationen beschrieben worden, siehe hierzu auch die Kapitel 6.2.4, 6.3.4, 6.4.4 und 6.5.4.

Exemplarisch soll hier jedoch noch auf die Erkenntnisse von Brzezinska hingewiesen werden. Deren Untersuchung von Wasserstofffreisetzungen in Tiefgaragen hat ergeben, dass es zwar durchaus Unterschiede in der Effizienz von raumluftechnischen Anlagen bei der Entfernung von ausgeströmtem Wasserstoff gibt, aber alle getesteten Systeme in der Lage waren, die Konzentration des Wasserstoffes deutlich unter dessen unteren Explosionsgrenze zu halten (Brzezińska D.).

In einer weiteren Simulation untersuchte Brzezinska das Ausbreitungsverhalten einer LPG-Freisetzung in einer Tiefgarage. Auch hierbei konnte das ausgetretene LPG wirksam durch Lüftungstechnik aus dem umschlossenen Bereich entfernt werden. Dies ist aber nur dann möglich, wenn die Detektion des LPG bodennah erfolgt (Brzezińska 2019).

Dies gibt den zu treffenden Aufwand zur Umsetzung der Mn9 gut wieder: aufgrund der unterschiedlichen Dichten und Temperaturen der üblicherweise verwendeten gasförmigen Energieträger bzw. von Hitze und Rauch, die zu einem völlig unterschiedlichen Ausbreitungsverhalten führen können, sind unter anderem unterschiedliche bzw. kombinierte Detektions- und raumluftechnischen Anlagen erforderlich, um die Mn9 vollumfänglich umzusetzen.

Ein weiterer Aspekt im Zusammenhang mit Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern und umschlossenen Verkehrsanlagen scheint in diesem Zusammenhang noch erwähnenswert, auch wenn er keiner der Maßnahmen zuzuordnen ist. Das beruht insbesondere darauf, dass er zunächst nicht in einer direkten Verbindung zum Einsatzgeschehen steht. So haben Untersuchungen in der Schweiz des dortigen Departements für Umwelt und Verkehr ergeben, dass noch viele Monate nach einem BEV-Brand insbesondere Kobalt, Mangan und Nickel bzw. deren Oxide an der Schadensstelle, z.B. an den Wänden nachgewiesen werden konnten (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK 2020).

Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer gründlichen Brandschadenssanierung in umschlossenen verkehrstechnischen Anlagen, um Einsatzkräfte bei weiteren Einsätzen in diesem Bereich, z. B. zur technischen Hilfeleistung, nicht einer Exposition mit schwermetallhaltigen Stäuben vorangegangener BEV-Brände auszusetzen.

11.3 Einsatzstrategien

Die Inhalte der Punkte *11.3 Einsatzstrategie* und *11.4 Wissensvermittlung* haben einen hohen Bezug zueinander, die Maßnahmen bzw. Maßnahmengruppen gehen zum Teil ineinander über. Folgende Maßnahmen bzgl. geeigneter Strategien im Einsatz wurden identifiziert.

Maßnahme 10 (Mn10):

- BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T).

Maßnahme 11 (Mn11):

- Hochvoltsystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen von spannungsführenden Teilen durch EK kommen kann (T).

Maßnahme 12 (Mn12):

- Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor den Gefährdungen durch Strahlflammen zu schützen (T/O).

Als wesentliche Neuerung in Bezug auf die Einsatztaktik hat Georgiev beschrieben, dass das unbemerkte In-Bewegung-Setzen von nicht deaktivierten BEVs bei den Tätigkeiten der Einsatzkräfte eine Anpassung der Herangehensweise erfordert (Mn10) (Georgiev 2021).

Auch in den Empfehlungen der gesetzlichen Unfallversicherung zum sicheren Tätigwerden bei Rettungsarbeiten an BEV hat die DGUV festgestellt, dass in einigen Punkte eine Anpassung der Einsatztaktik bzw. -strategie notwendig ist, die grundsätzlichen Vorgehensweisen jedoch nicht vom Einsatz an ICEV abweichen. Als Beispiele werden das unvorhersehbare Bewegen von BEV sowie die Löschtechnik von propagierenden HV-Speichern genannt (Mn10, Mn12) (DGUV e. V. 2023c).

Bei einer Realbranduntersuchung an Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge stellten Neske *et al.* fest, dass es eine geeignete Einsatztaktik für die Brandbekämpfung eines propagierenden HV-Speichers sein kann, wenn die Einsatzkräfte gleichzeitig mit zwei Hohlstrahlrohren vorgehen. Damit kann sichergestellt werden, dass ein Trupp die Aufgabe übernimmt, Löschwasser in das Innere des HV-Speichers zu bringen, während der zweite Trupp den ersten Trupp vor evtl. auftretenden *Venting*-Ereignissen und damit auch vor Strahlflammen schützt (Mn12). Auch beschreiben sie einen weiteren Effekt, wenn zwei Hohlstrahlrohre parallel eingesetzt werden: ihrer Ansicht nach besteht dadurch auch die Möglichkeit, austretendes Ventinggas zu verdünnen bzw. zu verwirbeln und damit die Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre, z. B. in umschlossenen verkehrstechnischen Anlagen zu be- bzw. verhindern (Neske 2022).

Dies bedeutet einen erheblichen Erkenntnisgewinn zu Aussagen nur wenige Jahre zuvor, wie z. B. durch Sturk *et al.*, die 2015 noch empfahlen, den HV-Speicher von außen mit viel Wasser zu kühlen bzw. zu löschen (Sturk et al. 2015).

Auch Ghiji *et al.* waren 2020 noch der Auffassung, dass evtl. Wasserdampf ein geeignetes Löschmittel sein kann. Sie räumten jedoch gleichzeitig ein, dass aus ihrer Sicht hierzu noch weiterer Forschungsbedarf besteht, um verbindliche Aussage zum Löschen von HV-Speichern zu erhalten (Ghiji et al. 2020).

Die Einsatzstrategien beim Einsatz an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern zum Teil einer Anpassung bedürfen, wird auch international diskutiert. So beschreiben Weewer *et al.* von ähnlichen Überlegungen, die in den Niederlanden angestellt werden. Auch dort werden spezifische Vorgehen für z. B. Feuerwehreinsatzkräfte festgelegt, um Unfällen

und Bränden z. B. mit BEVs zukünftig (besser) begegnen zu können (Weewer R., Rosmüller N., Molenaar J.).

Es kann festgestellt werden, dass Änderungen bzw. Anpassungen im Bereich der grundlegenden Einsatztaktik beim Arbeiten an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern notwendig sind, diese jedoch nur punktuell und nicht im großen Umfang notwendig sind. Viele, bereits erfolgreich bei ICEVs angewandten Einsatzprinzipien können auch bei Einsätzen an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern eingesetzt werden.

So beschreiben z. B. Sun *et al.*, dass bei der Brandbekämpfung von H₂-getriebenen Fahrzeugen eine Annäherung an das Fahrzeug idealerweise in einem Winkel von ca. 45° zur jeweiligen Fahrzeugecke erfolgen soll, um nicht evtl. auftretenden Strahlflammen ausgesetzt zu sein (Sun und Li 2021, S. 37692). Dies geht auch aus einer Handlungsempfehlung der DGUV für Einsatzkräfte zur Brandbekämpfung an Fahrzeugen mit HV-Speichern hervor und gilt auch für ICEVs (DGUV e. V. 2023c).

11.4 Wissensvermittlung / Schulung

Die Maßnahmen zur Wissensvermittlung basieren überwiegend darauf, die notwendigen Kenntnisse über mögliche Gefährdungen zu besitzen, diese zu erkennen und damit beherrschbar zu machen. Oftmals sind, im Gegensatz zu den notwendigen Einsatzstrategien, keine zusätzlichen Vorhaltungen von Gerätschaften notwendig. Der Schwerpunkt liegt hier naturgemäß darin, die notwendigen Ausbildungsinhalte zu unterweisen bzw. in geeigneter Form den Einsatzkräften verfügbar zu machen. Natürlich spielen auch Trainings- und Wiederholungsmöglichkeiten eine große Rolle, um das erlernte Wissen aufzufrischen und abrufbar zu halten. Im Einzelnen wurden folgende Maßnahmen bzw. -gruppen identifiziert:

Maßnahmengruppe 13 (Mn13):

- Die EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O).
- Die EK unterweisen, wie das Hochvoltsystem von BEVs deaktiviert werden kann (O).
- Die EK unterweisen, wie die Ladeinfrastruktur deaktiviert werden kann (O).

Maßnahme 14 (Mn14):

- Die EK unterweisen, welche zusätzlichen Gefahren durch die mit dem BEV verbundene Ladeinfrastruktur vorhanden sein können (O).

Maßnahmengruppe 15 (Mn15):

- Die EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Ventingereignissen zu erkennen und einschätzen zu können (O).
- Die EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einschätzen zu können (O).
- Die EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einschätzen zu können (O).

Maßnahmengruppe 16 (Mn16):

- Die EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Ventingereignissen zu erkennen und einschätzen zu können (O).
- Die EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einschätzen zu können (O).

Maßnahme 17 (Mn17):

- Die EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Ventingereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einschätzen zu können (O).

Maßnahme 18 (Mn18):

- Die EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. flüssigem H₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampfwolken auftreten können (O).

Maßnahmengruppe 19 (Mn19):

- Die EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Ventingereignissen zu erkennen und einschätzen zu können (O).
- Die EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einschätzen zu können (O).

Maßnahme 20 (Mn20):

- Die EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O).

Maßnahme 21 (Mn21):

- Die EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anwenden zu können (O).

Maßnahme 22 (Mn22):

- Die EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O).

Maßnahme 23 (Mn23):

- Den EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben, z. B. durch Schulung, Training, Übung (P).

Auch hier sind die vorgeschlagenen Maßnahmen zum Teil in der internationalen Literatur zu finden.

So stellten Liu *et al.* bei einer internationalen Umfrage unter Einsatzkräften fest, dass rund 60% der Befragten angaben, dass das Erkennen und Deaktivieren eines BEV aus deren Sicht eine Herausforderung darstellen (Mn13). Auch das Vorgehen zum Sichern der BEVs gegen unbeabsichtigte Bewegung war bei rund 40% der Befragten nicht bekannt (Mn10). Eine breite Mehrheit der Befragten regte an, verstärkt Unterweisungen und Schulungen zum Umgang mit BEVs anzubieten (Mn13-17, Mn19, Mn 21-23) (Liu et al. 2023, S. 9).

Bei dem Fazit des RECOVER-E-Projektes wurde bilanziert, dass die Unterweisung und Schulung für Einsatzkräfte ein wichtiger Aspekt zum unfallfreien und erfolgreichen Abwickeln von Einsätzen mit HV-Speichern ist (Mn13-17, Mn19, Mn 21-23) (Projektkonsortium RECOVER-E 2023).

Auch die Freisetzung von Gefahrstoffen beim Venting wird in zahlreichen Publikationen beschrieben. Während diese sich zunächst sehr stark auf das Freiwerden von Fluorwasserstoff konzentriert haben, wie z. B. bei (Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P. et al. 2017), setzt sich inzwischen die Erkenntnis durch, dass neben HF weit mehr problematische Gefahrstoffe (Mn15, Mn 20-21) freigesetzt werden, siehe hierzu auch den Punkt 6.1.3. Auch Björnstig *et al.* ordneten die Gefährdungen durch HF im Jahr 2022 bereits als deutlich weniger wesentlich für die Einsatzkräfte ein (Björnstig et al. 2022).

Insbesondere unverbranntes Ventinggas und freigesetzte Schwermetallstäube sind hierbei von Bedeutung (Bisschop et al. 2019). Auch die Kontaminationen, die durch freigesetzte Gefahrstoffe an der Brandstelle verursacht werden und dort zum Teil auch stationär sind, zählen laut Held *et al.* zu den Gefährdungen, über die Einsatzkräfte unterwiesen werden sollten (Held et al. 2022, S. 112474).

Es ist daher von großer Bedeutung, dass die Einsatzkräfte über die Gefährdungen ausreichend informiert sind (Mn15, Mn 20-21). Neben dieser Wissensvermittlung ist es darüber hinaus wichtig, die Einsatzkräfte zu befähigen, sich vor den chemischen Gefährdungen, die im Falle eines Ventingereignisses aber auch einer Gasfreisetzung auftreten, adäquat zu schützen. Gerade die Einsatzkräfte, die direkt am oder auch im verunfallten Fahrzeug eingesetzt sind, müssen dazu geeigneten Atemschutz griffbereit haben. Dies gilt für Einsatzkräfte der Feuerwehren gleichermaßen wie für die zur Patientenversorgung eingesetzten Kräfte der Hilfeleistungsorganisationen. Auch für die Patienten selbst kann in diesen Fällen geeigneter Atemschutz notwendig sein. Insofern bestehen bei der Mn15 durchaus Überschneidungen zur Mn30.

Vergleichbares gilt für die Bildung von gefährlichen explosionsfähigen Atmosphären durch Ventinggase. Obwohl Golubkov *et al.* dieses Phänomen bereits 2014 beschrieben hatten (Golubkov et al. 2014, S. 3641), setzt sich diese Erkenntnis aus Sicht des Verfassers nur zögerlich bei den Einsatzkräften durch (Mn16-17), obwohl diese Gefährdung inzwischen Einzug in diverse Handlungsempfehlungen für Einsatzkräfte gefunden hat, z. B. in das Regelwerk der DGUV (DGUV e. V. 2023c) und des Österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2020, S. 36–38).

Auch Hill betonte im Jahr 2020 bereits, dass der Fokus bei der Schulung von Einsatzkräften auch auf dem Erkennen von Explosionsrisiken und deren Begegnung liegen muss (Mn16-17, 21-22) (Hill 2020).

Deutlich mehr im Bewusstsein der Einsatzkräfte ist die Gefährdung durch gefährliche explosionsfähige Atmosphären bei Fahrzeugen mit gasförmigen Energieträgern. Doch auch hierzu finden sich in der Literatur Vorschläge auf mögliche bzw. notwendige Maßnahmen der Wissensvermittlung. So beschreiben Schelb *et al.* den Umstand, dass es für Einsatzkräfte wichtig zu wissen ist, dass das Zünden von explosionsfähigen H₂-Luftgemischen selbst in vermeintlich unverdämmten Objekten zu erheblichen, kritischen Druckanstiegen führen kann (Mn16-18, 21-22) (Schelb und Jordan 2020).

Aber auch das Wissen um das spezifische Verhalten des jeweils freigesetzten, gasförmigen, bzw. in die Gasphase übergehenden Energieträgers ist eine wichtige Erkenntnisquelle. Als Beispiel führen Ramsde *et al.* das Verhalten von freiwerdendem LNG an, welches sich zunächst, aufgrund der Verflüssigung und der niedrigen Lagertemperatur am Boden ausbreitet, später aber bei ausreichender Erwärmung nach oben steigt (Mn16-17, 21-22) (Ramsde et al. 2015).

Die Interpretation der Abblasgeräusche von Lagerbehältern gasförmiger Energieträger ist ein weiterer Aspekt, der in die Wissensvermittlung einfließen sollte. Nicht allein die mögliche Lärmexposition ist dabei relevant, Sun *et al.* beschreiben darüber hinaus auch die Option, wenn keine Abblasgeräusche bei einer Brandeinwirkung hörbar sind. Dies kann z. B. auf ein defektes Überdruckventil hindeuten und ein Indikator für einen unmittelbar bevorstehenden Behälterzerknall sein (Mn16-17, 20-22) (Sun und Li 2021, S. 37692).

Kirschke weist daraufhin, dass gasförmige Energieträger zum Teil nicht mit den Sinnesorganen wahrgenommen werden können. Dies muss durch entsprechende Kenntnis und auch messtechnische Gerätschaften ausgeglichen werden (Mn21) (Kirschke 2020, S. 41).

Auch Vollmacher hat aus seinen Befragungen von Einsatzkräften geschlussfolgert, dass eine international einheitliche und umfängliche Wissensvermittlung zu den Techniken und geeigneten Vorgehensweisen bei Einsätzen an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern als essentiell von den Befragten angesehen wird (Mn13-21) (Vollmacher 2021).

Ein vergleichbares Ergebnis erbrachte eine Umfrage der vfdb e. V. im Jahr 2022. Auch hier war die Forderung nach einer verbesserten Wissensvermittlung zum sicheren Einsatz mit kritischen HV-Speichern bei einer Vielzahl der Teilnehmenden mit hoher Priorität versehen (Mn13-21) (Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. 2022). Neben der eigentlichen Wissensvermittlung ist auch regelmäßiges Training bzw. Auffrischung wichtig. So hat Neske bei einer Serie von Realbrandversuchen an Fahrzeugen festgestellt, dass mit der Anzahl der Versuche die Erfahrung der beteiligten Einsatzkräfte zunahm. Dies wirkte sich positiv auf Effizienz, Dauer und auch die verbrauchte Löschwassermenge aus (Mn13-21) (Neske 2022).

Die Maßnahmen zur Wissensvermittlung und -erhaltung umfassen also sowohl theoretische Inhalte als auch praktische Trainings. Eine wichtige Rolle spielen dabei auch regelmäßige Wiederholungen bzw. Auffrischungen.

11.5 Einsatzvorbereitung

Neben der reinen Wissensvermittlung, um die Grundlagen und ein gewisses Problemverständnis zu schaffen, ist es auch notwendig, die konkrete Einsatzsituation im Vorfeld zu durchdenken und dadurch erforderliche Vorbereitungen zu identifizieren. Damit kann die Fähigkeit zur erfolgreichen und sicheren Bewältigung einer Einsatzsituation erlangt werden. Folgende Maßnahme wurde hierbei identifiziert:

Maßnahme 24 (Mn24):

- Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Maßnahme 25 (Mn25):

- Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung und Brandbekämpfung, um Einsatzkräfte vor z. B. Strahlflammen zu schützen (T/O).

Die Durchführung von Einsatzhygienemaßnahmen, um Einsatzkräfte vor der Exposition mit toxischen und zum Teil auch kanzerogenen Verbrennungsprodukten bzw. -rückständen zu schützen, ist keine Maßnahme, die spezifisch für die Einsatz Tätigkeiten beim Einsatz an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern zu treffen ist. Jedoch ist auch bei diesen Einsätzen damit zu rechnen, dass Einsatzkräfte hiermit exponiert werden können (Mn24). Daher ist eine entsprechende Einsatzvorbereitung notwendig (DGUV e. V. 2020c).

Eine wesentliche Aufgabe ist es, die taktischen Anforderungen in Anbetracht der notwendigen Anzahl von Einsatzkräften und Einsatzmitteln bei Einsätzen mit Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern anzupassen. So schlagen Neske *et al.* aufgrund ihrer umfangreichen praktischen Versuchsreihe am Institut für Brand- und Katastrophenschutz in Heyrothsberge vor, den Kräfteansatz bei einem Brand eines BEV zu erhöhen, um die notwendigen Maßnahmen ergreifen zu können. Ihren Ausführungen zufolge sind zum sicheren Bekämpfen eines BEV-Brandes mit propagierendem HV-Speicher zwei Löschfahrzeuge mit insgesamt acht Atemschutzgeräteträgern notwendig. Begründet wird dies unter anderem damit, dass somit ausreichend Kräfte zur Verfügung stehen, um den Angriffstrupp vor plötzlich auftretenden Strahlflammen mit Hilfe eines weiteren Strahlrohres zu schützen (Neske 2022).

Dies ist ein deutlich höherer Kräfteansatz, als er in der Regel momentan bei Bränden von ICEV vorgesehen ist. So sieht beispielsweise die Alarmierungsbekanntmachung in Bayern für diesen Fall nur ein wasserführendes Löschfahrzeug mit mindestens 1000 Liter Wasser und vier Atemschutzgeräteträgern vor (Bayerisches Staatsministeriums des Innern, für Bau und Verkehr 12.07.2016). Es ist also notwendig im Rahmen der Einsatzvorbereitung auch diese Aspekte zu beachten und entsprechend zu beplanen (Mn25).

Einen weiteren Aspekt der Einsatzvorbereitung, der jedoch auch Schnittmengen zum Punkt 11.4 aufweist, ist es, im Zuge der Einsatzvorbereitung die Einsatzkräfte zu befähigen, kritische Zustände bei brennenden BEVs zu erkennen. Dazu empfehlen Neske *et al.* die Unterscheidung folgender Brandphasen:

- Ventingereignis im HV-Speicher.
- Brandentstehung, Flammen im Bereich der Radkasten oder Schweller.
- Vollbrand des BEV inkl. HV-Speicher.

Dies ist aus deren Sicht ausreichend, um eine der identifizierten Phase angemessene und sichere Vorgehensweise festlegen zu können (Mn25) (Neske 2022).

Eine grundlegende Neubewertung der Einsatzvorbereitung ist dagegen aus Sicht von Feuerwehrführungskräften nicht notwendig. So führt ein Mitglied der Branddirektion München in einem Interview aus, dass er die zum Teil sehr emotional geführte Diskussion um die Gefährdungen durch BEV insgesamt für übertrieben hält. Die neu auftretenden Gefährdungen sind seiner Ansicht nach gut zu bewältigen (Asche 2021).

Nicht nur im Bereich BEV ist also partiell eine spezifische Einsatzvorbereitung notwendig, auch im Bereich gasförmiger Energieträger kann dies erforderlich sein. Da jedoch der Umgang mit freiwerdenden brennbaren Gasen seit jeher im Einsatzspektrum der Feuerwehren zu finden war, wenn auch meist in einem anderen Kontext als im Rahmen von klassischen Unfällen im Straßenverkehr, sind hierfür in der Regel die notwendigen Einsatzvorbereitung bereits getroffen. Oft muss daher lediglich nur noch der Transfer von vorhandenem Wissen bzw. der Einsatzvorbereitung erbracht werden.

11.6 Technische Ausstattung

Einige der identifizierten Maßnahmen zielen darauf ab, dass die zur erfolgreichen Bewältigung von Einsatzszenarien mit alternativen Energieträgern notwendigen Gerätschaften zur Verfügung stehen. Dabei handelt es sich zum Teil um übliche Gerätschaften im Feuerwehrdienst, die jedoch im Kontext z. B. eines Verkehrsunfalls bisher keine oder eine sehr untergeordnete Rolle spielen und daher oft auch in der entsprechenden Ausrüstung der Feuerwehr nicht vorhanden sind bzw. in der Alarmierung nicht beplant waren. Zum Teil sind es jedoch auch spezifische Geräte, die für den Zweck der Gefahrenbekämpfung beim Einsatz an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern nötig sind. Im Einzelnen wurden folgende Maßnahmen identifiziert:

Maßnahmen 26 (Mn26):

- Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger bzw. Ventinggase von den EK fernzuhalten (T).

Maßnahme 27 (Mn27):

- Vorhalten von geeigneter Messtechnik (auch remote, z. B. per Drohne / Roboter) (T).

Maßnahme 28 (Mn28):

- Vorhalten von geeigneter Löschtechnik, z. B. Löschsysteme für HV-Speicher etc. (T).

Maßnahme 29 (Mn29):

- EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter an der Einsatzstelle abzurufen und auszuwerten (T).

Das Prinzip, gesundheitsgefährdende Gase bzw. Stäube mittels geeigneten Belüftungsgeräten von Einsatzkräften bzw. Patienten fernzuhalten bzw. zu verdrängen ist nicht neu. So empfiehlt dies die DGUV bereits seit geraumer Zeit beim Einsatz von Plasmaschneidgeräten, wo je nach dem zu schneidenden Material toxische und kanzerogene Dämpfe und Stäube freigesetzt werden können (DGUV e. V. 2020d). Im Zusammenhang mit Verkehrsunfällen ist diese Methode jedoch neu. Kommt es zum *Venting* oder zum anhaltenden Abströmen eines gasförmigen Energieträgers, kann der Einsatz von geeigneten Belüftungsgeräten sinnvoll sein, um Patienten und Einsatzkräfte während z. B. einer technischen Rettung mit Frischluft zu versorgen bzw. Gefahrstoffe fernzuhalten und das Entstehen einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre zu verhindern bzw. zumindest zu verzögern, bis die Rettung abgeschlossen ist. Das eingesetzte Belüftungsgerät muss dazu keinen sehr großen Volumenstrom leisten, wie es z. B. bei der Überdruckbelüftung in der Brandbekämpfung notwendig ist. Wichtig ist in diesem Zusammenhang z. B., dass das Gerät für den Einsatz in explosionsfähiger Atmosphäre geeignet und geräuscharm ist (Mn26).

Ähnlich gelagert ist es bei der Mn27. Während Gasmesstechnik im Feuerwehrdienst weit verbreitet ist, in der Regel, um bei Gefahrgut (CBRN)-Einsatzlagen eingesetzt zu werden, ist dies bei der technischen Hilfeleistung im Zusammenhang mit Fahrzeugen nicht üblich. Bei Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern ist es jedoch sinnvoll, geeignete Gasmesstechnik einzusetzen, um frühzeitig Gefährdungen durch HV-Speicherpropagation oder einen austretenden gasförmigen Energieträger zu erkennen. Dabei werden zukünftig

nicht nur personengetragene Geräte, sondern vor allem ferngelenkte Systeme wichtig werden. So ist es z. B. von großem Vorteil für das weitere taktische Vorgehen, wenn frühzeitig die Ausbreitung von freiwerdenden gasförmigen Energieträgern erkannt und räumlich eingegrenzt werden kann. Gerade in umschlossenen Räumen und unterirdischen Verkehrsanlagen spielt dies eine sehr große Rolle. So beschreiben Brauner *et al.* die Konstellation eines verunfallten Wasserstofffahrzeuges in einem Tunnel. Tritt Wasserstoff unverbrannt aus, wäre es extrem riskant, sich diesem Bereich zu nähern (Brauner 2022). Hier ist es sinnvoll mit entsprechender Messtechnik bestückte Flugdrohnen und auch bodengebundene Roboter einzusetzen, um aufgrund deren Messergebnisse sichere Abstände zu definieren. Sehr vereinzelt sind solche Systeme bei CBRN-Einheiten bereits vorhanden. So berichtet der Gefahrgutzug München-Land Anfang des Jahres 2025 von der Indienststellung eines Roboterhundes mit umfangreicher Gasmesstechnik in Ergänzung zu einer bereits vorhandenen Gasmess-Drohne (ABC Zug München-Land 2025).

Aber nicht nur bei der Gasmesstechnik ist es unter Umständen notwendig, die technische Ausstattung der Einsatzkräfte anzupassen. Auch für den seltenen Fall des thermischen Durchgehens eines HV-Speichers kann es notwendig sein, dafür speziell geeignetes (Lösch)Gerät vorzuhalten (Mn28). In der Regel sind die vorhandenen Gerätschaften von normgerechten Löschfahrzeugen, insbesondere was die Löschtechnik betrifft, ausreichend, wie Neske *et al.* in ihrer Versuchsreihe nachgewiesen haben (Neske 2022). Jedoch ist es nicht auszuschließen, dass es bestimmte Situationen erfordern, schnell und unmittelbar Löschwasser in einen HV-Speicher einzubringen. Hierfür sind inzwischen invasive Systeme verfügbar, die dies ermöglichen. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass der Einsatz dieser Systeme nicht prophylaktisch vorgenommen wird, sondern erst dann erfolgt, wenn sichere Indikatoren für ein thermisches Durchgehen auftreten. So beschreibt Reschke die Indikatoren unter anderem mit erhöhter Temperatur an der Außenseite des HV-Speichers und dem Austritt von Rauch und Flammen aus dem HV-Speicher. (Reschke 2021).

Auch die DGUV hat einer Reihe solcher Kriterien definiert, die erfüllt sein müssen, damit ein invasives Löschesystem angewandt werden kann. Setzt man solch ein System an einem intakten HV-Speicher ein, muss man gemäß der DGUV davon ausgehen, dass dies heftige Reaktionen bis hin zum thermischen Durchgehen provozieren kann (DGUV e. V. 2023c). Die Wirksamkeit solcher Systeme sind mittlerweile in mehreren Untersuchungen bestätigt worden. Sowohl Neske *et al.* als auch Lange beschreiben, dass das direkte Einbringen von Löschwasser mittels invasiver Systeme die Reaktion innerhalb der HV-Batterie schnell und mit einer relativ geringen Wassermenge zum Stillstand bringen kann. Eine

Gefährdung durch elektrischen Strom wurde in den bisherigen Untersuchungen nicht beobachtet bzw. nachgewiesen (Neske 2022), (Lange 2022, S. 10).

Eine weitere Ausstattung, die in diesem Zuge genannt wird, ist die Brandbegrenzungsdecke. Ursprünglich ging man von Seiten der Hersteller davon aus, dass eine entsprechend robust konstruierte und groß dimensionierte Decke ausreichend würde, ein BEV mit brennendem HV-Speicher durch das Abdecken vollständig löschen zu können. Dieser Effekt trat jedoch nicht ein. Schon Schelb und Jordan sprachen im Jahr 2020 in diesen Zusammenhang lediglich davon, dass eine solche Decke geeignet sein könnte, die Brandausbreitung auf benachbarte Objekte zu verzögern (Schelb und Jordan 2020, S. 66).

Neske *et al.* bestätigten dies in ihrer Versuchsreihe und halten diese Decken als Löschmethode nicht für geeignet. Im Projektantrag der mittlerweile Ende 2024 veröffentlichten DIN SPEC 91489 mit dem Titel *Brandbegrenzungsdecken für den Einsatz bei Elektrofahrzeugen* wurde daher auch festgestellt, dass ein Ersticken eines HV-Speicherbrandes nicht möglich ist und daher Brandbegrenzungsdecken kein aktives Löschmittel sind. Sie können jedoch die Brandausbreitung auf die Umgebung für eine gewisse Zeit unterbinden und somit einen wichtigen Beitrag zur Schadensbegrenzung leisten. Haupteinsatzbereich ist das prophylaktische Abdecken kritischer HV-Speicher noch bevor es zu einem Ereignis damit kommt. (DIN-Normenausschusses Feuerwehrwesen (FNFW) 2022)

Mitte des Jahres 2025 hat auch das US-amerikanische *Fire Safety Research Institute* (FSRI) davor gewarnt, solche Decken bei der Brandbekämpfung an BEV zu verwenden, da deren Beobachtungen nach dabei ein Explosionsrisiko bestehen kann (Fire Safety Research Institute (FSRI) 2025). Dies deckt sich mit den vorstehend beschriebenen Ausführungen aus dem deutschsprachigen Raum.

Neben spezifischen Gerätschaften für den Einsatz an BEV sind auch Szenarien denkbar, die spezielles Gerät für Einsatzkräfte beim Einsatz an Fahrzeugen mit gasförmigen Energieträgern notwendig machen. So beschreibt Kirschke die Notwendigkeit von explosionsgeschütztem Handwerkzeug, um z. B. einfache Absperrarbeiten an Gasspeichern in Fahrzeugen vornehmen zu können. Aber auch Wärmebildkameras, um LNG- oder Wasserstoffflammen bzw. Temperaturerhöhungen in HV-Speichern zu erkennen, können notwendig werden. Ist die Tankinfrastruktur von gasförmigen Energieträgern von einem Brand betroffen, sind in der Regel starke Kräfte mit ausreichend dimensionierter Wasserförder- und -abgabeleistung notwendig (Kirschke 2020, S. 99). Dies wird jedoch in der Regel weniger über Beschaffungen als über eine entsprechende Alarmplanung sichergestellt.

Als äußert relevante Maßnahme wird die Mn29 angesehen. Die Möglichkeit für Einsatzkräfte zeitnah an der Einsatzstelle bzw. bereits auf der Anfahrt technische Informationen über die am Einsatzgeschehen beteiligten Fahrzeuge zu erhalten, ist von erheblicher Bedeutung, um sichere und effiziente Einsatzmaßnahmen zu treffen. Die Kenntnis der vorhandenen Antriebssysteme und deren Energieträger kann unter Umständen erhebliche Auswirkungen auf die Entwicklung der Einsatzmaßnahmen haben. Es ist daher essenziell, dass den Einsatzkräften geeignete Kommunikationsgeräte dazu zur Verfügung stehen. Als zentrales Informationsmittel dient derzeit das fahrzeugspezifische Rettungsdatenblatt. Wie Wöhrl *et al.* ausführen, ist es seit 2013 bundesweit für die Leitstellen technisch möglich, das Rettungsdatenblatt über das Kennzeichen des Fahrzeuges zu ermitteln, sofern dieses über eine deutsche Zulassung verfügt. Danach kann diese Information per Funk oder Datentechnik an die Einsatzkräfte vor Ort übermittelt werden (Wöhrl K., Schweiger H-G., Nebl Ch. 2020, S. 37).

Um diese Informationen an der Einsatzstelle auch nutzen zu können, ist ein entsprechendes Mobiltelefon bzw. ein *Tablet* in Verbindung mit einer Datenbank aller Rettungsdatenblätter, idealerweise mit Breitbandinternetzugang erforderlich. Dies ist auch eine der Erkenntnisse von Neske *et al.* (Neske 2022).

Einen Schritt weiter ging bereits 2019 Göwecke. Er sah es als notwendig an, dass die Einsatzkräfte direkt vor Ort die Kennzeichenabfrage vornehmen können, ohne den „Umweg“ über eine Leitstelle und den damit verbundenen Zeitaufwand und ggf. Übertragungsfehler in Kauf nehmen zu müssen (Göwecke 2019).

Ein interessanter Ansatz ist sicherlich auch, die klassischen Rettungsdatenblätter dahingehend zu erweitern, dass eine Nutzung als *augmented reality* möglich ist, wie Hormuth *et al.* vorschlagen. Dies bedeutet, dass Einsatzkräften z. B. mit einer speziellen Brille oder einem digitalen Endgerät die wichtigsten fahrzeugspezifischen Informationen direkt in ihr reales Sichtfeld eingespielt werden. So könnte eine schnelle Orientierung und zielgerichtetes Vorgehen, passgenau zum jeweiligen Fahrzeug erreicht werden (Hormuth J. 2023). Für den Bereich technische Ausstattung kann bilanziert werden, dass durchaus an der einen oder anderen Stelle Ergänzungen bei der Ausstattung der Einsatzkräfte notwendig sind, diese jedoch oft nicht flächendeckend vorhanden sein müssen, sondern evtl. gebündelt an übergeordneten Standorten sinnvoll vorhanden sein können. Dazu ist es aus Sicht des Verfassers vorstellbar, dass im Zuge der Einsatzplanung Gebiete identifiziert werden können, die eine sinnvolle Vorhaltung notwendig macht.

Als Beispiele sind umfangreiche unterirdische Verkehrsanlagen (Vorhaltung von fernbedienbarer Gasmesstechnik), umfangreiche Tankinfrastruktur von gasförmigen Energieträgern (Vorhaltung von ex-geschützter Ausrüstung, leistungsfähige Wasserförderung und –abgabe) oder Bereiche mit sehr hohem Individualverkehrsaufkommen (Vorhaltung von invasiven Löschsystemen für HV-Speicher) denkbar.

11.7 Persönliche Schutzausrüstung

Eine weitere wesentliche Maßnahmengruppe ist Mn30. Gerade im unplanbaren Einsatzgeschehen der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen lassen sich die Grundprinzipien des Arbeitsschutzes wie z. B. die STOP-Systematik nicht immer konsequent anwenden. Dem Einsatz von PSA kommt daher oft eine sehr wichtige Bedeutung zu, um Sicherheit und Gesundheit der Einsatzkräfte zu gewährleisten. Auch die DGUV hat dies für den Bereich der Einsatzkräfte festgestellt (DGUV e. V. 2014).

Der Einsatz an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern kann Situationen umfassen, die eine spezifische PSA erfordern. Einige dieser Anforderungen sind bereits durch die in Verwendung befindliche PSA erfüllt, einige Aspekte müssen beim Umgang mit alternativen Energieträgern zusätzlich betrachtet werden. Es wurde folgende Maßnahmen identifiziert:

Maßnahmengruppe 30 (Mn30):

- Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
- Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
- Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA), um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
- Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA), um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
- Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz), um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
- Tragen von geeigneter PSA, um physikalische Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (P).

Grundsätzlich muss jedoch auch betont werden, dass viele der identifizierten Gefährdungen so erheblich sind, dass PSA allein keinen ausreichenden Schutz bieten kann, z. B. bei Gefährdungen durch Explosionen oder durch Strahlflammen. Dies gilt insbesondere,

jedoch nicht ausschließlich für Szenarien mit einem Risikosummenwert von mehr als 50 gemäß Punkt 10.2.

Das Tragen von BBK-PSA bei der Brandbekämpfung von Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern wird in zahlreichen Handreichungen empfohlen, als Beispiel seien hier entsprechende Empfehlungen der AGBF Bund und der DGUV aufgeführt (AGBF Bund 2021), (DGUV e. V. 2024a). Auf diese BBK-PSA, wie sie z. B. für die Innenbrandbekämpfung eingesetzt wird, wird in dieser Arbeit, bis auf den Aspekt der Kontamination bzw. Reinigung, nicht weiter eingegangen.

Ein zusätzlicher Aspekt in Bezug auf die PSA ist es, dass sich die Einsatzkräfte im Hinblick auf die thermische Gefährdung nicht nur gegen Hitze, sondern auch gegen extreme Kälte schützen müssen, wenn z. B. tiefkalte bzw. verflüssigte Energieträger freigesetzt werden. So empfiehlt Steller das Vorhalten von kryogener PSA, um z. B. Rettungs- oder einfache Absperrarbeiten bei entsprechenden Leckagen sicher zu ermöglichen (Steller 2021).

Diese Art von PSA ist zurzeit in keinem genormten Feuerwehrfahrzeug in Deutschland vorgesehen und muss daher, bei Vorhandensein entsprechender Gefährdung, zusätzlich beschafft werden.

PSA zum Schutz gegen Gefahrstoffe ist in begrenztem Umfang in Löschfahrzeugen verfügbar. So sieht die Normbeladung von Löschgruppenfahrzeugen 20 (LF 20, DIN 14530-11) und Hilfeleistungslöschgruppenfahrzeugen 20 (HLF 20, DIN 14530-27) vor, dass mindestens vier Chemikalienschutzanzüge der Form II (nicht gasdicht) verladen sein müssen. Diese werden in der Regel als Einweganzüge ausgeführt und mit umluftunabhängigem Atemschutzgeräten kombiniert. Diese Kombination bietet einen akzeptablen Schutz für kurzfristige, einfache Arbeiten in Bereich mit Gefahrstofffreisetzungen wie sie bei Einsätzen an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern zu erwarten sind. Für eine darüber hinausgehende PSA gegen Gefahrstoffe (z. B. gasdicht bzw. mit höherem Schutzniveau) steht der Gerätewagen-Gefahrgut gemäß DIN 14555-12 zur Verfügung, der in der Regel jedoch zur überörtlichen Ausstattung gehört und standardmäßig nicht bei Verkehrsunfällen zum Einsatz kommt. Es ist zu beachten, dass die Fahrzeuge LF 20 und HLF 20 nicht flächendeckend als Erstangriffsfahrzeuge in Deutschland zur Verfügung stehen. In weiten Teilen, insbesondere in den ländlich strukturierten Bereichen werden in der Regel die kleiner dimensionierten LF 10 bzw. HLF 10 primär zum Einsatz kommen, die über keine Chemikalienschutzkleidung verfügen.

Im Bereich des geeigneten Atemschutzes besteht ebenfalls Handlungsbedarf (siehe hierzu auch die Ausführungen zu Mn15 unter Punkt 11.4). Für die Einsatzkräfte von Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen, unter Umständen aber auch für die zu rettenden Personen muss geeigneter Atemschutz vorgehalten werden.

Auch das Mitführen von PSA gegen Lärm ist, bis auf den Gehörschutz am Waldarbeiterschutzhelm für die Arbeiten mit der Motorkettensäge, nicht Standard im Bereich der Feuerwehr. Hier kann jedoch auf das breite Spektrum von bereits verfügbaren Gehörschutzvarianten zurückgegriffen werden. Diese stehen, in der Regel als Einwegprodukte wie z. B. Stöpsel oder Bügel kostengünstig zur Verfügung. Eine Unterweisung zum korrekten Benutzen des Gehörschutzes ist notwendig.

An PSA gegen elektrische Gefährdungen sind im Bereich der Feuerwehren seit 2020 isolierende Schutzhandschuhe gemäß DIN EN IEC 60903 in der Normbeladung aller Löschgruppenfahrzeuge vorgesehen. Weitere PSA, z. B. zum Schutz vor Störlichtbögen, ist zurzeit nicht vorgesehen. Dies könnte aus Sicht des Verfassers insbesondere dann notwendig werden, wenn z. B. Gleichstromsteckverbindungen unter Last durch Einsatzkräfte der Feuerwehr getrennt werden sollen.

Ein Aspekt, der zwar nicht unter Bereitstellung von PSA fällt, jedoch auch mit dem Bereich PSA zu tun hat, ist die sachgerechte Reinigung kontaminierter PSA, insbesondere wenn HV-Speicher am Brandgeschehen beteiligt waren. Im Gegensatz zu den bereits weitgehend bekannten Verbrennungsprodukten bei Bränden, werden bei Bränden von HV-Speichern zusätzlich noch Stäube und Reaktionsprodukte der in den Speichern enthaltenen Schwermetalle wie z. B. Mangan, Cobalt oder Nickel frei. Diese können toxisch und kanzerogen sein und lassen sich auch auf der eingesetzten PSA nachweisen, wie Held *et al.* berichten (Held *et al.* 2022, S. 112478).

Auch Untersuchungen von Szmytko *et al.* bestätigen dies. In deren Untersuchungen wurden zum Teil deutlich erhöhte Cobalt-Werte auf der eingesetzten PSA nachgewiesen (Szmytko *et al.* 2022).

Neben der richtigen Auswahl, Bereitstellung und Benutzung der PSA ist daher auch der Umgang mit kontaminierter PSA und deren sachgerechte Wiederaufbereitung ein wichtiger Aspekt. Nicht geeignete bzw. unzureichend wirksame Reinigungsverfahren könnten unter Umständen zu einer Akkumulation von Gefahrstoffen in der PSA führen, die im ungünstigsten Fall eine schleichende Sekundärexposition der Einsatzkräfte bewirkt.

12 Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich der Schutzzielerreichung

Im Punkt 11 wurden die 57 einzelnen Maßnahmen, die in Punkt 10.2 identifiziert werden konnten, zu 30 Maßnahmengruppen zusammengefasst und bereits näher erläutert. Es ist im weiteren Verlauf dieser Arbeit von Interesse festzustellen, welche der Maßnahmen die in Punkt 10.1 beschriebenen Schutzziele am besten erfüllen bzw. bei ihrer Umsetzung eine größtmögliche Annäherung daran bedeuten.

Um die Maßnahmen systematisch miteinander vergleichen zu können, ist es nötig, ein Verfahren zu wählen, das eine Gewichtung anhand von zuvor festgelegten Kriterien ermöglicht. Zu diesem Zweck scheint eine Nutzwertanalyse geeignet, wie sie zuerst von Zangemeister 1970 beschrieben wurde (Zangemeister 1970). Diese stellt ein multiattributives Additionsverfahren dar, welches durch die Bildung von subjektiv gewichteten Teilnutzwerten, die zu je einem Gesamtnutzwert addiert werden, geprägt ist. Somit können die in Punkt 11 definierten Maßnahmengruppen bezüglich ihrer Erreichung der Schutzziele miteinander verglichen werden.

Um eine Nutzwertanalyse durchführen zu können, sind gemäß Solis folgende Schritte notwendig (Solis 2023):

1. Optionen festlegen, die bewertet werden sollen.
Die zu bewertenden Optionen entsprechen den im Punkt 11 beschriebenen Maßnahmengruppen **Mn1** bis **Mn30**.
2. Kriterien bestimmen, die zur Bewertung der Optionen herangezogen werden.
In dieser Arbeit werden folgende Kriterien (Kr_x) zur Bewertung der Maßnahmengruppen festgelegt:
 - **Kr₁**: Einordnung der Maßnahme in das TOP-Prinzip gemäß Pt. 10.1
 - **Kr₂**: Durch die Maßnahme entstehende Kosten.
 - **Kr₃**: Der mit der Maßnahme verbundene Aufwand für die Einsatzkräfte.
 - **Kr₄**: Wirksamkeit der Maßnahme.
 - **Kr₅**: Zeitliche Umsetzbarkeit der Maßnahme.

Erläuterungen:

Es werden insgesamt fünf Bewertungskriterien verwendet, die im Zusammenhang mit der Fragestellung als relevant erachtet werden.

Da die Bewertung der Maßnahmen unter den Aspekten des Arbeitsschutzes erfolgen soll, ist die Einordnung der Maßnahmen in das STOP-Prinzip ein essenzielles Kriterium. Die Rangfolge der Maßnahmen spielt, wie in Punkt 10.2 beschrieben, eine große Rolle und ist daher zu berücksichtigen (Kr₁).

Ein weiterer wesentlicher Aspekt, gerade im Hinblick auf eine flächendeckende Umsetzung bei den Einsatzkräften, ist die Frage der durch eine Maßnahme entstehenden Kosten für die Trägerin der Feuerwehr, in der Regel die jeweilige Kommune bzw. die Hilfeleistungsorganisation. Hohe Investitionskosten sind in aller Regel sehr deutliche Hemmnisse bei der flächigen Einführung neuer Techniken oder Systeme. Insofern stehen hohe Kosten einer Verbesserung von Sicherheit und Gesundheit in der Regel entgegen (Kr₂).

Ähnlich gelagert sind die Fälle, die einen hohen persönlichen oder organisatorischen Aufwand für die Einsatzkräfte bedeuten. Daher ist aus Sicht des Verfassers auch dies ein relevantes Bewertungskriterium (Kr₃). Ist eine Maßnahme damit verbunden, dass umfangreiche Schulungen notwendig sind, um die Berechtigung zur Anwendung der Technik bzw. Taktik zu erlangen, senkt dies zum einen die Akzeptanz, aber auch die flächendeckende Verbreitung. Maßnahmen sollen daher idealerweise niederschwellige Anwendungsvoraussetzungen haben. So sind z. B. Unterweisungen am Standort durch eigene Multiplikatoren gegenüber zeit- und kostenintensiven Lehrgängen bei externen Anbietern zu bevorzugen.

Nicht alle Maßnahmen haben die gleiche Wirksamkeit im Hinblick auf Sicherheit und Gesundheit der Einsatzkräfte. Daher ist die Betrachtung der Wirksamkeit ebenfalls ein weiteres Bewertungskriterium (Kr₄).

Eine weitere wichtige Betrachtung ist der zeitliche Umsetzbarkeitsfaktor einer Maßnahme (Kr₅). Effektive Maßnahmen, deren Umsetzung jedoch zeitlich völlig unabsehbar sind, weil z. B. technische Entwicklungen bzw. der Stand der Technik dies noch nicht erlauben, sind für eine aktuelle Verbesserung der Situation nur sehr bedingt hilfreich.

3. Festlegung einer Gewichtung (GKR₁₋₅) der Bewertungskriterien.

Die Kriterien Kr₁₋₅ sollen wie folgt gewichtet werden.

- **GKr₁**: 40% (0,4)
- **GKr₂**: 10% (0,1)
- **GKr₃**: 20% (0,2)
- **GKr₄**: 20% (0,2)
- **GKr₅**: 10% (0,1)

Erläuterungen:

Die festgelegten Bewertungskriterien werden nicht als gleichrangig betrachtet. Es ist vielmehr sinnvoll, diese zu gewichten, um ihre jeweilige Bedeutung in der Nutzenanalyse in dieser Arbeit zu betonen.

Um in der Systematik gemäß Punkt 10.2 zu bleiben, wird das Kr₁ mit 40% / 0,4 sehr hoch gewichtet.

Die Kosten (Kr₂) spielen eine Rolle, sollen aber kein wesentlicher Grund sein, eine geeignete Maßnahme zu unterlassen. Daher erfolgt eine Gewichtung mit lediglich 10% / 0,1.

Der zu betreibende Aufwand für die Einsatzkräfte (Kr₃), eine Maßnahme umzusetzen ist hingegen sehr wohl ein wichtiger Aspekt und wird daher mit 20% / 0,2 gewichtet.

Gleiches gilt für die Wirksamkeit einer Maßnahme (Kr₄). Auch diese ist wesentlich und wird daher ebenfalls mit 20% / 0,2 gewichtet.

Die zeitliche Umsetzbarkeit (Kr₅) soll nicht unbeachtet bleiben, wird jedoch nur mit 10% / 0,1 bewertet, um zukünftige Entwicklungen, deren Einsatz noch nicht absehbar ist, nicht überzubetonen.

Die Summe der Gewichtungen muss 100% / 1,0 ergeben.

4. Bewertungsskala festlegen.

Anhand der Bewertungsskala erfolgt die Einordnung der Maßnahmengruppen im Hinblick auf ihre Relevanz bezüglich Sicherheit und Gesundheit der Einsatzkräfte. Es werden folgende Bewertungsfaktoren (Bf) verwendet:

- **Bf 1** = sehr ungünstig
- **Bf 2** = ungünstig

- **Bf 3** = zufriedenstellend / neutral
- **Bf 4** = gut
- **Bf 5** = sehr gut

Erläuterungen:

Die Bewertungsfaktoren sind im folgenden Sinne zu verstehen:

Ist ein Bewertungskriterium im Hinblick auf die Schutzzielerreichung für die Einsatzkräfte sehr ungünstig, entspricht dies dem Bf 1.

Ist ein Bewertungskriterium sehr gut geeignet, um das Schutzziel für die Einsatzkräfte zu erreichen, entspricht dies dem Bf 5.

5. Bewertung / Berechnung

Die Berechnung der Teilnutzwerte (TnW) pro Bewertungskriterium erfolgt durch Multiplikation der jeweiligen Gewichtung des Bewertungskriteriums (GKr_x) einer Maßnahmengruppe mit dem Bewertungsfaktor (Bf). Addiert man alle Teilnutzwerte einer Maßnahmengruppe, erhält man den zugehörigen Gesamtnutzwert (GnW). Dies kann grundsätzlich mit folgender Formel ausgedrückt werden:

$$GnW(Mn_x) = \sum (GKr_{(1-5)} \times Bf_{(1-5)})$$

Die Gesamtnutzwerte erlauben es, die Maßnahmengruppen hinsichtlich ihrer Schutzzielerreichung zu vergleichen. Je höher ein Gesamtnutzwert einer Maßnahmengruppe ist, desto besser ist deren Zielerreichungsgrad aus der Perspektive der Einsatzkräfte.

Werden diese Schritte auf die Mn1-Mn30 angewendet und tabellarisch dargestellt, ergeben sich die in Tabelle 22 ersichtlichen Teil- und Gesamtnutzwerte.

Tabelle 22: Ergebnisse der Nutzwertanalyse

Mn	Kr ₁		Kr ₂		Kr ₃		Kr ₄		Kr ₅		GnW
	Bf	TnW	Bf	TnW	Bf	TnW	Bf	TnW	Bf	TnW	
1	4	1,6	5	0,5	5	1,0	5	1,0	2	0,2	4,3
2	4	1,6	5	0,5	5	1,0	5	1,0	2	0,2	4,3
3	4	1,6	5	0,5	5	1,0	5	1,0	2	0,2	4,3
4	4	1,6	5	0,5	5	1,0	5	1,0	2	0,2	4,3
5	4	1,6	5	0,5	5	1,0	5	1,0	2	0,2	4,3
6	4	1,6	5	0,5	5	1,0	5	1,0	2	0,2	4,3
7	4	1,6	5	0,5	5	1,0	5	1,0	2	0,2	4,3
8	3	1,2	5	0,5	5	1,0	5	1,0	4	0,4	4,1
9	4	1,6	5	0,5	5	1,0	5	1,0	1	0,1	4,2
10	4	1,6	3	0,3	3	0,6	4	0,6	4	0,4	3,7
11	4	1,6	3	0,3	3	0,6	4	0,6	4	0,4	3,7
12	3	1,2	3	0,3	3	0,6	4	0,6	4	0,4	3,3
13	3	1,2	4	0,4	3	0,6	3	0,6	4	0,4	3,2
14	3	1,2	4	0,4	3	0,6	3	0,6	4	0,4	3,2
15	3	1,2	4	0,4	3	0,6	3	0,6	4	0,4	3,2
16	3	1,2	4	0,4	3	0,6	3	0,6	4	0,4	3,2
17	3	1,2	4	0,4	3	0,6	4	0,6	4	0,4	3,4
18	3	1,2	4	0,4	3	0,6	3	0,6	4	0,4	3,2
19	3	1,2	4	0,4	3	0,6	3	0,6	4	0,4	3,2
20	3	1,2	4	0,4	3	0,6	3	0,6	4	0,4	3,2
21	3	1,2	4	0,4	3	0,6	3	0,6	4	0,4	3,2
22	3	1,2	4	0,4	3	0,6	4	0,6	4	0,4	3,4
23	2	0,8	3	0,3	3	0,6	3	0,6	4	0,4	2,7
24	2	0,8	3	0,3	2	0,4	4	0,4	4	0,4	2,7
25	3	1,2	4	0,4	3	0,6	4	0,6	4	0,4	3,4
26	4	1,6	2	0,2	3	0,6	4	0,6	4	0,4	3,6
27	4	1,6	2	0,2	2	0,4	4	0,4	4	0,4	3,2
28	4	1,6	2	0,2	3	0,6	4	0,6	4	0,4	3,6
29	4	1,6	2	0,2	3	0,6	5	0,6	4	0,4	3,8
30	2	0,8	3	0,3	3	0,6	2	0,6	3	0,3	2,4

Gruppiert man die Werte der Gesamtnutzwerte aller Maßnahmengruppen absteigend, erhält man das in der Tabelle 23 dargestellte Ergebnis.

Tabelle 23: Maßnahmen sortiert gemäß ihres GnW

Mn	GnW
1 - 7	4,3
9	4,2
8	4,1
29	3,8
10, 11	3,7
26, 28	3,6
17, 22, 25	3,4
12	3,3
13-16, 18-21, 27	3,2
23, 24	2,7
30	2,4

Die weitere Bewertung der in der Tabelle 23 dargestellten Ergebnisse erfolgt im Punkt 13.1.4.3.

13 Diskussion und Grenzen der Aussagekraft der Arbeit

13.1 Diskussion

13.1.1 Allgemeines

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die möglichen Gefährdungen, die durch den (zum Teil noch zu erwartenden) Einsatz von alternativen Energieträgern in Fahrzeugen bei Einsätzen der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen auftreten können, zu identifizieren, systematisch zu bewerten, geeignete Maßnahmen abzuleiten und diese anhand ihres Nutzwertes zu priorisieren. Einige dieser alternativen Energieträger werden mit dem Zweck der Klimaneutralität forciert, jedoch nicht alle der in dieser Arbeit untersuchten Energieträger tragen gleichermaßen zum Erreichen der Klimaziele bei. Da diese jedoch in Verwendung sind und die Einsatzkräfte damit rechnen müssen, im Zuge von Einsatzmaßnahmen an Verkehrsträgern damit konfrontiert zu werden, wurden auch diese, in der Regel gasförmigen Energieträger, wie z. B. LPG betrachtet.

Eine Diskussion bzw. Bewertung des in den Punkten 7.1 und 7.2 exemplarisch beschriebenen Einsatzgeschehens soll hier hauptsächlich unter dem Aspekt von Sicherheit und Gesundheit der Einsatzkräfte vorgenommen werden, soweit das mit den zur Verfügung stehenden Daten möglich ist.

Eine intensive Diskussion wird bezüglich der Wahl eines geeigneten Löschmittels bei der Brandbekämpfung von BEV- bzw. deren HV-Speicherbränden geführt. Während vor einigen Jahren noch der Einsatz von Metallbrandpulver (Klasse D gemäß DIN EN 3) propagiert wurde, da man annahm, dass beim Brand von LIB hauptsächlich brennendes Lithium zum Brandgeschehen beitrug, konnte dies inzwischen als nicht zutreffend identifiziert werden. Eine zufriedenstellende Löschwirkung von Löschpulver, egal in welche Brandklasse dies nach DIN EN 3 eingestuft ist, ist beim Brand von LIB nicht zu erreichen. Dasselbe gilt für das Löschmittel Kohlenstoffdioxid.

13.1.2 Einsatzszenarien

Der Blick auf die bisher dokumentierten Ereignisse von Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern zeigt ein breites Spektrum an Einsatzszenarien, auf die die Einsatzkräfte zum Teil strategisch sehr unterschiedlich reagieren müssen. Es scheint daher angebracht, die möglichen Einsatzszenarien bei Bränden und Unfällen von Fahrzeugen mit alternativen

Energieformen aufzuzeigen, deren jeweils damit verbundenen Gefährdungen und Schutzziele zu ermitteln und mögliche Handlungsanleitungen zu entwickeln, um ein sicheres Tätigwerden zu ermöglichen. Dies wurde im Punkt 8 aufgegriffen. In vier Modellszenarien, die wiederum je mit drei Szenarien und vier Risikofaktoren verknüpft werden können, wurde versucht, ein möglichst breites Spektrum an erwartbaren Einsatzszenarien der Einsatzkräfte in Verbindung mit Einsätzen an Verkehrsträgern mit alternativen Antrieben zu beschreiben. Dabei wurde berücksichtigt, dass sich die Einsatzszenarien auch in umschlossenen verkehrstechnischen Bereichen wie z. B. Tunnel oder Tiefgaragen ereignen können. Ein tragisches Beispiel hierzu zeigt ein schwerer Zwischenfall in Spanien im Jahr 2025, wobei zwei Einsatzkräfte der Feuerwehr bei der Brandbekämpfung in einer Tiefgarage ums Leben kamen. Dem Brand ging ein Unfall eines BEVs in der Tiefgarage voraus. Die genaue Unfallursache stand beim Verfassen der Arbeit noch nicht fest (CTIF International Association of Fire Services 2025b).

In Summe konnten bei diesem Vorgehen 96 verschiedene Einsatzszenarien identifiziert werden, die je einer Gefährdungsbeurteilung unterzogen wurden.

13.1.3 Entscheidungsfindung im Einsatzgeschehen

Eine zuvor zu klärende Frage war es jedoch, wie menschliche Entscheidungen grundsätzlich zu Stande kommen, durch welche Faktoren Entscheidungen beeinflusst werden können und inwieweit schnelles und richtiges Entscheiden trainiert werden kann. Dies wurde im Punkt 9.1 beleuchtet.

Zusammenfassend kann zu Punkt 9.1 festgestellt werden, dass das Treffen von risikobehafteten Entscheidungen unter Zeitdruck durch zahlreiche Faktoren beeinflusst wird. Bereits vorhandene Erfahrung mit vergleichbaren Situationen hat dabei einen entscheidenden Anteil, ebenso auch die Art sowie die Quanti- und Qualität der zur Verfügung stehenden Informationen. Stehen zu viele Informationen zur Verfügung, erschwert dies die Fokussierung und die Entscheidungsfindung. Viele mit Einsätzen der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen assoziierten Gegebenheiten, wie z. B. Zeitdruck, unklare Lage, spontane Lageänderungen, Zielkonflikte, persönliche Betroffenheit etc., führen zu Stress und damit tendenziell zu unspezifischeren Entscheidungen als bei Abwesenheit dieser Stressoren.

Es kann daher angenommen werden, dass das gezielte Vorhalten bzw. Benutzen standardisierter und spezifischer Informationen für Einsatzkräfte einen erheblichen Vorteil bei

der Entscheidungsfindung bedeutet. Erhalten Einsatzkräfte die relevanten Informationen zeitnah in einer ihnen vertrauten Form, reduziert dies die psychische Belastung in zeitkritischen Situationen. Dabei ist jedoch zu beachten, sich nicht nur auf bereits gemachte Erfahrungen zu verlassen, sondern auch eventuelle Abweichungen zu identifizieren und zu bewerten. Zu viele irrelevante Informationen können hingegen den Entscheidungsprozess beeinträchtigen, z. B. durch das „Verschleiern“ der eigentlich relevanten Informationen.

Betsch *et al.* haben beschrieben, dass gerade stark routinierte Prozesse zu konservativen Entscheidungen führen können, insbesondere unter Zeitdruck. Das kann dazu führen, dass neue oder abweichende Informationen übersehen werden und nicht die optimale Strategie zur Problemlösung herangezogen wird (Betsch 2005, S. 267).

Ein weiterer Aspekt ist das Sammeln von Einsatzerfahrungen, aber auch gezieltes Trainieren und Üben solcher Einsatzszenarien. Dies erleichtert und verbessert die Entscheidungsfindung. Idealerweise erfolgt dies nicht nur auf individueller Ebene, sondern innerhalb der taktischen Einheit, um dem in Punkt 9.1 beschriebenen Zustand des *team-flows* zu erreichen.

Eine Reduzierung der psychischen Belastung sowie die Vermeidung von Zielkonflikten bei der Entscheidungsfindung führt nachweislich, wie in Punkt 9.1 aufgeführt, dazu, dass Personen abgewogener und rationaler entscheiden und dabei ihr vollständiges kognitives Potenzial ausnutzen. Dies bedeutet in der Regel, reflektierte und damit für die Einsatzkräfte sichere Entscheidungen zu fällen.

Aufgrund dieser Erkenntnisse kann davon ausgegangen werden, dass die unter Punkt 1.2 aufgestellte Hypothese 4 zutreffend ist.

13.1.4 Gefährdungsbeurteilung

13.1.4.1 Methodik

In den Punkten 9.2 und 9.3 wurde die Notwendigkeit zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung bei den Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen aufgezeigt. Insbesondere im Regelwerk der DGUV ist dies verankert, wenn keine weitergehenden Ausführungen in deren Schriften vorhanden sind. Für die beabsichtigten Gefährdungsbeurteilungen der ausgewählten Szenarien ist dies der Fall. Für die Durchführung wird ein semi-quantitativer Ansatz in Kombination der Systematik von Nohl und Thiemecke gewählt, wie in Punkt 10.2 ausgeführt wurde. Damit ist gewährleistet, dass eine Vergleichbarkeit der gewählten Szenarien untereinander genauso möglich wird, wie die Definition von Grenzkrisikobereichen. Um der Realität von Schadensereignissen bei Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen gerecht zu werden, wurden als Eintrittswahrscheinlichkeiten keine

Zeiträume, sondern Wahrscheinlichkeiten pro Schadensereignis definiert, siehe hierzu die Tabelle 12.

Aus Sicht des Verfassers stellt dies die exaktere Möglichkeit dar, die beschriebenen Szenarien zu beurteilen, da damit die Betrachtung von langen Zeiträumen ohne Schadenergebnisse vermieden wird. Somit bezieht man die Häufigkeit anstatt auf einen Zeitraum auf ein konkretes Ereignis. Dies muss jedoch beim Vergleich mit anderen Gefährdungsbeurteilungen zum Thema Gefährdungen durch alternative Energieträger beachtet werden. Auch für die Auswirkung (A), die den Schweregrad der Folgen beschreibt, werden spezifische Parameter für die Anwendung in dieser Arbeit festgelegt. Sie sind jedoch dem Grundsatz nach ebenfalls an Thiemecke und Nohl angelehnt, jedoch erweitert und modifiziert (Nohl 1988).

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die hier zur Anwendung kommenden Festlegungen, bei welchen nicht nur Verletzungen berücksichtigt werden. Auch die Einwirkung unter anderem von kanzerogenen, mutagenen oder reproduktionstoxischen Gefahrstoffen, physischen und psychischen Belastungen, Einwirkungen von außen und elektrischen Körperdurchströmungen wurde hierbei aufgenommen, um eine möglichst adäquate Einstufung der Auswirkung vornehmen zu können.

Grundlage für die Festlegung der in Tabelle 13 festgelegten Auswirkungen waren die Erkenntnisse über die ermittelten Gefährdungen des Kapitels 6. Hierbei wurde darauf geachtet, dass eine möglichst passgenaue Einstufung zu den bereits ermittelten Gefährdungen ermöglicht wird. Das (noch) akzeptable Grenzkrisiko wird in dieser Arbeit mit einer Auswirkung >4 festgelegt, da ab einer Auswirkung ≤ 4 mit irreversiblen Schäden gerechnet werden muss. Das Erleiden irreversibler Beeinträchtigungen ist aus Sicht des Verfassers unter allen Umständen zu vermeiden und daher die Auslöseschwelle zur inakzeptablen Auswirkung. Mit den in Tabelle 12 bzw. 13. festgelegten Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. Auswirkungen war es möglich, eine Risikomatrix zu berechnen und farblich zu hinterlegen, siehe Tabelle 14. Dies erleichtert einen schnellen Überblick über das jeweilige Risiko einer Eintrittswahrscheinlichkeits- und Auswirkungskombination. Mit Hilfe der farblichen Unterscheidung ist eine rasche Orientierung hinsichtlich der Dringlichkeit von Maßnahmen ableitbar, siehe Tabelle 15.

13.1.4.2 Durchführung der Gefährdungsbeurteilungen

Die entwickelte Systematik wurde herangezogen, um alle in Punkt 8 beschriebenen Szenarien einer Gefährdungsbeurteilung zu unterziehen, siehe hierzu auch den Anhang mit

einer detaillierten Darstellung aller Gefährdungsbeurteilungen. Um diese übersichtlich darzustellen, wurden die Ergebnisse in Tabelle 16 zusammengefasst.

Beim Betrachten der Tabelle 16 fällt auf, dass die Gefährdungsbeurteilungen zu allen Einsatzszenarien bei den Gefährdungen „Chemisch“, „Brand / Explosion“, und „Thermisch“ regelmäßig zu Ergebnissen in den beiden höchsten Risikogruppen geführt haben, wobei die Gefährdung „Brand / Explosion im umschlossenen Bereichen“ nahezu ausschließlich, bis auf wenige Ausnahmen in der höchsten Risikogruppe einzustufen ist.

Elektrische Gefährdungen sind ebenfalls regelmäßig in der zweithöchsten Risikogruppe zu finden, dies jedoch nur bei Kategorien, die Fahrzeuge mit HV-Speicher beinhalten. Bei den anderen alternativen Energieträgern spielt die elektrische Gefährdung keine übergeordnete Rolle.

Im Gegensatz zu Kategorien, die Fahrzeuge mit HV-Speichern umfassen, sind bei gasförmigen alternativen Energieträgern auch Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen oder durch die Arbeitsumgebung festzustellen.

Bei den mechanischen Gefährdungen verhält es sich genau entgegengesetzt: lediglich bei den Kategorien, wo Fahrzeuge mit HV-Speicher involviert sind, weisen erhöhte Risiken durch mechanische Gefährdungen auf.

Eine Gefährdung durch psychische Einwirkungen ist im Gegensatz dazu durchgängig für alle Kategorien nachweisbar, unabhängig von der Art des alternativen Energieträgers.

Wie der Tabelle 17 zu entnehmen ist, kann durch die Zuordnung der Häufigkeit der Risikogruppen pro Gefährdung festgestellt werden, dass insbesondere die Risikowerte bei der Brand- und Explosionsgefährdung erheblich zunehmen, wenn die jeweilige Kategorie in einem umschlossenen Bereich stattfindet. Dies bewirkt allein für diese Gefährdungsart eine Zunahme um über 80 Prozentpunkte in der höchsten Risikogruppe. Dabei muss auch erwähnt werden, dass diese Zunahme hauptsächlich aufgrund der damit verbundenen, stark ansteigenden Gefährdung durch gefährliche explosionsfähige Atmosphären in umschlossenen Bereichen begründet ist. Die Gefährdung der Einsatzkräfte durch Brandeinwirkungen spielt dabei weniger eine Rolle.

13.1.4.3 Bewertung der Gefährdungsbeurteilungen

Um die betrachteten Modelle bzw. deren Kategorien nicht nur anhand der einzelnen ermittelten Risiken hinsichtlich der jeweiligen Gefährdung, sondern in Gänze betrachten und untereinander vergleichen zu können, wurde die Hilfsgröße Risikosummenwert in Punkt 10.2 eingeführt und in den Tabellen 18 – 21 für alle Modelle dargestellt. Dazu wurden die

ermittelten Risikowerte Kategorie-spezifisch addiert, um je einen Summenwert pro Kategorie zu erhalten. Mit dieser Hilfsgröße ist es möglich, die Kategorien miteinander zu vergleichen und z. B. solche mit einem hohen Risikosummenwert zu ermitteln.

Es kann davon ausgegangen werden, dass Kategorien, die einem hohen Risikosummenwert aufweisen auch mit einem sehr hohen bis zu einem extremen Risiko für die Einsatzkräfte einhergehen. Als Schwellenwert für das Vorliegen eines sehr hohem bzw. extremen Risikos wurde für diese Arbeit ein Risikosummenwert ab 50 festgelegt. Ein Unterschreiten des Risikosummenwertes von 50 bedeutet im Umkehrschluss jedoch nicht, dass damit keine Risiken für Einsatzkräfte verbunden sind. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass in allen betrachteten Kategorien Risiken für Einsatzkräfte identifiziert werden konnten.

Bei der Betrachtung des Modells 1, den „Verkehrsunfall mit BEV-Beteiligung“, kann festgestellt werden, dass die Kategorien der Einsatzszenarien, die eingeklemmte (K 1.1.1 und K 1.2.1) oder eingeschlossene Personen (K 1.1.2 und K 1.2.2) in Kombination mit reagierenden bzw. kritischen HV-Speichern beinhalten, die höchsten Risikosummenwerte aufweisen. Dies ist nachvollziehbar, da das Befreien / Entklemmen mit technischen Gerätschaften bzw. das notfallmedizinische Versorgen von Personen ein unmittelbares und zum Teil auch länger andauerndes Arbeiten am verunfallten Fahrzeug bzw. den darin befindlichen Patienten notwendig machen. Kommt es während dieser Tätigkeit z. B. zu einem plötzlichen Venting-Ereignis des HV-Speichers ggf. mit Strahlbrand, sind unter Umständen mehrere Einsatzkräfte von Feuerwehr und Rettungsdienst unmittelbar im Wirkfeld anwesend und damit potenziell betroffen. Hinzu kommen weitere Gefährdungen durch mechanische, chemische, elektrische, thermische und psychische Faktoren. Finden diese Szenarien (K 1.1.1*; 1.1.2* und K 1.2.1*; 1.2.2*) in umschlossenen Bereichen statt, steigt der ohnehin schon hohe Risikosummenwert nochmals, da dann auch noch die Gefährdung durch das potenzielle Vorhandensein von gefährlichen explosionsfähigen Atmosphären hinzukommt.

Geht vom HV-Speicher keine Gefährdung aus, da dieser als stabil betrachtet werden kann (K1.1.3), ist auch der Risikosummenwert deutlich niedriger. In umschlossenen Bereichen (K1.1.3*) erfährt der Risikosummenwert keine Steigerung, da bei stabilem HV-Speicher nicht mit einer Propagation bzw. Gasfreisetzung gerechnet werden muss.

Ist das Fahrzeug mit der Ladeinfrastruktur verbunden und in einen Unfall verwickelt, z. B. durch einen Auffahrunfall am Straßenrand (1.1.4 und 1.1.4*) steigt der Risikosummenwert jedoch wieder an, da dann die elektrische Gefährdung mehr in den Vordergrund tritt.

Beim Betrachten der Risikosummenwerte des Modells 2 „Brand eines BEV“ in Tabelle 19 ergeben sich deutliche Analogien zum Modell 1. Die höchsten Risikosummenwerte werden dann erzielt, wenn Personen in einem BEV eingeklemmt (2.1.1) oder eingeschlossen (2.2.1) sind und eine Propagation des HV-Speichers bereits eingesetzt hat oder durch die Beaufschlagung des HV-Speichers durch einen sekundären Brand (2.1.2; 2.2.2) sehr wahrscheinlich wird bzw. unmittelbar einsetzen kann. Wie bei Modell 1 wird dies durch ein Stattfinden in umschlossenen Räumen noch verschärft (2.1.1*; 2.2.1*; 2.1.2*; 2.2.2*).

Ist der Zustand des HV-Speichers bei eingeklemmten (2.1.3) oder eingeschlossenen (2.2.3) Personen zwar zunächst stabil, jedoch darüber hinaus unbekannt, sinkt der Risikosummenwert unter 50. Dies fällt beim Szenario 2.2.3 und 2.2.3* deutlich aus, da davon ausgegangen worden ist, dass hierbei die Einsatzzeit unmittelbar am BEV durch weniger umfangreiche technische Maßnahmen geringer ist als bei einer Einklemmung. Analysiert man diese Szenarien (2.1.1*; 2.2.1*; 2.1.3*; 2.2.3*) in umschlossenen Räumen, steigt der Risikosummenwert zum Teil wieder deutlich, analog zum Modell 1.

Finden die Szenarien dann statt, wenn das BEV mit seiner Ladeinfrastruktur verbunden ist, überschreiten nur Szenarien im umschlossenen Räumen der Schwellenwert von 50 (2.1.4*; 2.3.4*). Alle weiteren bleiben darunter, wenn zum Teil auch nur knapp (2.1.4; 2.2.4; 2.3.4).

Betrachtet man das Modell 3 „Verkehrsunfall mit einem gasbetriebenen Fahrzeug“, dessen Risikosummenwerte in Tabelle 20 dargestellt sind, erkennt man, dass hierbei zum Teil noch höhere Risikosummenwerte erreicht werden als bei den Modellen 1 bzw. 2. Dies liegt auch daran, dass sich beim Austreten von Gas aus dem Fahrzeugspeicher oder der Ladeinfrastruktur zusätzliche Gefährdungen ergeben können, wie z.B. physikalische Einwirkungen durch Lärm (z. B. durch Abströmgeräusche) und durch Wechselwirkung mit der Arbeitsumgebung (z. B. Topografie der Einsatzstelle). Jedoch ist auch hier erkennbar, dass die Szenarien mit eingeklemmten (3.1.1*) bzw. eingeschlossenen Personen (3.2.1*) in umschlossenen Räumen die höchsten Risikosummenwerte aufweisen, insbesondere dann, wenn das energietragende Gas brennend ausströmt. Dies ist hauptsächlich durch die damit verbundene, sehr hohe thermische Gefährdung begründet.

Finden diese Szenarien im Freien statt (3.1.1; 3.2.1) liegen die Risikosummenwerte etwas niedriger, jedoch weiterhin über 50, da die thermische Gefährdung im Nahbereich der Fahrzeuge weiterhin sehr hoch ist. Bei den Fällen, in welchen sich Personen in den Fahr-

zeugen befinden und das Antriebsgas nicht brennend austritt, sinken die Risikosummenwerte unter 50 (3.1.2; 3.2.2), weil hier die thermische Gefährdung nicht gegeben ist. Finden diese Szenarien in umschlossenen Räumen statt (3.1.2*; 3.2.2*) erhöht sich die Gefährdung durch das potenzielle Vorhandensein einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre, die Risikosummenwerte überschreiten 50. Sobald kein Gas aus dem Fahrzeugspeicher bzw. der Ladeinfrastruktur austritt, sinkt der Summenwert der Szenarien (3.1.3; 3.1.3*; 3.1.4; 3.1.4*; 3.2.3; 3.2.3*; 3.2.4; 3.2.4*) mit eingeklemmten bzw. eingeschlossenen Personen deutlich. Auch in umschlossenen Räumen wird der Schwellenwert von 50 nicht überschritten. Diese Szenarien unterscheiden sich dann nicht mehr wesentlich zu Unfällen mit ICEV.

Befinden sich keine Personen mehr im Fahrzeug und ist somit ein direktes Tätigwerden an dem/den betroffenen Fahrzeug(en) nicht notwendig, wird der Schwellenwert nur noch bei den Szenarien überschritten, wenn Gas brennend bzw. nicht-brennend austritt und sich das Geschehen in umschlossenen Räumen (3.3.1*; 3.3.2*) abspielt. Wobei auch ein brennender Gasaustritt im Freien einen hohen Summenwert aufweist, der den Schwellenwert jedoch knapp unterschreitet (3.3.1).

Die häufigsten Schwellenwertüberschreitungen beim Risikosummenwert weist das Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“ auf, wie der Tabelle 21 entnommen werden kann.

Bis auf die Szenarien, wo das Fahrzeug im Freien mit der Tankinfrastruktur verbunden ist und kein Gas austritt (4.1.4; 4.2.4), weisen alle Szenarien mit eingeklemmten bzw. eingeschlossenen Personen deutlich höhere Risikosummenwerte über 50 auf (4.1.1; 4.1.2; 4.1.3; 4.2.1; 4.2.2; 4.2.3). Selbst wenn der Energiespeicher zunächst dicht und stabil ist, besteht durch sekundäre Brandbeaufschlagung die Gefahr eines Energiespeicherzerknalls.

Dieselben Szenarien in umschlossenen Räumen erhöhen die Risikosummenwerte auf über 60, da dadurch die Einwirkungen auf die Einsatzkräfte nochmals verstärkt werden (4.1.1*; 4.1.2*; 4.1.3*; 4.2.1*; 4.2.2*; 4.2.3*). Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Kombination aus chemischer und thermischer Gefährdung, das sehr hohe Risiko eines plötzlichen Energiespeicherzerknalls und die Notwendigkeit von Tätigkeiten unmittelbar am Fahrzeug zusammenwirken.

Unterschritten wird der Risikoschwellenwert nur bei den Szenarien ohne eingeklemmte bzw. eingeschlossene Personen im Freien (4.3.1; 4.3.2; 4.3.3; 4.3.4). Sobald diese jedoch

in umschlossenen Räumen stattfinden, wird die Risikoschwelle von 50 überschritten, sobald das Fahrzeug mit der Tankinfrastruktur verbunden ist, jedoch nur knapp (4.3.1*; 4.3.2*; 4.3.3*; 4.3.4*).

Es kann also bilanziert werden, dass die häufigsten identifizierten Gefährdungen, die auch gleichzeitig in den höchsten Risikogruppen zu finden waren, die Gefährdung durch Brand / Explosionsgefahr, insbesondere in umschlossenen Bereichen, sowie die thermische Gefährdung sind (siehe hierzu auch Tabelle 17).

Eine weitere Erkenntnis bei der Bewertung der einzelnen Modelle ist, dass das Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“ in der Gesamtschau die meisten Überschreitungen des RSW sowie die höchsten Einzelwerte der RSW aufweist. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass Einsatzszenarien, die brennende Fahrzeuge mit gasförmigen Energieträgern umfassen, mit dem höchsten Risiko für Einsatzkräfte verbunden sind. Das Modell 2 „Brand eines BEV“ folgt an zweiter Stelle, was die Risiken für Einsatzkräfte betrifft. An dritter Stelle stehen die Modelle 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenen Fahrzeug“ und 1 „Verkehrsunfall mit einem BEV“. Das Modell 1 weist zwar in der Gesamtschau die geringsten Risikosummenwerte auf, liegt jedoch bei der Anzahl der Risikoschwellenwertüberschreitungen noch vor Modell 3. Daher werden diese beiden Modelle als gleichwertig hinsichtlich der Gefährdung der Einsatzkräfte betrachtet.

Was jedoch bei allen vier Modellen gleich ist, ist die Tatsache, dass die Gefährdungen für die Einsatzkräfte stark davon abhängen, ob Personen im betroffenen Fahrzeug eingeklemmt sind. Ist dies der Fall, sind die höchsten Gefährdungen zu erwarten, sind Personen lediglich im Fahrzeug eingeschlossen, sinken die Risiken zwar, bleiben jedoch nach wie vor hoch. Befinden sich keine Personen mehr in den betroffenen Fahrzeugen, ist das Risiko bei allen Modellen deutlich niedriger. Ein ähnlicher Zusammenhang ergibt sich beim Zustand der Energiespeichersysteme: propagiert der HV-Speicher bzw. tritt gasförmiger bzw. gasförmig-werdender Energieträger aus, besteht ein deutlich höheres Risiko für die Einsatzkräfte. Auch die Verbindung zur Tank- bzw. Ladeinfrastruktur kann ein Faktor sein, der das Risiko für Rettungsmaßnahmen an Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern erhöht. Ein Faktor, der über alle Modelle hinweg das Risiko erheblich steigert, ist, wenn das Einsatzszenario in einer umschlossenen baulichen Anlage stattfindet. Dies führt durchgehend bei allen Modellbetrachtungen zu den höchsten Risikosummenwerten.

13.1.5 Nutzwertanalyse der Maßnahmen

Im nächsten Schritt wurden die in der Gefährdungsbeurteilung erarbeiteten Maßnahmen entsprechend dem bereits beschriebenen STOP-Prinzip gruppiert und gleichartige Maßnahmen zu Maßnahmengruppen zusammengefasst. Das Spektrum der beschriebenen Maßnahmen ist erwartungsgemäß sehr groß, gleiches gilt für den zu erwartenden Realisierungsgrad. Um die identifizierten Maßnahmen bzw. Maßnahmengruppen systematisch miteinander vergleichen zu können, z. B. auf ihre Wirksamkeit hin, wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt (siehe Punkt 12). Dies führte zu folgenden Ergebnissen, die auch in Tabelle 23 dargestellt sind:

Die Mn 1 bis 7 haben in der Nutzwertanalyse den höchsten GnW von 4,3 erzielt. Nahezu alle Maßnahmen, die in diesen sieben Gruppen beschrieben werden, richten sich mit dem Ziel an die Hersteller von Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern, sowohl Fahrzeuge als auch deren Tank- bzw. Ladeinfrastruktur intrinsisch sicher zu gestalten. Dies ist nicht nur im Sinne der Einsatzkräfte, sondern dient insbesondere auch dem Insassenschutz der Fahrzeuge. Daher bestehen dazu weltweit intensive Forschungstätigkeiten, als Beispiel sei hier das Projekt BALSAM - Brandverhalten von Lithium-Ionen-Batteriesystemen und Brandschutz, Wirkung der Schadgase auf Menschen genannt (Bottin 2023) sowie zum Teil auch bereits gesetzliche Vorgaben in diese Richtung. In der Volksrepublik China beispielsweise dürfen HV-Speicher, die ab Juni 2026 in den Verkehr gebracht werden, weder in Brand geraten, noch zu Explosionen führen, wie Liu zu einer Verschärfung der chinesischen Gesetzgebung berichtet (Liu 2025). Auch in Europa und Nordamerika hat man die Wichtigkeit von intrinsisch sicherer HV-Speichertechnik erkannt und entwickelt Lösungen dazu (Henßler S. 2025)

Die Anwendung der Mn1 sowie 3-7 sind von Seiten der Einsatzkräfte nur sehr wenig beeinflussbar. Ihre Umsetzungen sind von sehr vielen Einflussfaktoren abhängig, unter anderen auch sehr stark wirtschaftlich geprägten.

Die Mn2, die ebenfalls den höchsten GnW erreicht hat, zielt nicht auf technische Anpassungen ab, sondern darauf, dass Einsatzkräfte vor Ort digital direkt auf relevante Fahrzeugdaten der beteiligten Fahrzeuge zugreifen können, um z. B. rechtzeitig Kenntnis über drohende kritische Zustände zu erhalten. Dies ermöglicht eine rechtzeitige Anpassung der Einsatztaktik und trägt wesentlich zur Risikoreduzierung bei.

Nur knapp dahinter erreicht die Mn9 einen GnW von 4,2. Sie ist damit ebenfalls eine sehr effektive Maßnahme, die in der Realisierung jedoch noch komplexer als die Mn1-7 erscheint. Gerade im Bestand von verkehrstechnischen Anlagen ist eine Umsetzung der Mn9 nahezu unrealistisch. Beim Planen und Errichten zukünftiger umschlossener baulicher Verkehrsanlagen sollte die Mn9 dringend beachtet werden.

Die Mn8, das Bereitstellen einheitlicher und verständlicher Rettungsdatenblätter durch die Hersteller der Fahrzeuge mit alternativen Energieträgern, erreicht mit einem GnW von 4,1 ebenfalls eine gute Effektivität. Die Informationen, die den Einsatzkräften aus den Rettungsdatenblättern zur Verfügung stehen, sind immens wertvoll und für ein sicheres und effektives Vorgehen im Einsatzgeschehen unverzichtbar. Aus Sicht des Verfassers ist es daher auch sehr wichtig, dass nicht nur Fahrzeuge, die in der Bundesrepublik Deutschland zugelassen wurden, von diesem System erfasst werden, sondern auch Auskünfte über Fahrzeuge mit Zulassungen in europäischen und anderen Ländern möglich sind.

Direkt damit verknüpft ist die Mn29, die einen GnW von 3,8 erreicht. Sie umfasst, dass die Einsatzkräfte auch technisch in der Lage sein müssen, auf die Rettungsdatenblätter zuzugreifen zu können, idealerweise bereits auf der Anfahrt. Mn8 und Mn29 ergänzen sich: zum einen müssen die Informationen von Seiten der Hersteller vorhanden sein, zum anderen benötigen die Einsatzkräfte die technische Ausstattung inkl. Kommunikationseinrichtungen, um diese auch zeitnah nutzen zu können.

Die Mn10 und Mn11, die angepasste Einsatzstrategien zum sicheren Umgehen der Einsatzkräfte bei verunfallten BEVs beschreiben, erzielen einen GnW von 3,7. Nur knapp dahinter liegen mit einem GnW von 3,6 die Mn26 und Mn28, welche eine Verbesserung der apparativen Ausstattung der Einsatzkräfte zum Beherrschen der Gefährdungen, die mit dem Ausströmen gasförmiger Energieträger bzw. dem thermischen Durchgehen eines HV-Speichers verbunden sind, vorschlagen.

Die Mn17, Mn22 und Mn25 weisen je einen GnW von 3,4 auf und stellen damit innerhalb der Unterweisungsmaßnahmen diejenigen mit dem höchsten Nutzwert dar. Inhalt der Unterweisung ist es, mit den Informationen, z. B. aus den Rettungsdatenblättern, sicher umzugehen sowie die Gefahren von Ventingereignissen in umschlossenen Bereichen bzw. von dabei auftretenden Strahlflammen erkennen zu können.

Je um nur 0,1 weniger im GnW haben die Mn12 (GnW 3,3) sowie die Mn 13-16, 18-21 und 27 (alle GnW 3,2). Diese umfassen alle weiteren Unterweisungsmaßnahmen sowie

die Ausstattung der Einsatzkräfte unter anderem mit fernsteuerbarer Messtechnik (Mn27). Diese an sich sehr begrüßenswerte Maßnahme erzielt einen weniger guten GnW, da sowohl die Kosten sehr hoch, aber auch die Umsetzbarkeit noch weitgehend ungeklärt und damit schwer planbar ist.

Einen deutlich geringeren Nutzwert weisen die Mn23 und Mn24 (je GnW 2,7). Beides sind wichtige Maßnahmen (Resilienzschulung, Einsatzstellenhygiene), haben jedoch nur einen geringen unmittelbaren Einfluss auf die Sicherheit bzw. Gesundheit der Einsatzkräfte. Ihr Nutzen ist jedoch auf längere Sicht nicht zu unterschätzen.

Am Ende der Nutzwertskala steht die Mn30, das Zurverfügungstellen von PSA für die Einsatzkräfte. Dies ist aus der Sicht der in Punkt 10.2 beschriebenen Arbeitsschutzsystematik folgerichtig: Wenn z. B. HV-Speicher so konstruiert werden, dass keine gefährlichen explosionsfähigen Atmosphären entstehen bzw. Gefahrstoffe freigesetzt werden, ist das Benutzen von PSA nicht notwendig. Insofern sind das Bereitstellen und Benutzen von PSA zwar eine oftmals notwendige, in ihrer Systematik, Reichweite und Wirksamkeit jedoch nur nachrangige Maßnahme.

Die durchgeführte Nutzwertanalyse hat somit wichtige Erkenntnisse bei der Bewertung der Maßnahmen ergeben.

13.2 Grenzen der Aussagekraft der Arbeit

Beim Betrachten der vorliegenden Arbeit ist es wichtig, auch deren Limitierungen und Einschränkungen zu identifizieren bzw. bei einer Bewertung zu berücksichtigen.

So muss bei der Klassifizierung der erwartbaren Einsatzszenarien (Punkt 8.1) festgestellt werden, dass die Unterscheidung der einzelnen Szenarien nicht stets trennscharf ist. So ist z. B. den Kategorien 3.1.3 (Verkehrsunfall eines gasbetriebenen Fahrzeugs, Person eingeklemmt, Gas tritt brennend aus) und 4.1.3 Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs, Person eingeklemmt, Gas tritt brennend aus) der Übergang nahezu fließend und für den Betrachter zunächst kaum zu unterscheiden. Dies ist auch bei den Modellen 1 und 2 zu beobachten. Eine direkte Übernahme der Klassifizierung als praxisgerechte Handlungsanleitung für Einsatzkräfte ist daher nicht zielführend. Dafür ist auch die Anzahl der definierten Kategorien zu hoch und würde dem Ziel, eine überschaubare Anzahl an Entscheidungsoptionen zur Verfügung zu stellen, entgegenstehen.

Bei der Klassifizierung ist auch zu berücksichtigen, dass nicht alle denkbaren Szenarien abgebildet wurden. Sie darf daher nicht als abschließend betrachtet werden. So wurde z. B. die Thematik, dass Fahrzeuge mit alternativen Energieträgern ganz oder teilweise in Gewässern verunfallen, nicht abgebildet. Auch die Beteiligung bzw. Freisetzung von weiteren Gefahrgütern, die nicht aus den Fahrzeugen mit alternativen Energieträgern stammen, z. B. aber aus Transporten gemäß ADR, wurde bei der Modellauswahl nicht berücksichtigt. Auch hierbei sind weitere Gefährdungen denkbar, die sich in diesen Konstellationen ergeben könnten, in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachten werden. Gleiches gilt für zukünftige alternative Energieträger, die zwar bereits Gegenstand der Forschung, jedoch auf dem Markt noch nicht eingeführt sind. Ein Beispiel hierzu ist die Verwendung von Ammoniak als zukünftiger Energieträger, wie der internationale Feuerwehrverband CTIF beschreibt (CTIF International Association of Fire Services 2025a).

Des Weiteren ist zu beachten, dass die Parameter der durchgeführten Gefährdungsbeurteilung wie z. B. Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung, die in Punkt 10.2 festgelegt wurden, spezifisch auf die Fragestellungen dieser Arbeit ausgelegt wurden. Gleiches gilt für die Risikomatrix (Tabelle 14) und die Einordnung der Risikogruppen in Tabelle 15. Eine Übertragbarkeit auf andere Arbeitssysteme bzw. Gefährdungsbeurteilungen ist daher nicht ohne weiteres möglich.

Die Durchführung der Gefährdungsbeurteilungen selbst ist unter dem Aspekt von Sicherheit und Gesundheitsschutz der Einsatzkräfte durchgeführt worden. Es ist nicht auszuschließen, dass beim Zugrundlegen anderer Schwerpunkte wie z. B. dem Insassenschutz, andere Ergebnisse und Schlussfolgerungen in den Fokus geraten.

Auch das Heranziehen der Hilfsgröße „Risikosummenwert“ (Tabellen 18 – 21) ist unter dem Aspekt zu betrachten, dass dies nur zum Vergleich von Kategorien innerhalb dieser Arbeit dienen kann. Das Bilden von Risikosummenwerten stellt kein allgemeingültiges Verfahren dar. Das Gleiche gilt für die subjektiv festgelegte Schwelle von 50 beim Risikosummenwert als Übergang zum sehr hohen bzw. extrem hohen Risiko für Einsatzkräfte. Das Heranziehen dieser Schwelle ist nur für die Kategorien in dieser Arbeit zulässig bzw. sinnvoll, ein Übertragen auf andere Gegebenheiten nicht zielführend.

Auch die unter Punkt 12 durchgeführte Nutzwertanalyse ist auf die Aspekte der Arbeit ausgelegt. Die verwendeten Parameter, Kriterien, Gewichtungen und Bewertungsfaktoren wurden durch den Verfasser subjektiv und passgenau für den angestrebten Nutzen in

dieser Arbeit festgelegt. Zentraler Leitgedanke war auch hierbei die Gewährleistung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Einsatzkräfte. Würde man hingegen z. B. die Kosteneinsparung und eine möglichst schnelle Umsetzung von Maßnahmen als Kriterien festlegen, ergäbe die Nutzwertanalyse sehr wahrscheinlich andere Gesamtnutzwerte der Maßnahmen.

14 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die mit dem zunehmenden Einsatz von alternativen Energieträgern in Verkehrsträgern gegebenenfalls entstehenden Risiken zu identifizieren und aus Sicht der Einsatzkräfte von Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen zu bewerten. Dazu wurden eingangs vier Hypothesen aufgestellt, die zu untersuchen waren. Diese sollen nun wieder aufgegriffen und anhand der gewonnenen Erkenntnisse bewertet werden.

Hypothese 1:

Die Einführung/Umstellung auf alternative Energieformen als Antriebstechnik bei Verkehrsträgern bedeutet auch das Auftreten von neuen bzw. bis dato unbekannten Risiken und Gefährdungen für Einsatzkräfte von Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen.

Wie der Tabelle 6 zu entnehmen ist, bergen alternative Energieträger eine Reihe von Gefährdungen, die zwar auch zum Teil schon bei flüssigen Energieträgern auf Mineralölbasis anzutreffen waren, jedoch in geringerer Ausprägung. So kann z. B. auch bei einem großflächigen Austritt von Ottokraftstoff erhebliche Brand- und gegebenenfalls auch Explosionsgefahr bestehen, jedoch nicht in der Regelmäßigkeit, wie das z. B. beim Austreten von Ventinggasen aus HV-Speichern oder anderer gasförmiger Energieträger der Fall ist. Neu hinzugekommen ist das Risiko der Explosion eines Speicherbehälters für gasförmige Energieträger, wenn dieser z. B. einer Beflammung ausgesetzt ist. Hier sind in der Praxis trotz umfangreicher technischer Sicherheitsmaßnahmen schon zahlreiche Fälle bekannt geworden, siehe hierzu auch die Punkte 6.2.4, 6.3.4, 6.4.4 und 6.5.4. Dieses Phänomen tritt bei Fahrzeugen mit Diesel- oder Ottokraftstofftanks nicht auf. Auch das zeitverzögerte, oft unvermittelte Reagieren von beschädigten HV-Speichern mit Propagation und / oder Strahlflammenbildung an einer Einsatzstelle ist ein neuer Umstand, dem die Einsatzkräfte Rechnung tragen müssen, siehe hierzu Punkt 6.1.4. Auch die Möglichkeit mit tiefkalten Energieträgern konfrontiert zu werden (siehe hierzu Punkte 6.2.6, 6.3.6, 6.5.6) bzw. auf gasförmige Energieträger zu treffen die unterschiedlichen Dichten aufweisen können, ist neu (siehe hierzu Punkte 6.3.8, 6.2.8, 6.5.8). Gleiches gilt für spannungsführende Hochvoltbauteile (siehe hierzu Punkt 6.2.2) und mit hohem Lärmpegel austretende, gasförmige Energieträger (siehe hierzu z. B. Punkt 6.2.7). Auch sind nahezu unsichtbare Flammenerscheinungen bei ICEV-

Bränden nicht zu beobachten (siehe hierzu Punkt 6.2.7). Die Ablagerung von festen, kanzerogenen Gefahrstoffen, wie z. B. schwermetallhaltige Stäube bzw. deren Oxide nach der Propagation von HV-Speichern, ist ebenfalls eine Gefährdung, die im Zusammenhang mit ICEV-Bränden nicht relevant war (siehe hierzu Punkt 6.1.3). In der Gesamtschau kann daher festgestellt werden, dass eine Einführung bzw. Umstellung auf alternative Energieformen als Antriebstechnik bei Verkehrsträgern auch das Auftreten von neuen bzw. bis dato unbekannten Risiken und Gefährdungen für Einsatzkräfte von Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen bedeutet. Die Hypothese 1 konnte somit bestätigt werden.

Hypothese 2:

Diese neu auftretenden Gefährdungen können systematisch ermittelt und beurteilt werden, z.B. hinsichtlich Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung.

Um die Hypothese 2 zu testen, wurde das im Arbeitsschutz übliche Verfahren der Einteilung in Gefährdungsfaktoren gemäß der BAuA genutzt, siehe hierzu Punkt 6. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich nahezu alle in der wissenschaftlichen Fachliteratur bisher beschriebenen potenziellen Gefährdungen, die auf Einsatzkräfte einwirken können (siehe hierzu Punkte 6.1 bis 6.5 und Tabelle 6), in dieser Systematik einordnen lassen. Es war ebenso möglich, Eintrittswahrscheinlichkeiten und Risiken gemäß der Methodik nach Thiemecke und Nohl für den Einsatz von Einsatzkräften der Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen abzuleiten, siehe hierzu Punkt 10.2. In der weiteren Folge konnten eine Risikomatrix erstellt und Risikogruppen geclustert werden. Die Gefährdungsbeurteilungen der erarbeiteten Kategorien waren somit systematisch möglich.

Die Hypothese 2 konnte somit bestätigt werden.

Hypothese 3:

Es ist möglich und sinnvoll, Schutzziele und Maßnahmen abzuleiten (z. B. in technischer, organisatorischer bzw. personenbezogener Form), die notwendig sind, um ein sicheres Arbeiten für Einsatzkräfte im Schadensfall bzw. generell zukünftig im Bereich der Energiewende bei Verkehrsträgern zu ermöglichen.

Es war ebenso möglich, globale Schutzziele zu definieren (siehe hierzu Tabelle 11) und, in Anlehnung an die Schutzziele Maßnahmen- bzw. Maßnahmengruppen, gruppiert nach der in Punkt 10.1 beschriebenen STOP-Kategorisierung, zu entwi-

ckeln, siehe hierzu Punkt 11.2. Die beschriebenen Maßnahmen wurden mittels einer Nutzwertanalyse miteinander verglichen, um die Effektivität der Maßnahmen zu bewerten. Es kann davon ausgegangen werden, dass die beschriebenen Maßnahmen, die in Teilen auch bereits in diversen Publikationen beschrieben bzw. angedacht wurden (siehe hierzu Punkt 11), sinnvoll und effizient sind, um ein sicheres Arbeiten der Einsatzkräfte zu ermöglichen.

Die Hypothese 3 konnte somit bestätigt werden.

Hypothese 4:

Es ist zielführend, eine begrenzte Anzahl an Szenarienklassifizierungen zu entwickeln, um darauf basierend standardisierte Handlungsanleitungen für Einsatzkräfte abzuleiten, da die Entscheidungsprozesse im Führungsvorgang aufgrund einer überschaubaren Anzahl an standardisierten Handlungsoptionen das Tätigwerden der Einsatzkräfte effektiver und sicherer werden lässt.

Der Zusammenhang von Entscheidungsfindung, Stress und Verfügbarkeit, Art und Umfang von Informationen wurde im Punkt 9.1 ausführlich beleuchtet. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Reduzierung der psychischen Belastung bei der Entscheidungsfindung nachweislich dazu führt, dass Personen abgewogener und rationaler entscheiden und dabei ihr vollständiges kognitives Potential ausnutzen. Dies führt in der Regel dazu, reflektierte und damit für die Einsatzkräfte sichere Entscheidungen zu fällen. Dazu ist es sinnvoll, die möglichen Handlungsoptionen in Anzahl und Komplexität überschaubar zu halten. Dies reduziert die Induktion von Stress bei zeitkritischen Entscheidungsprozessen.

Insbesondere die gewonnenen Erkenntnisse im Punkt 9.1 zu Hypothese 4 lassen den Schluss zu, dass die für diese Arbeit entwickelten Modelle mit den untergeordneten Szenarien, Risikofaktoren und Kategorien (siehe hierzu Punkt 8.1) deutlich zu zahlreich und zu differenziert sind, um direkt als Handlungshilfe für Einsatzkräfte vor Ort genutzt zu werden. Das war auch nicht die Intention der Klassifizierung. Vielmehr sollte herausgearbeitet werden, inwieweit Gefährdungen bzw. deren Ausprägung bei welchen Einsatzszenarien identifiziert und bewertet werden können.

Für eine schnelle Orientierung bzw. Handlungshilfe sind aus Sicht des Verfassers folgende Aspekte wichtig:

- Art des Schadenereignisses (z. B. Unfall, Brand, Leckage, Kombinationen davon)?
- Art des Energieträgers (z. B. HV-Speicher, Art des gasförmigen Energieträgers, Kombinationen davon)?

- Sind Personen eingeschlossen oder eingeklemmt?
- Besteht eine Verbindung zur Lade- bzw. Tankinfrastruktur?

Diese Basisinformationen können, wenn die Einsatzkräfte über das notwendige Wissen bzw. Einsatzstrategien, eine geeignete Ausstattung und auch entsprechende Informationsmöglichkeiten verfügen, bereits ausreichen, um erste und sichere Entscheidungen hinsichtlich einer erfolgreichen Einsatzabwicklung zu treffen.

Die Hypothese 4 konnte somit bestätigt werden.

Auch wenn zunächst alle vier aufgestellten Hypothesen verifiziert werden konnten, muss festgestellt werden, dass weiterhin offene Fragen bestehen bzw. weiterer Forschungsbedarf identifiziert werden konnte.

So ist es aus Sicht des Verfassers notwendig, die abgeleiteten Maßnahmen anhand von Auswertungen realer Einsatzszenarien bzw. weiteren Versuchsreihen auf ihre Wirksamkeit und Anwendungssicherheit zu prüfen. Insbesondere bei den Maßnahmen mit hohem Gesamtnutzwert, die in der Regel die Hersteller von Fahrzeugen adressieren, ist es notwendig, auch weiterhin Forschung und Entwicklung zu tätigen, um die entsprechenden Realisierungen zügig zu ermöglichen (siehe hierzu auch Punkt 13.3.)

Auch bei der Planung und Gestaltung von unterirdischen Verkehrsanlagen ist es wichtig, die durch alternative Energieträger entstehenden, bis dato nicht berücksichtigten Gefährdungen miteinzubeziehen. Wie solche Maßnahmen wirkungsvoll und wirtschaftlich realisiert werden können, sollte ebenfalls Gegenstand weiterer Forschung sein.

Im Hinblick auf den Gesundheitsschutz von Einsatzkräften, aber auch weiteren Personen wie z. B. Fahrzeuginsassen, Beschäftigte von Bergeunternehmen und HV-Speicher-Herstellern bzw. Recyclingbetrieben, besteht aus Sicht des Verfassers auch noch Forschungsbedarf dahingehend, elektrische Speicher zu entwickeln, die konstruktiv ohne kanzerogene Gefahrstoffe hergestellt und betrieben werden können.

Um mit den Gefährdungen, die durch alternative Energieträger entstehen, sicher umgehen zu können, ist es auch im Bereich der Einsatzkräfte notwendig, weiterhin Forschungsschwerpunkte auf die Themen Information und Kommunikation, Datenübertragung (z. B. an der Einsatzstelle) aber auch Fernerkundung von gefährlichen explosionsfähigen Atmosphären sowie Wissensvermittlung, Training und Vermittlung effektiver Einsatzstrategien an Einsatzkräften zu legen.

Parallel dazu ist es aus Sicht des Verfassers notwendig, die systematische und transparente Analyse von Einsätzen bzw. Geschehnissen mit alternativen Energieträgern international weiter voranzubringen. Eine wissenschaftliche, verurteilungsfreie und objektive Betrachtung von Schadensfällen, inklusive der getätigten Einsatzmaßnahmen und deren Wirkung, kann hilfreich sein, Kenntnisse und Wissen zum sicheren Vorgehen zu erhalten und den Einsatzkräften zur Verfügung zu stellen.

15 Literaturverzeichnis

A. K. Habib (Hg.) (2024): Magdeburger-Köthener Brandschutz und Sicherheitstagung. Unter Mitarbeit von K. Wingerden M. Kluge. Magdeburger-Köthener Brandschutz und Sicherheitstagung. Magdeburg, 14. / 15.03.2024. Otto-von-Guericke-Universität.

ABC Zug München-Land (2025): Roboterhund „Spot“ hilft bei gefährlichen Einsätzen. ABC Zug München-Land.

AGBF Bund (2021): Brandbekämpfung von Kraftfahrzeugen mit elektrischen Antrieben. Unter Mitarbeit von Peter Bachmeier.

Akademie des Deutschen Kraftfahrzeuggewerbes GmbH (TAK) (Hg.) (2020): Arbeitsschutz und Ausstattung für die Wartung und Instandsetzung von Fahrzeugen mit LNG-Antrieb. - Leitfaden für Kfz-Werkstätten -. Zentralverband Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe e. V.

Allianz Risk Consulting North America (2017): Lithium-Ion Batteries. Hg. v. Allianz Global Corporate & Specialty SE.

Amano, Kofi Owusu Ansah; Hahn, Sarah-K.; Tschirschwitz, Rico; Rappsilber, Tim; Krause, Ulrich (2022): An Experimental Investigation of Thermal Runaway and Gas Release of NMC Lithium-Ion Pouch Batteries Depending on the State of Charge Level. In: Batteries 8 (5), S. 41. DOI: 10.3390/batteries8050041.

Andrlik, Christian (2012): Die Risikoanalyse und -bewertung in der Praxis der Gefährdungsbeurteilung von Arbeitsplätzen. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Sicherheitswissenschaften. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Sicherheitstechnik.

Armand, M.; Tarascon, J.-M. (2008): Building better batteries. In: Nature 451 (7179), S. 652–657. DOI: 10.1038/451652a.

Asche, Stefan (2021): Kein heißes Eisen. E-Fahrzeuge brennen nicht öfter als andere – im Gegenteil. Sollte es dennoch passieren, sind die Löscharbeiten nach Expertenansicht einfacher, als vielfach kolportiert wird. In: VDI Nachrichten, 01.10.2021 (39), S. 23.

ASS Auto-Strassenhilfen Schweiz (Hg.) (2021): Leitfaden für das Bergen, Transportieren, Verwahren und Entsorgen von Fahrzeugen mit Elektroantrieb. Unter Mitarbeit von Walter Gisler, René Stettler, Urs Bucheli. Tech. Kommission BTVE.

Aßmann, Leonie; Betsch, Tilmann; Lang, Anna; Lindow, Stefanie (2022): When even the smartest fail to prioritise: overuse of information can decrease decision accuracy. In: Journal of Cognitive Psychology 34 (5), S. 675–690. DOI: 10.1080/20445911.2022.2055560.

Aust, Fabienne; Heinemann, Lena; Holtz, Maik; Hagemann, Vera; Peifer, Corinna (2023): Team Flow Among Firefighters: Associations with Collective Orientation, Teamwork-Related Stressors, and Resources. In: Int J Appl Posit Psychol 8 (2), S. 339–363. DOI: 10.1007/s41042-023-00093-7.

Barilo, Nick (2018): Safety issues associated with the use of alternative fuel tanks: What can the hydrogen community learn from the CNG experience? Hg. v. Hydrogen Safety Panel (HSP).

Bayerisches Staatsministeriums des Innern, für Bau und Verkehr (12.07.2016): Alarmierung im Rettungsdienst, Brand- und Katastrophenschutz in Bayern. -ABek-, vom 29.07.2020. In: BayMBI. 461.

Bergholz, Timm (2015): Lithiumbatterien für stationäre und mobile Anwendungen: Benchmarking und experimentelle Umsetzung. Dissertation. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Fakultät für Maschinenwesen, Forschungszentrum Jülich GmbH Institut für Energie- und Klimaforschung Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3).

Bertau, Sébastien (2016): HyResponse - European Emergency Response Guide. Emergency Response Guide on hydrogen and fuel cell applications for First Responders.

Betsch, Tilmann (2005): Wie beeinflussen Routinen das Entscheidungsverhalten? In: Psychologische Rundschau 56 (4), S. 261–270. DOI: 10.1026/0033-3042.56.4.261.

Betsch, Tilmann; Funke, Joachim; Plessner Henning (Hg.) (2011): Denken – Urteilen, Entscheiden, Problemlösen: Springer. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-12474-7_13.

Betteridge, Steven; Phillips, Lee (2015): Large scale pressurised LNG BLEVE experiments. Shell Research Ltd. Manchester.

Bisschop, Roeland; Willstrand, Ola; Amon, Francine; Rosengren, Max (2019): Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. RISE Report 2019:50. RISE Research Institutes of Sweden AB.

Bisschop, Roeland; Willstrand, Ola; Rosengren, Max (2020): Handling Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Preventing and Recovering from Hazardous Events. In: Fire Technol 56 (6), S. 2671–2694. DOI: 10.1007/s10694-020-01038-1.

Björnstig, Ulf, Lindeman, Erik (2022): Smoke exposure in case of Li-ion battery fire. Important gas components, case descriptions and disposal recommendations. Hg. v. The Swedish Agency for Community Protection and Preparedness (MSB). Knowledge Center for Disaster Medicine/Surgery, Umeå University.

Blum, Andrew; Long, Richard Thomas (2015): Full-scale Fire Tests of Electric Drive Vehicle Batteries. In: SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems 8 (2), S. 565–572. DOI: 10.4271/2015-01-1383.

Blum, Andrew F.; R. Thomas Long Jr. (2016): Hazard Assessment of Lithium Ion Battery Energy Storage Systems. Fire Protection Research Foundation.

BMAS (07.08.1996): Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit. ArbSchG, vom 31.05.2023. Fundstelle: BGBl. I S. 1246.

BMW (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Nationales Reformprogramm 2020. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

Bor Yann Liaw, FuQing Wang, YiMin Wei (2018): Managing Safety Risk by Cell Manufacturers. Hg. v. Energy Storage and Advanced Vehicles Department, Clean Energy and Transportation Division, Idaho National Laboratory. Idaho Falls, USA.

Bottin, F. (2023): BALSAM - Brandverhalten von Lithium-Ionen-Batteriesystemen und Brand-Schutz, Wirkung der Schadgase auf Menschen. Projektbeschreibung. Hg. v. NOW-

GmbH. Online verfügbar unter <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/balsam/>, zuletzt aktualisiert am 02.05.2025.

Braun, Helge (2019): Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030. Hg. v. Klimaschutzkabinett der Bundesregierung.

Brauner, Christoph (2022): Wasserstoff: Gefahren in Tunnel und Tiefgaragen. In: Brandschutz 76 (12), S. 1002–1005.

Brzezińska, Dorota (2019): LPG Cars in a Car Park Environment-How to Make It Safe. In: International journal of environmental research and public health 16 (6). DOI: 10.3390/ijerph16061062.

Brzezińska D.: Car parks ventilation in the case of vehicle hydrogen release. In:, Bd. 11, S. 2086.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hg.) (2021): Handbuch Gefährdungsbeurteilung. Grundlagen und Gefährdungsfaktoren. 1. Aufl. Unter Mitarbeit von Kittelmann, M., Adolph, L., Michel, A., Packroff, R., Schütte, M. & Sommer, S. Dortmund.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2019): Elektromobilität. Brennstoffzelle. Alternative Kraftstoffe – Einsatzmöglichkeiten aus Technologischer Sicht. Arbeitsgruppe 2 Alternative Antriebe und Kraftstoffe für nachhaltige Mobilität. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität. Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2011): Regierungsprogramm Elektromobilität.

Bundesregierung (Hg.) (2019): Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung. Ziele und Maßnahmen für den Ladeinfrastrukturaufbau bis 2030.

Bundesregierung (06.06.2020): Milliardenhilfen beschlossen.

Bundesregierung (Hg.) (2021): Ein neuer Aufbruch für Europa Eine neue Dynamik für Deutschland Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD 19. Legislaturperiode.

Bundestag, Deutscher (2021): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Martin Neumann, Michael Theurer, Grigorios Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/30733 – Brandschutz bei E-Fahrzeugen. Drucksache 19/31601. Hg. v. Deutscher Bundestag. Berlin.

Cimolino U.; Knorr K.-H. (2024): Die Gefahren der Einsatzstelle. [S.I.]: Kohlhammer Verlag.

CTIF International Association of Fire Services (Hg.) (2025a): Ammonia explored as a carbon free automotive fuel - but challenges remain, zuletzt aktualisiert am 31.03.2025.

CTIF International Association of Fire Services (Hg.) (2025b): Two Spanish firefighters died in a parking garage fire - Explosion and smoke inhalation reported to be cause of death, zuletzt aktualisiert am 04.04.2025.

DEKRA Crash Test Center Neumünster (Hg.) (2021): Versuchsdokumentation Murer E-Löschlanze. Unter Mitarbeit von Niels Kröger.

Delaunay, Serge; Cardou, Sébastien (2020): Feuerwehr Einsatzhandbuch-Einsätze an Fahrzeugen. Hg. v. sapeurs-pompiers de la Vienna.

dena Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2019): Bio-LNG – eine erneuerbare und emissionsarme Alternative im Straßengüter- und Schiffsverkehr. Potenziale, Wirtschaftlichkeit und Instrumente. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT) (10.02.2021): DAT Report 2021.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.) (2019): Alternative Antriebe in Deutschland. dena-Monitoringbericht 1/2019.

Deutsche Patent- und Markenamt (DPMA) (19.05.2020): Deutsche Hersteller bei Patentanmeldungen auf Heimatmarkt stark vertreten.

DGUV e. V. (2011): Mustergefährdungsbeurteilung zur Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) in der deutschen Luftrettung. DGUV Information 205-005. Hg. v. DGUV e. V.

DGUV e. V. (2012): "Rettungs- und Löscharbeiten an PKW mit alternativer -Antriebstechnik" (bisher BGI/GUV-I 8664). DGUV Information 205-022. DGUV e. V.

DGUV e. V. (2014): Grundsätze der Prävention. DGUV Regel 100-001. DGUV e. V.

DGUV e. V. (2018): DGUV Regel 105-049 „Feuerwehren“. DGUV e. V.

DGUV e. V. (2019): Leitfaden zur Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung im Feuerwehrdienst. DGUV Information 205-021. DGUV e. V.

DGUV e. V. (2020a): Fachbereiche und Sachgebiete der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung.

DGUV e. V. (2020b): Hinweise zum betrieblichen Brandschutz bei der Lagerung und- Verwendung von Lithium-Ionen-Akkus. FBFHB-018.

DGUV e. V. (2020c): Hygiene und Kontaminationsvermeidung bei der Feuerwehr. DGUV Information 205-035. Hg. v. DGUV e. V.

DGUV e. V. (2020d): Schutzmaßnahmen bei der Benutzung von Plasmaschneidgeräten in der Feuerwehr und den Hilfeleistungsorganisationen. FBFHB-013. Hg. v. DGUV e. V.

DGUV e. V. (2023a): Elektromobilität - aber sicher! FAQ-Liste der AG „Handlungsrahmen Elektromobilität“ der DGUV. Hg. v. DGUV Fachbereich Holz und Metall.

DGUV e. V. (Hg.) (2023b): GESTIS Stoffdatenbankauskunft zu Propan. Institut für Arbeitsschutz - IFA. Online verfügbar unter <https://gestis.dguv.de/data?name=010020>, zuletzt geprüft am 30.12.2023.

DGUV e. V. (2023c): Hinweise für die Brandbekämpfung von Lithium-Ionen -Akkus bei Fahrzeugbränden. FB FHB 0-24.

DGUV e. V. (Hg.) (2024a): Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung für Einsätze bei der Feuerwehr. DGUV Information 205-014.

DGUV e. V. (Hg.) (2024b): GESTIS Stoffdatenbankauskunft zu Fluorwasserstoff. Institut für Arbeitsschutz - IFA. Online verfügbar unter <https://gestis.dguv.de/data?name=520038>, zuletzt geprüft am 31.03.2024.

DGUV e. V. (Hg.) (2024c): GESTIS Stoffdatenbankauskunft zu Methan. Institut für Arbeitsschutz - IFA. Online verfügbar unter <https://gestis.dguv.de/data?name=010000>.

DGUV e. V. (Hg.) (2024d): GESTIS-Stoffdatenbankauskunft zu Wasserstoff. Institut für Arbeitsschutz - IFA, zuletzt aktualisiert am 30.03.2024.

Dhameja, Sandeep (2001): Electric Vehicle Battery Systems: Newnes, Butterworth–Heinemann.

Di Bari, C. (Hg.) (2020): Recent safety focused overall analysis, testing and accident reviews towards safer e-mobility and energy storage. Unter Mitarbeit von A. Lecocq, G. Marlaire, B. Truchot, M. Mazzaro, M. L. Mele, P. Russo. FIVE 2020. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/11573/1545351>.

Dinkov, Ilian; Braun, Jan; Meyer-Hollmann, Mona (2022): Behälter zum Transport von beschädigten Lithium-Ionen-Batterien. Forschungsprojekt zum modularen System zur Filtrierung von Gasen. In: Brandschutz 76 (2), S. 93–97.

DIN-Normenausschusses Feuerwehrwesen (FNFW) (Hg.) (2022): Anforderungen an Brandbegrenzungsdecken für den Einsatz bei Elektrofahrzeugen. Projektantrag.

Dirks, Tammo (2019): Lagerung von elektrisch betriebenen Personenkraftfahrzeugen in Verkaufsstätten und Industriegebäuden. Untersuchung der Notwendigkeit von Anpassungen der bauaufsichtlichen Anforderungen an den Brandschutz". Untersuchung der Notwendigkeit von Anpassungen der bauaufsichtlichen Anforderungen an den Brandschutz. Masterthesis. Otto von Guericke Universität, Magdeburg. Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik.

Dörr; Nora, Dormann; Lydia, Klebsch; Wolfgang, Oleniczak; Annelie (2021): Logistik, Energie und Mobilität 2030. Metastudie im BMWi Technologieprogramm IKT für Elektromobilität. Hg. v. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. Berlin.

Dormann, Lydia; Dr. Kerstin Sann-Ferro; Patrick Heininger; Dr. Jochen Mähliß (2021): Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen. Hg. v. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. Frankfurt a. M.

DVFG (2023): Flüssiggas. Hg. v. Dt. Verband Flüssiggas. Online verfügbar unter <https://www.dvfg.de/>, zuletzt geprüft am 30.12.2023.

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (Hg.): Genehmigungsleitfaden für LNG/LCNG-Tankstellen. Technische, sicherheitsrelevante und genehmigungsrechtliche Grundlagen. Deutschen Energie-Agentur (dena). Bonn.

Edel, Matthias; Jakob Jegal, Stefan Siegemund (2019): Bio-LNG – eine erneuerbare und emissionsarme Alternative im Straßengüter- und Schiffsverkehr. Potenziale, Wirtschaftlichkeit und Instrumente. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

Edwards, Phil J.; Moore, Siobhan; Higgins, Craig (2024): Pedestrian safety on the road to net zero: cross-sectional study of collisions with electric and hybrid-electric cars in Great Britain. In: Journal of epidemiology and community health 78 (8), S. 487–492. DOI: 10.1136/jech-2024-221902.

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK (Hg.) (2020): Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen. Forschungsprojekt AGT 2018/006 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT). Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa).

Enderlein, Heiko; Wagner, Andreas; Spanner-Ulmer, Birgit (2010): Auswirkungen auf die menschliche Arbeit durch e-mobility. TU Chemnitz.

Erbe (2024): Einsätze an Elektrofahrzeugen Herausforderung für Feuerwehren. In: Schadensprisma (1), S. 10–15.

DIN EN ISO 10075-1, 2018-01: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 1: Allgemeine Aspekte und Konzepte und Begriffe.

Essl, C.; Golubkov, A. W.; Fuchs, A. (2020): Comparing Different Thermal Runaway Triggers for Two Automotive Lithium-Ion Battery Cell Types. In: J. Electrochem. Soc. 167 (13), S. 130542. DOI: 10.1149/1945-7111/abbe5a.

Europäische Kommission (Hg.) (2019): Der europäische Grüne Deal. Brüssel.

Europäische Kommission (Hg.) (2020): Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität: Den Verkehr in Europa auf Zukunftskurs bringen. Brüssel.

EV FireSafe research team (Hg.) (2024): Global Electric Vehicle Battery Fires. Online verfügbar unter www.evfiresafe.com.

EvoBus GmbH (Hg.) (2020): Rettungsleitfaden für Mercedes-Benz Omnibusse.

Fabienne Aust (2021): Effects of a team training for firefighters on perceived stress and cortisol levels. University of Lübeck, Department of Psychology, Research Group Work and Health, Oktober 2021.

Feng, Xuning; Ouyang, Minggao; Liu, Xiang; Lu, Languang; Xia, Yong; He, Xiangming (2018): Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. In: Energy Storage Materials 10, S. 246–267. DOI: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.

Feng, Xuning; Ren, Dongsheng; He, Xiangming; Ouyang, Minggao (2020): Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries. In: Joule 4 (4), S. 743–770. DOI: 10.1016/j.joule.2020.02.010.

Feuerwehr-Zeitung, Redaktion BRANDSchutz/Deutsche (2022): Das Feuerwehr-Lehrbuch. Grundlagen - Technik - Einsatz. 8., aktualisierte Auflage. Stuttgart: Kohlhammer Verlag.

Fire Safety Research Institute (FSRI) (2025): Experiments Studying Fire Blanket Effectiveness to Control Electric Vehicle Fires are Completed.

Focus online (2023): Akku-Gefahr nach Monstersturm-Teslas gehen in Florida in Flammen auf.

Forestier, Coralie; Lecocq, Amandine; Zantman, Aurélien; Grugeon, Sylvie; Sannier, Lucas; Marlair, Guy; Laruelle, Stephane (2020): Study of the Role of LiNi 1/3 Mn 1/3 Co 1/3 O 2 /Graphite Li-Ion Pouch Cells Confinement, Electrolyte Composition and Separator Coating on Thermal Runaway and Off-Gas Toxicity. In: J. Electrochem. Soc. 167 (9), S. 90513. DOI: 10.1149/1945-7111/ab829e.

Franke, Johannes (2021): Einsatzszenarien der Feuerwehr mit Fahrzeugen mit alternativen Antrieben bzw. deren Lade- und Tankinfrastruktur. Bachelorthesis. Hochschule Furtwangen.

Fraunhofer-Institut für System-und Innovationsforschung ISI (Hg.) (2020): Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft? Karlsruhe.

Georgiev, Stefan (2021): Brandrisiko Elektroauto. Brandprävention und Brandbekämpfung bei Elektroautos. Hg. v. Kuratorium für Verkehrssicherheit - KfV. Wien.

Ghiji, Mohammadmahdi; Novozhilov, Vasily; Moinuddin, Khalid; Joseph, Paul; Burch, Ian; Suendermann, Brigitta; Gamble, Grant (2020): A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. In: *Energies* 13 (19), S. 5117. DOI: 10.3390/en13195117.

Giern, Sandra (2018): Lithiumbatterien. In: Peter Kurth, Anno Oexle und Martin Faulstich (Hg.): *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 435–449.

Golubkov, Andrey W.; Fuchs, David; Wagner, Julian; Wilsche, Helmar; Stangl, Christoph; Fauler, Gisela et al. (2014): Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. In: *RSC Advances* 4 (7), S. 3633–3642. DOI: 10.1039/C3RA45748F.

Golubkov, Andrey W.; Planteu, René; Krohn, Philipp; Rasch, Bernhard; Brunnsteiner, Bernhard; Thaler, Alexander; Hacker, Viktor (2018): Thermal runaway of large automotive Li-ion batteries. In: *RSC Adv.* 8 (70), S. 40172–40186. DOI: 10.1039/C8RA06458J.

Göwecke, Karsten (2019): Aktuelles aus der Rettung nach Verkehrsunfällen - Vorgehensweise, Standards, Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie. 6. Fachtagung Technische Rettung. Berliner Feuerwehr. Berlin, 19.09.2019.

Göwecke, Karsten (2021): Alternative Fahrzeugantriebe aus Sicht der Gefahrenabwehr im Feuerwehreinsatz. In: *Schadensprisma* (4), S. 4–10.

Hagemann, Vera; Heinemann, Lena; Peifer, Corinna; Aust, Fabienne; Holtz, Maik (2022a): Risky Decision Making Due to Goal Conflicts in Firefighting—Debriefing as a Countermeasure to Enhance Safety Behavior. In: *Safety* 8 (2), S. 21. DOI: 10.3390/safety8020021.

Hagemann, Vera; Heinemann, Lena; Peifer, Corinna; Aust, Fabienne; Holtz, Maik (2022b): Risky Decision Making Due to Goal Conflicts in Firefighting—Debriefing as a Countermeasure to Enhance Safety Behavior. In: *Safety* 8 (2), S. 21. DOI: 10.3390/safety8020021.

Hagemann, Vera; Kluge, Annette; Ritzmann, Sandrina (2012): Flexibility under complexity. In: *Employee Relations* 34 (3), S. 322–338. DOI: 10.1108/01425451211217734.

HASpod (Hg.) (2021): So Far As Is Reasonably Practicable' Meaning Explained For Health And Safety.

Health & Safety Executive (2001): Reducing Risks: Protecting People. HSE's decision making process.

Hebling, C.; M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle, A. Held, M. Jahn, N. Müller: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg. Karlsruhe und Freiburg.

Heinemann, Lena; Aust, Fabienne; Peifer, Corinna; Holtz, Maik; Miller, Christian; Hagemann, Vera (2024): Development and validation of a questionnaire, the REST-Q Fire, to identify teamwork-related resources and stressors in firefighting operations. In: *PloS one* 19 (5), e0304326. DOI: 10.1371/journal.pone.0304326.

Held, Marcel; Tuchschnid, Martin; Zennegg, Markus; Figi, Renato; Schreiner, Claudia; Mellert, Lars Derek et al. (2022): Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion

battery and contamination of infrastructure facility. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 165, S. 112474. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112474.

Hellmann T. (2025): Elektrifizierung von Fahrzeugkomponenten – Folgen für die Rettung. Jahresfachtagung der vfdb e. v. Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. Koblenz, 27.05.2025.

Henriksen, M.; Vaagsaether, K.; Lundberg, J.; Forseth, S.; Bjerketvedt, D. (2019): Explosion characteristics for Li-ion battery electrolytes at elevated temperatures. In: Journal of hazardous materials 371, S. 1–7. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.108.

Henßler S. (2025): E-Auto-Brände: „Sicherheit beginnt im Zellkern“. Hg. v. Elektroautonews. Online verfügbar unter <https://www.elektroauto-news.net/news/eauto-braende-sicherheit-zellkern>, zuletzt aktualisiert am 08.06.2025.

Hill, Davion M. (2017): Testing of Aerosol Fire Extinguishing Agent for Li-ion Battery Fires. DNV GL - Energy.

Hill, Davion M. (2020): McMicken Battery Energy Storage System Event Technical Analysis and Recommendations. Technical support for aps related to McMicken thermal runaway and explosion. Hg. v. Arizona Public Service.

Hormuth J. (2023): Entwicklung und Validierung eines Augmented Reality basierten Rettungsdatenblatts zur Identifikation von Gefährdungen bei Verkehrsunfällen mit Kraftfahrzeugen. Bachelorarbeit. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Lehrstuhl für Arbeitssicherheit.

Hydrogen Safety Panel (Hg.) (2020): Hydrogen Incident Examples. Select Summaries of Hydrogen Incidents from the H2tools.org Lessons Learned Database. United States Department of Energy.

Im Elektroauto-Höllenfeuer. Mythen und Stammtischargumente zu Elektroautobränden (2021). Online verfügbar unter <https://maraba.de/elektromobilitaet/br-nde-von-elektroautos>.

Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge (IBK) (Hg.) (Version 1.0): Einsatzhinweise „Fahrzeuge mit Li-Ionen-Akkumulatoren“. Magdeburg.

International Energy Agency (IEA) (Hg.) (2025): Electric vehicle charging. Global EV Outlook 2025. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-charging>, zuletzt geprüft am 14.07.2025.

Jeevarajan, Judith (2020): Thermal Runaway and Fire Characterization for Lithium-ion Cells and Modules. FIVE 2020. Underwriters Laboratories Inc., 15.12.2020.

Joule, J. P., Thomson, W. (1852): On the thermal effects experienced by air in rushing through small apertures. In: The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 28 (4), S. 481–492.

Kirschke, Lucas (2020): Risiken der Wasserstofftechnologie im Verkehr und der Industrie. Bachelorarbeit. Otto von Guericke Universität, Magdeburg. Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik.

Kong, Lingxi; Li, Chuan; Jiang, Jiuchun; Pecht, Michael (2018): Li-Ion Battery Fire Hazards and Safety Strategies. In: Energies 11 (9), S. 2191. DOI: 10.3390/en11092191.

Kraftfahrtbundesamt (Hg.) (2024): Fahrzeugzulassungen 2024. Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. Flensburg.

Kutschenreuter, Marie; Klüh, Stephan: Fire Safety of Lithium-Ion Traction Batteries.

Landesschule und Technische Einrichtung für Brand- und Katastrophenschutz (LSTE) (Hg.) (2021): Alternative Antriebe für Kraftfahrzeuge. Eine Broschüre für die Feuerwehren Brandenburgs. Eisenhüttenstadt.

Lange, Claus (2022): E-Mobilität: Wirksames Löschen von Fahrzeugbränden ist möglich. In: Brandschutz 76 (2), 103-113.

Larsson, F.; Andersson, P.; Mellander, B.: Are electric vehicles safer than combustion engine vehicles?

Larsson, Fredrik; Andersson, Petra; Blomqvist, Per; Mellander, Bengt-Erik (2017): Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. In: Scientific reports 7 (1), S. 10018. DOI: 10.1038/s41598-017-09784-z.

Larsson, Fredrik; Andersson, Petra; Mellander, Bengt-Erik (2016): Lithium-Ion Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles on the Basis of Experimental Abuse Tests. In: Batteries 2 (2), S. 9. DOI: 10.3390/batteries2020009.

Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P. et al. (2017): Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. In: Nature scientific reports 2017.

Lecocq, Amandine (2012): Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. Unter Mitarbeit von Marie Bertana, Benjamin Truchot, Guy Marlair. 2 International Conference on Fires In Vehicles - FIVE 2012.

Linja-aho, V. (Hg.) (2020): Hybrid and Electric Vehicle Fires in Finland 2015–2019. FIVE 2020.

Liu, Jun; Xu, Ningzhe; Shi, Yangming; Barnett, Timothy; Jones, Steven (2023): Are first responders prepared for electric vehicle fires? A national survey. In: Accident; analysis and prevention 179, S. 106903. DOI: 10.1016/j.aap.2022.106903.

Liu, M. (2025): China sets world's strictest EV battery standard: "No Fire, No Explosion" rule effective July 2026. updated regulation GB38031-2025 "Safety Requirements for Power Batteries of Electric Vehicles". In: CarNewsChina 2025, 17.04.2025. Online verfügbar unter <https://carnewschina.com/2025/04/17/china-bans-ev-battery-fires-and-explosions-with-groundbreaking-safety-standard-starting-july-2026/>, zuletzt geprüft am 02.05.2025.

Lönnermark, Anders; Ingason, Haukur (Hg.) (5-6, 2016): Proceedings from 4th International Conference on Fires in Vehicles. FIVE 2016. FIVE 2016 - Fourth International Conference on Fire in Vehicles. Baltimore, USA, 5-6, 2016. SP Technical Research Institute of Sweden.

Lönnermark, Anders; Ingason, Haukur (Hg.) (2018): Proceedings from 5th International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2018. Unter Mitarbeit von Haukur Ingason Anders Lönnermark. FIVE 2018. Borås, Sweden, 3-4.10.2018. RISE Research Institutes of Sweden AB.

Loschinsky, Bianca (2020): Ablöschen im Wassercontainer. Professor Jochen Zehfuß zum Brandrisiko von Elektrofahrzeugen. Hg. v. Magazin Forschung. TU Braunschweig.

Müller, Adrian; Viktor Haefeli, Urs Bucheli, Bernward Limacher (2021): Leitfaden für das Bergen, Transportieren, Verwahren und Entsorgen von Fahrzeugen mit Elektroantrieb. Hg. v. ASS Auto-Strassenhilfen Schweiz.

Nagels, Miriam; Winter, Alina; Schmidt, Jasmina; Peperhove, Roman; Gerhold, Lars; Mundt, Alexander et al. (2021): Von Fachlicher Risikoanalyse zu Politischer Risikobewertung: Die Vermittlung von Risikoanalysen im Bevölkerungsschutz in die Bundespolitik. Schriftenreihe des Forschungsforum Öffentliche Sicherheit. AG Interdisziplinäre Sicherheitsforschung, Forschungsforum Öffentliche Sicherheit, Freie Universität Berlin (29).

National Fire Protection Association (Hg.) (2013a): Electric/Hybrid Vehicle Safety Training for Emergency Responders. Unter Mitarbeit von Andrew Klock.

National Fire Protection Association (2013b): Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicle Battery Hazards. Unter Mitarbeit von R. Thomas Long Jr., Andrew F. Blum, Thomas J. Bress, Benjamin R.T. Cotts.

National Transportation Safety Board (2020): Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles. Safety Report NTSB/SR-20/01. Washington, DC.

Neske, Michael (2022): Evaluierung von technischen Verfahren zur Löschmitteleinbringung in Hochvoltspeicher. Untersuchungen zum einsatztaktischen Mehrwert gegenüber anderen Löschtechniken und -taktiken. Forschungsbericht Nr. 210. Unter Mitarbeit von Julia Kaufmann, Daniel Butscher und Christoph Vogel. Hg. v. Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge. Heyrothsberge.

Nohl, Thiemecke (1988): Systematik zur Durchführung von Gefährdungsanalysen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz Fb Nr. 536 und Fb Nr. 542. Hg. v. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund.

Österreichischer Bundesfeuerwehrverband (Hg.) (2020): Einsatz mit alternativ angetriebenen Fahrzeugen und deren Peripherie. Info E-20. Unter Mitarbeit von Richard Berger. Sachgebiet 5.1 – Brand- & technischer Einsatz Sachgebiet 4.6 – Gefährliche Stoffe.

Ouvrier, Robert Leon (2014): Gefahren im Umgang mit Lithium- Batterien aus brandschutztechnischer Sicht. Bachelorarbeit im Studiengang Gefahrenabwehr/Hazard Control. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.

Per Ola Malmquist (2022): Battery fires, knowledge for Fire Brigades.

Philipp Kinne (2024): Feuerwehr rückt zu Brand bei Wasserstoff-Tankstelle in Gersthofen aus. In: Augsburger Allgemeine, 25.06.2024.

Pitzke, Katrin (2021a): IFA-Bericht: RiskBatt- Brandbekämpfung bei Lithium-Ionen Batterien Technische Universität Clausthal, 21.01.2021.

Pitzke, Katrin (2021b): IFA-Bericht: Analyse der Wasserprobe aus dem Einsatz der Feuerwehr Denkendorf „Brand eines Hybridfahrzeugs“ am 03.06.2021, 03.06.2021.

Projektkonsortium RECOVER-E (Hg.) (2023): RECOVER-E. Gesamtprozess für den sicheren Umgang mit verunfallten batterieelektrischen Fahrzeugen. Vorau.

Ramsde; Roue; Mo-Ajok; Langerak; Watkins; Peeters (2015): Rahmenplan Flüssigerdgas für Rhein - Main - Donau. Nachgeordnete Maßnahme 2.4 Technische Erkenntnisse, Sicherheit und Risikobewertung. Hg. v. Feuerwehr Rotterdam Falck Risc. Rotterdam.

Rappsilber, Tim; Yusfi, Nawar; Krüger, Simone; Hahn, Sarah-Katharina; Fellingner, Tim-Patrick; Krug von Nidda, Jonas; Tschirschwitz, Rico (2023): Meta-analysis of heat release and smoke gas emission during thermal runaway of lithium-ion batteries. In: Journal of Energy Storage 60, S. 106579. DOI: 10.1016/j.est.2022.106579.

Reschke, Albrecht (2021): Vortrag / Sachstand Brandbekämpfung im Zuge der E-Mobilität, 24.06.2021.

Rosmuller, N.; Lepelaar, S.; van der Staak, E. (2020): Public Safety related to fast charging zero emission buses in public space.

Rylander, Robert (2021): LASH-FIRE. Legislative Assessment for Safety Hazard of Fire and Innovations in Ro-ro ship Environment. D08.1 – Definition and parametrization of critical fire hazards, classification of cargoes, transport units, engines, fuels and vessels and identification methodologies. Hg. v. The LASH FIRE Consortium.

Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2021): Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse. Berlin.

Sallis, Geoff; Di Catherwood; Edgar, Graham K.; Baker, Steven; Brookes, David (2022): Situation awareness and habitual or resting bias in high-pressure fire-incident training command decisions. In: Fire Safety Journal 128, S. 103539. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103539.

Schelb, Dietmar; Jordan, T. (2020): Besonderheiten und Risiken bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen. Forschungsbericht 159. Hg. v. Forschungsstelle für Brandschutztechnik am KIT. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Schmid, Heinz (2013): Elektromobilität - aber sicher! In: Sicherheitsingenieur (1), S. 25–31.

Scholzen, Georg (2023): Brandschutz für eBus-Depots. In: Schadensprisma (3), S. 5–11.

Schulte-Brader, Daniela (2022): Brände mit Lithiumbatterien_ Wo bleiben die Brandwände. Gefahrgut-Online.

Schwank, Tobias (2022): Analyse der Materialproben nach Abuse Test EST TU Clausthal, 2022.

Schwindl, Bianca (2021): Brandschutz: e-Mobilität – ein ganz heißes Eisen? In: Der Facility Manager (4).

Shell Nederland Verkoopmaatschappij B.V. (Hg.) (2016): Sicherheitsdatenblatt Shell LNG 3.

Silvia Feist (08.08.2018): Kopf oder Herz? Was hilft mir beim Entscheiden? Interview mit Tilmann Betsch. EMOTION.

Solis, T. (2023): Nutzwertanalyse – Komplexe Entscheidungen rational treffen. Hg. v. Scribbr, zuletzt geprüft am 28.04.2025.

Staatliche Feuerweherschule Würzburg (Hg.) (1999): FwDV 100 - Führung und Leitung im Einsatz. Führungssystem. Würzburg.

Staatliche Feuerweherschule Würzburg (Hg.) (2023): Führungsvorgang. Anlage zum Merkblatt 5.005 „Taktikschema“. Staatliche Feuerweherschule Würzburg. Würzburg.

Stanzel, Anna (2020): Brände von E-Pkw in Garagen. Vergleichende Analysen in Bezug auf das Gefährdungspotential für die Feuerwehren bei der Brandbekämpfung. Master-These. Zentrum für Infrastrukturelle Sicherheit, Donau-Universität Krems.

Statista GmbH (Hg.) (2023): Anzahl der Erdgastankstellen in Deutschland von 2001 bis 2022.

Steller, Stefanie (2021): Unfallhilfe & Bergen bei LNG-Fahrzeugen. Antworten auf häufig gestellte Fragen / FAQ (Frequently Asked Questions). Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

Sturk, David; Hoffmann, Lars; Ahlberg Tidblad, Annika (2015): Fire Tests on E-vehicle Battery Cells and Packs. In: Traffic injury prevention 16 Suppl 1, S159-64. DOI: 10.1080/15389588.2015.1015117.

Sturm, Peter; Fößleitner, Patrik; Fruhwirt, Daniel; Galler, Robert; Wenighofer, Robert; Heindl, Simon Franz et al. (2022): Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. In: Fire Safety Journal 134, S. 103695. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103695.

Sturm, Peter; Fößleitner, Patrik; Fruhwirt, Daniel; Schirmer, Andrea; Reinwald, Bernhard; Kühbacher, Manuel et al. (2020): Brandversuch mit E-Fahrzeugen in Tunnelanlagen. In: Berg Huettenmaenn Monatsh 165 (12), S. 651–657. DOI: 10.1007/s00501-020-01054-2.

Sun, Ke; Li, Zhiyong (2021): Development of emergency response strategies for typical accidents of hydrogen fuel cell electric vehicles. In: International Journal of Hydrogen Energy 46 (75), S. 37679–37696. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.130.

Sun, Peiyi; Bisschop, Roeland; Niu, Huichang; Huang, Xinyan (2020): A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. In: Fire Technol 56 (4), S. 1361–1410. DOI: 10.1007/s10694-019-00944-3.

Szmytko, Ewelina; Brzezińska, Dorota; Machnowski, Waldemar; Kokot, Szymon (2022): Firefighters' Clothing Contamination in Fires of Electric Vehicle Batteries and Photovoltaic Modules-Literature Review and Pilot Tests Results. In: International journal of environmental research and public health 19 (19). DOI: 10.3390/ijerph191912442.

The Swedish Agency for Community Protection and Preparedness (MSB) (Hg.) (2024): Rescue operation where lithium ion batteries are present (MSB2371).

Thielmann, Axel (2018): Energiespeicher-Monitoring 2018. Leitmarkt- und Leitanbieterstudie: Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Karlsruhe.

Thomas, James (2018): Consequence Analysis of Li-Ion Battery Thermal Runaway Events with Chemical Equilibrium Analyses. NASA Aerospace Battery Workshop. NASA. Huntsville, Alabama, USA, 27.11.2018.

Thüringer Ministerium für Inneres und Kommunales (Hg.) (2020): Handlungsempfehlung für Rettungskräfte bei Einsätzen mit Elektrofahrzeugen.

Tschirschwitz, Rico; Bernardy, Christopher; Wagner, Patrick; Rappsilber, Tim; Liebner, Christian; Hahn, Sarah-K; Krause, Ulrich (2023): Harmful effects of lithium-ion battery thermal runaway: scale-up tests from cell to second-life modules. In: RSC Advances 13 (30), S. 20761–20779. DOI: 10.1039/d3ra02881j.

van Veen, Niels; Koppen, Arjen: Emergency responses in smoke from Li-ion batteries. In: FIVE 2020.

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (Hg.) (2023): Logistik, Energie und Mobilität 2030. Metastudie im BMWi Technologieprogramm IKT für Elektromobilität. Frankfurt am Main.

Verband der deutschen Automobilindustrie e.V., Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller e.V. (Hg.) (2022): Technische Quarantäneflächen für beschädigte Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien. Unter Mitarbeit von Juergen Peitz.

Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. (2012): Einsätze an Kraftfahrzeugen mit alternativen Antriebsarten und -kraftstoffen. Merkblatt 05-01.

Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. (2020): Technische – medizinische Rettung nach Verkehrsunfällen. Merkblatt 06/01.

Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. (Hg.) (2021a): Gasfreisetzung bei LIB Bränden. 67. Jahresfachtagung 2021. vfdb.

Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. (Hg.) (2021b): Unfallhilfe & Bergen bei LNG-Fahrzeugen. Antworten auf häufig gestellte Fragen. RL 06/08. Münster.

Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. (2022): Umfrage zur Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien im Projekt SEE-2L.

Vollmacher, Kurt (2018): Verkehrsunfall LKW mit LNG-Antrieb. CTIF Comission for Extrication & New Technology.

Vollmacher, Kurt (2021): Vorschläge zur Verbesserung der Sicherheit für Einsatzkräfte - Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge.

Vollmacher und Esbroeck (2018): Lehren aus einem Unfall mit einem LNG-Lkw. Hg. v. CTIF International Association of Fire Services.

Wang, Aiping; Kadam, Sanket; Li, Hong; Shi, Siqi; Qi, Yue (2018): Review on modeling of the anode solid electrolyte interphase (SEI) for lithium-ion batteries. In: npj Comput Mater 4 (1). DOI: 10.1038/s41524-018-0064-0.

Weewer R., Rosmuller N., Molenaar J.: The Dutch procedure for the fire service response to electrical vehicle accidents and fires by the fire service. In: FIVE 2020.

Willstrand, Ola; Bisschop, Roeland; Blomqvist, Per; Temple, Alastair; Anderson, Johan (2020): Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles.

Wöhl K., Schweiger H-G., Nebel Ch. (2020): Umgang mit verunfallten Elektrofahrzeugen. In: Leitstelle (3), S. 12–14.

Wolbers et al (2015): Maßnahmen der Feuerwehr bei Vorfällen mit LNG. Hg. v. Feuerwehrakademie Arnheim.

Zangemeister, Christof (1970): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projekialternativen. 5. Auflage 2014 (erweitert). Winnemark: Zangemeister & Partner.

16 Danksagung

Ich bedanke mich sehr herzlich bei:

Meinem Bruder, Herrn Dipl.-Ing. Marc Pelzl, für die wohlwollende Begleitung meiner Promotion von Beginn an, die Unterstützung, ein immer offenes Ohr und das hartnäckige Finden von Tippfehlern!

Meinem akademischen Betreuer, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Roland Goertz für seine Geduld, die konstruktive Begleitung, die wertvollen und angenehmen Diskussionen, den wissenschaftlichen Austausch und die Hilfe beim Lösen so mancher Schwierigkeiten!

Meinen Kollegen, Herrn Dr. Dirk Taeger, Herrn Dr. Stephan Koslitz und Herrn Dr. Eike Marek für die moralische Unterstützung und den steten Ansporn!

Mein herzlicher Dank gilt den Mitgliedern der Prüfungskommission

- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fabian Brännström (Vorsitzender),
- Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Roland Goertz (Erstgutachter),
- Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause, Otto von Guericke Universität Magdeburg (Zweitgutachter) und
- apl. Prof. Dr. rer. pol. Ralf Pieper (Beisitzer)

für die faire und objektive Bewertung bei meiner Disputation am 06. Mai 2026.

Ich widme diese Arbeit meinen Eltern Christine und Alfred Pelzl.

17 Anhang

Gefährdungsbeurteilung der definierten Einsatzszenarien (Punkt 10.2)

Übersicht: Eintrittswahrscheinlichkeiten

(W)	Eintrittswahrscheinlichkeit
0	Nie (bei 0% der Einsätze)
1	Ausnahmsweise (bei weniger als 10% der Einsätze)
2	Gelegentlich (bei >10 % - < 25 % der Einsätze)
3	Häufig (bei > 25 % - < 50 % der Einsätze)
4	Sehr häufig (bei > 50% - 100% der Einsätze)

Übersicht: Schweregrad der Auswirkung

Auswirkung (A)	Schweregrad (Auswirkung der Folgen)	
0	keine Auswirkung	--
1	geringe Auswirkung (reversibel)	z. B. – leichte Prellung, – Abschürfung, oberflächliche Schnittwunde – kleinflächige (Kälte-)Verbrennung 1. Grades – reversibler Erschöpfungszustand.
2	mäßige Auswirkung (reversibel)	z. B. – Schnittwunde, die einer ärztlichen Behandlung bedarf, – Knochenbruch, – Bänderriss, – (Kälte-)Verbrennung 2. Grades, – lokaler elektrischer Schlag, – leichte Rauch- oder Ventinggasintoxikation, – Kontamination mit Gefahrstoffen, – reversible Kreislaufstörung bzw. Gehörstörung, – reversible psychische Belastung.
4	schwerwiegende Auswirkung (möglicherweise irreversibel)	z. B. – Blutung / Weichteilschaden / chirurgisches Trauma, – Schwere Rauch- oder Ventinggasintoxikation, – Einwirkungen von Explosionen, – gefährliche elektrische Körperdurchströmung, – akute Herz-Kreislaufkrankung, – großflächige (Kälte-) Verbrennungen 2. oder 3. Grades, – irreversible Gehörstörung, – Kontamination mit krebserzeugenden, mutagenen oder reproduktionstoxischen Gefahrstoffen, – psychisch-traumatische Belastungsstörung.
8	extreme Auswirkung (irreversibel)	Tod

Risikomatrix

		Auswirkung				
		0	1	2	4	8
Wahrscheinlichkeit	0	0	0	0	0	0
	1	0	1	2	4	8
	2	0	2	4	8	16
	3	0	3	6	12	24
	4	0	4	8	16	32
Risiko (R) = Eintrittswahrscheinlichkeit (W) x Auswirkung (A)						

Risikogruppen

Gruppe	Risiko	Handlungsbedarf
16 - 32	Extrem	Zwingend
8-15	Sehr groß	Sehr dringend
3-7	Groß	Dringend
1-2	Mäßig	Gering
0	Akzeptabel	Keiner

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.1.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV-Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.1.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV-Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.1.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	4	4	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	1	8	8*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumlufttechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	1	4	4	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen frühzeitig zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.1.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese sicher vor Ort durch die Einsatzkräfte spannungsfrei geschaltet werden können bzw. dann kein Erdschluss mehr besteht (T). Hochvoltssystem / Ladeinfrastruktur durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem bzw. die Ladeinfrastruktur deaktiviert werden kann (O). EK unterweisen, welche zusätzlichen Gefahren durch die mit dem BEV verbundene Ladeinfrastruktur vorhanden sein können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Überladen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese einen kritischen Zustand (z. B. Unfall, Beschädigung, Einwirkung von Hitze und Feuer von außen) erkennt und sich spannungsfrei schaltet, um dadurch z. B. sekundäre Brandereignisse zu verhindern (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	1	8	8*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Überladen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese einen kritischen Zustand (z. B. Unfall, Beschädigung, Einwirkung von Hitze und Feuer von außen) erkennt und sich spannungsfrei schaltet, um dadurch z. B. sekundäre Brandereignisse zu verhindern (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumlufttechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	1	4	4	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Überladen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen frühzeitig zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.2.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.2.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumlufttechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.2.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	4	4	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	1	8	8*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumlufttechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	1	4	4	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen frühzeitig zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV-Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.2.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese sicher vor Ort durch die Einsatzkräfte spannungsfrei geschaltet werden können bzw. dann kein Erdschluss mehr besteht (T). Hochvoltssystem / Ladeinfrastruktur durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem bzw. die Ladeinfrastruktur deaktiviert werden kann (O). EK unterweisen, welche zusätzlichen Gefahren durch die mit dem BEV verbundene Ladeinfrastruktur vorhanden sein können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Überladen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese einen kritischen Zustand (z. B. Unfall, Beschädigung, Einwirkung von Hitze und Feuer von außen) erkennt und sich spannungsfrei schaltet, um dadurch z. B. sekundäre Brandereignisse zu verhindern (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	1	8	8*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Überladen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese einen kritischen Zustand (z. B. Unfall, Beschädigung, Einwirkung von Hitze und Feuer von außen) erkennt und sich spannungsfrei schaltet, um dadurch z. B. sekundäre Brandereignisse zu verhindern (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	1	4	4	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Überladen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen frühzeitig zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.3.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	4	4	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.3.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	4	4	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.3.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	4	4	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	1	4	4	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	1	8	8*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	1	4	4	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen frühzeitig zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 1 „Verkehrsunfall mit BEV“, K 1.3.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	4	4	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese sicher vor Ort durch die Einsatzkräfte spannungsfrei geschaltet werden können bzw. dann kein Erdschluss mehr besteht (T). Hochvoltssystem / Ladeinfrastruktur durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem bzw. die Ladeinfrastruktur deaktiviert werden kann (O). EK unterweisen, welche zusätzlichen Gefahren durch die mit dem BEV verbundene Ladeinfrastruktur vorhanden sein können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Überladen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese einen kritischen Zustand (z. B. Unfall, Beschädigung, Einwirkung von Hitze und Feuer von außen) erkennt und sich spannungsfrei schaltet, um dadurch z. B. sekundäre Brandereignisse zu verhindern (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	1	8	8*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese einen kritischen Zustand (z. B. Unfall, Beschädigung, Einwirkung von Hitze und Feuer von außen) erkennt und sich spannungsfrei schaltet, um dadurch z. B. sekundäre Brandereignisse zu verhindern (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	1	4	4	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Überladen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen frühzeitig zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV-Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.1.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Bränden nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Fahrzeugbränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Fahrzeugbränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Fahrzeugbränden nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.1.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei thermischer Beaufschlagung von außen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brand nicht zu einem Brandereignis im LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundärem Brand nicht zu einem Brandereignis im LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brand nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundärem Brand nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.1.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltsystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltsystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem Brand nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen frühzeitig zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.1.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltsystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese sicher vor Ort durch die Einsatzkräfte spannungsfrei geschaltet werden können bzw. dann kein Erdschluss mehr besteht (T). Hochvoltsystem / Ladeinfrastruktur durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltsystem bzw. die Ladeinfrastruktur deaktiviert werden kann (O). EK unterweisen, welche zusätzlichen Gefahren durch die mit dem BEV verbundene Ladeinfrastruktur vorhanden sein können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brandereignis nicht zu einem Überladen kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese einen kritischen Zustand (z. B. Unfall, Beschädigung, Einwirkung von Hitze und Feuer von außen) erkennt und sich spannungsfrei schaltet, um dadurch z. B. sekundäre Brandereignisse zu verhindern (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brandereignis nicht zu einem Überladen kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese einen kritischen Zustand (z. B. Unfall, Beschädigung, Einwirkung von Hitze und Feuer von außen) erkennt und sich spannungsfrei schaltet, um dadurch z. B. sekundäre Brandereignisse zu verhindern (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumlufttechnische Anlagen) (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brandereignis nicht zu einem Überladen kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Überladen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen frühzeitig zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV-Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.2.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Bränden nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Fahrzeugbränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Fahrzeugbränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Fahrzeugbränden nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.2.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müssen vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltsystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei thermischer Beaufschlagung von außen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brand nicht zu einem Brandereignis im LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundärem Brand nicht zu einem Brandereignis im LIB kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brand nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundärem Brand nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV-Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.2.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem Brand nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen frühzeitig zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.2.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese sicher vor Ort durch die Einsatzkräfte spannungsfrei geschaltet werden können bzw. dann kein Erdschluss mehr besteht (T). Hochvoltssystem / Ladeinfrastruktur durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem bzw. die Ladeinfrastruktur deaktiviert werden kann (O). EK unterweisen, welche zusätzlichen Gefahren durch die mit dem BEV verbundene Ladeinfrastruktur vorhanden sein können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brandereignis nicht zu einem Überladen kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese einen kritischen Zustand (z. B. Unfall, Beschädigung, Einwirkung von Hitze und Feuer von außen) erkennt und sich spannungsfrei schaltet, um dadurch z. B. sekundäre Brandereignisse zu verhindern (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brandereignis nicht zu einem Überladen kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Störungen in der Ladeinfrastruktur nicht zum Überladen von LIB kommen kann (T). Ladeinfrastruktur technisch so herstellen, dass diese einen kritischen Zustand (z. B. Unfall, Beschädigung, Einwirkung von Hitze und Feuer von außen) erkennt und sich spannungsfrei schaltet, um dadurch z. B. sekundäre Brandereignisse zu verhindern (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brandereignis nicht zu einem Überladen kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Überladen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen frühzeitig zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV-Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.3.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	4	4	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltsystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltsystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Brandereignissen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Brandereignissen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Brandereignissen nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei Brandereignissen nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV-Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.3.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	4	4	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltsystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltsystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei thermischer Beaufschlagung von außen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brand nicht zu einem Brandereignis im LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundärem Brand nicht zu einem Brandereignis im LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brand nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundärem Brand nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.3.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	4	4	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei thermischer Beaufschlagung von außen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brand nicht zu einem Brandereignis im LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundärem Brand nicht zu einem Brandereignis im LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brand nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundärem Brand nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 2 „BEV-Brand“, K 2.3.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	2	2	4	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher unterbunden werden kann (T). BEV durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). EK unterweisen, wie BEV deaktiviert werden können (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	2	4	8	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	BEV technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Brand das Hochvoltssystem deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Hochvoltssystem durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das Hochvoltssystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei thermischer Beaufschlagung von außen nicht zum Venting von Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen um Expositionen mit Gefahrstoffen (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brand nicht zu einem Brandereignis im LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundären Bränden nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundärem Brand nicht zu einem Brandereignis im LIB kommen kann (T). Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei einem sekundären Brand nicht zum Venting von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden	Hochvoltspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei sekundärem Brand nicht zum Auftreten von Strahlflammen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um das Auftreten von Strahlflammen bei Venting-Ereignissen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitzeschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	0	0	0	--	--
Arbeitsumgebung	0	0	0	--	--
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des BEV Informationen zum (kritischen) Zustand bzw. einer bevorstehenden Propagation der LIB zu erhalten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.1.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	4	4	16	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	4	4	16	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH ₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampfvolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.1.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	2	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen bzw. tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern und/oder Freisetzen von tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.1.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	2	8	16*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH ₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.1.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass der Tankvorgang durch EK standardisiert von außen unterbrochen werden kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle (z. B. Brandereignis) detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	2	8	16*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Be-flammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Ein-satzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwir-kungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruck-einrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Über-druckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtun-gen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein er-heblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Be-reich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasen-übergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf-wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch ge-eignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereit-stellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.2.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	4	4	16	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	4	4	16	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH ₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampfvolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.2.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	2	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen bzw. tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern und/oder Freisetzen von tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.2.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	2	8	16*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH ₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.2.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass der Tankvorgang durch EK standardisiert von außen unterbrochen werden kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle (z. B. Brandereignis) detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	2	8	16*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumlufttechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.3.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH ₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampfvolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.3.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	2	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen bzw. tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern und/oder Freisetzen von tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.3.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	2	8	16*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumlufttechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH ₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 3 „Verkehrsunfall mit gasbetriebenem Fahrzeug“, K 3.3.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	1	4	4	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass der Tankvorgang durch EK standardisiert von außen unterbrochen werden kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle (z. B. Brandereignis) detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	2	8	16*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.1.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	4	4	16	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	4	4	16	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schalleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.1.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen bzw. tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern und/oder Freisetzen von tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.1.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH ₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.1.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen nicht zum Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle (z. B. Brände) detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen nicht zum Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass der Tankvorgang durch EK standardisiert von außen unterbrochen werden kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle (z. B. Brandereignis) detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	2	8	16*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumlufttechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.2.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	4	4	16	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	4	4	16	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH ₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampfvolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.2.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen bzw. tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern und/oder Freisetzen von tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.2.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH ₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.2.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	3	4	12	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen nicht zum Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle (z. B. Brände) detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen nicht zum Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass der Tankvorgang durch EK standardisiert von außen unterbrochen werden kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle (z. B. Brandereignis) detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	2	8	16*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumlufttechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.3.1 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH ₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampfvolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.3.2 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr bei Venting-Ereignissen in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	3	4	12	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen bzw. tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern und/oder Freisetzen von tiefkalt-verflüssigten Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.3.3 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	3	4	12	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumluftechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH ₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampfvolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Physisch	0	0	0	--	--
Psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T). Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).

Gefährdungsbeurteilung Modell 4 „Brand eines gasbetriebenen Fahrzeugs“, K 4.3.4 inkl. (*)

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
Mechanisch	1	2	2	EK müssen vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	Fahrzeuge technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das unbeabsichtigte in-Bewegung-setzen nicht möglich ist oder durch die Einsatzkräfte sicher unterbunden werden kann (z. B. durch das Unterbrechen der Zündung den Antrieb deaktivieren) (T). EK unterweisen, wie Fahrzeuge durch geeignete Sicherungsmaßnahmen (z. B. unterbauen, abstützen) so fixieren werden, dass ein unkontrolliertes Bewegen nicht zur Gefährdung der EK führt (T). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von mechanischen Belastungen zu minimieren (P).
Elektrisch	1	2	2	EK müsse vor elektrischen Körperdurchströmungen geschützt werden.	Fahrzeug technisch so herstellen, dass nach einem detektierten Unfall das elektrische Bordsystem weitgehend deaktiviert oder durch die Einsatzkräfte von außen sicher abgeschaltet bzw. der Betriebszustand erkannt werden kann (T). Elektrisches System durch geeignete Maßnahmen (z.B. Abschirmen, abdecken) so abschirmen, dass es nicht zu Berührungen durch EK kommen kann (T). EK unterweisen, wie das elektrische Bordsystem deaktiviert werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA, um die Einwirkung von elektrischer Spannung auf die EK zu minimieren (P).
Chemisch	2	4	8	Die Kontamination / Exposition von EK durch Gefahrstoffe muss vermieden werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen nicht zum Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle (z. B. Brände) detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen nicht zum Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass der Tankvorgang durch EK standardisiert von außen unterbrochen werden kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der Freisetzung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um die chemische Gefährdung bei der unkontrollierten Verbrennung gasförmiger Energieträger zu erkennen und einzuschätzen (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P). Etablieren von Einsatzhygienemaßnahmen, um Expositionen mit Gefahrstoffen zu minimieren (P).
Brand/Explosion	2	4	8	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren gasförmigen Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass Zwischenfälle (z. B. Brandereignis) detektiert und der Tankvorgang automatisch unterbrochen wird (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Taktik) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Brand/Explosion im umschlossenen Bereich	3	8	24*	EK müssen vor den Auswirkungen von Bränden und Explosionen im umschlossenen Bereich geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Brandereignis kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Freisetzen von brennbaren Gefahrstoffen kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Umschlossene bauliche Verkehrsanlagen so ausführen, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphären frühzeitig erkannt und durch technische Maßnahmen beseitigt werden (z. B. raumlufttechnische Anlagen) (T). Vorhalten von geeigneten Belüftungsgeräten, um freiwerdende gasförmige Energieträger von den EK fernzuhalten (T). EK unterweisen, um die Brand- und Explosionsgefahr beim Freiwerden gasförmiger Energieträger in umschlossenen Bereichen zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. geeignete Taktik, Gasmessen, Wahl des Löschmittels) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA) um die Einwirkungen durch Brand/Explosion zu minimieren (P).
Biologisch	0	0	0	--	--
Thermisch	2	4	8	EK müssen vor thermischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zu einem Freiwerden von kalten / tiefkalt-verflüssigten Energieträgern kommen kann (T). Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass es auch bei schweren Unfällen nicht zum Auftreten von Strahlflammen durch gasförmige Energieträger kommen kann (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Gasspeicher technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Tankinfrastruktur technisch so gestalten, dass es auch beim Beflammen / Unterfeuern von außen nicht zu einem Behälterversagen kommen kann (T). Anpassung der Einsatztaktik bei der technischen Rettung, um Einsatzkräfte vor Strahlflammen zu schützen (T/O). EK unterweisen, um das potenzielle Auftreten von Strahlflammen beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern zu erkennen und einzuschätzen (O). EK unterweisen, um geeignete Einsatzoptionen (z. B. Gasmessen, Wahl des Löschmittels, Abstände) zu kennen und anzuwenden (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physikalisch	2	2	4	EK müssen vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden.	Gasspeicher technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). Tankinfrastrukturen technisch so gestalten, dass beim Freiwerden von gasförmigen Energieträgern (z.B. beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen) kein schädlicher Lärm entsteht (T). EK unterweisen, dass beim Ansprechen von Überdruckeinrichtungen aber auch bei spontanem Versagen von Gasspeichern ein erheblicher Schallleistungspegel erzeugt werden kann (O). Tragen von geeigneter PSA um physikalischer Einwirkungen (Lärm) zu minimieren (O).
Arbeitsumgebung	1	4	4	EK müssen vor Gefährdungen, die durch die Arbeitsumgebungen entstehen können, geschützt werden.	EK unterweisen, dass beim Freiwerden von LNG bzw. LH₂ im Bereich von Gewässern / Wasseroberflächen sehr schnelle Phasenübergänge und eine spontane Entzündung der dabei entstehenden Dampf Wolken auftreten können (O). Tragen von geeigneter PSA (z. B. Atemschutz, BBK-PSA, Hitze bzw. Kälteschutz) um thermische Einwirkungen zu minimieren (P).
Physisch	0	0	0	--	--
psychisch	3	1	3	Psychische Belastungen sind durch geeignet Maßnahmen zu minimieren.	Einheitliche und verständliche Rettungsdatenblätter für EK bereitstellen und online verfügbar machen (T).

Gefährdung	Risiko			Schutzziel	Maßnahme(n)
	W	A	R		
					Möglichkeit schaffen, diese auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs zu erhalten (T). Möglichkeit schaffen, auch vor Ort ohne Breitbandverbindung direkt aus dem Bordsystem des Fahrzeugs Informationen zum (kritischen) Zustand z. B. des Gasspeichers zu erhalten (T). EK die technischen Möglichkeiten zur Verfügung stellen, Rettungsdatenblätter abzurufen und auszuwerten (T). EK im Umgang mit den vorhandenen Informationssystemen unterweisen (O). EK die Möglichkeit zur Resilienzstärkung geben (z. B. durch Schulung, Training, Übung) (P).