

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Gefahren durch die Verwendung von  
Lithium-Ionen-Akkumulatoren in  
Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehr

# 208

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V,  
Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,  
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung



Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder,  
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,  
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 208

Gefahren durch die Verwendung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren in  
Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehr

von

Dipl.-Phys. Karola Keutel

Dr. Anica Pulz

Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge  
Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr -

Heyrothsberge

November 2021



# Berichts-Kennblatt

Nummer des Berichtes: 208		Titel des Berichtes Gefahren durch die Verwendung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehr		ISSN: 0170-0060	
Autoren: Dipl.-Phys. Karola Keutel Dr. Anica Pulz		durchführende Institution: Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr - Biederitzer Straße 5 D-39175 Biederitz / OT Heyrothsberge Abteilungsleiter: Dr. Michael Neske			
Nummer des Auftrages: 102 (01/2020) IdF		auftraggebende Institution: Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V – Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung			
Datum des Berichtes: Dezember 2021					
Seitenzahl: 86	Bilder: *) 44	Tabellen: 7	Literaturverweise: 57		
Kurzfassung: <p>Das Aufgabenspektrum der Feuerwehren ist vielschichtig. Um die Aufgaben wahrnehmen zu können, sind die Feuerwehreinsatzkräfte mit entsprechenden Ausrüstungsgegenständen ausgestattet. Zunehmend werden in diesen Lithium-Ionen-Akkumulatoren (LIB) verwendet, um die Vorteile dieser Akkumulatoren (geringes Volumen/Masse vs. hohe Leistungsdichte) auszunutzen.</p> <p>Unter den rauen Einsatzbedingungen der Feuerwehr kann diese Technologie kritische Folgen für die Einsatzkräfte nach sich ziehen. Diese sind zunehmend verunsichert, weil Hersteller Feuerwehr-Produkte mit integrierten LIB zurückrufen oder aus Sicherheitsgründen auf die Verwendung von LIB in Ausrüstungsgegenständen verzichten. Zusätzlich werden die Einsatzkräfte mit Vorfällen durch LIB konfrontiert und sind sich der möglichen Gefahren bewusst.</p> <p>Der vorliegende Bericht beinhaltet eine Datenerhebung zur Verwendung von LIB in der Ausrüstung der Feuerwehr. Dabei werden auch die Erfahrungen mit diesen Gegenständen beleuchtet. Gleichfalls werden Wartung und Pflege in die Betrachtung einbezogen. Im Nachgang werden die kritischen Einsatzszenarien definiert. Zwei ausgewählte Ausrüstungsgegenstände, welche LIB zur Stromversorgung verwenden, werden den kritischen Bedingungen im Einsatz ausgesetzt, um ihr Verhalten zu dokumentieren. Als Ergebnis werden Empfehlungen für den sicheren Einsatz abgeleitet und wichtige Hinweise für die Verwendung solcher Ausrüstungsgegenstände gegeben.</p>					
Schlagwörter: Lithium-Ionen-Akkumulatoren, Ausrüstungsgegenstände, Datenerhebung, Brandeinsatz, Gasfreisetzung					

\*) Farbseiteninformationen des Forschungsberichtes auf CD-ROM können bei Kostenerstattung von 5 € beim IBK Heyrothsberge, Abteilung Forschung - IdF -, Biederitzer Str. 5, 39175 Biederitz / OT Heyrothsberge, abgefordert werden.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>iii</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>iv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>vi</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Ausrüstungsgegenständen</b> .....	<b>3</b>
2.1 Aufbau von Lithium-Ionen-Akkumulatoren.....	3
2.2 Mögliche Gefährdungsszenarien für Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Ausrüstungsgegenständen.....	5
2.3 Recherche zu Vorkommnissen.....	7
2.4 Geltende Richtlinien und Vorschriften .....	9
<b>3 Datenerhebung</b> .....	<b>12</b>
3.1 Umfrage bei den deutschen Feuerwehren.....	12
3.2 Ergebnisse der Datenerhebung.....	13
3.3 Nebenergebnisse .....	21
3.4 Ableitungen aus der Analyse.....	27
<b>4 Versuchsaufbau und -durchführung</b> .....	<b>30</b>
4.1 Untersuchungsobjekte.....	30
4.2 Auswahl der Einsatzszenarien .....	30
4.3 Simulierte Einsatzszenarien im Labor.....	32
4.3.1 Wärme- und Feuchtebelastung im Kälte-Wärme-Prüfschrank .....	32
4.3.2 Experimenteller Aufbau und Messtechnik der Laborexperimente .....	32
4.4 Praxisnahe simulierte Einsatzszenarien in der Versuchskammer .....	35
4.4.1 Übersicht der durchgeführten Versuche .....	35
4.4.2 Experimenteller Aufbau und Messtechnik in der Versuchskammer .....	36
<b>5 Ergebnisse</b> .....	<b>40</b>
5.1 Simulierte Einsatzszenarien im Klimaschrank .....	40
5.1.1 Vergleich von feuchtem und trockenem LIB-Lampen-Einsatz.....	40

5.1.2	Einfluss von Einsatzkleidung im Fall der Knickkopflampe.....	43
5.1.3	LIB-Lampen-Aufbewahrung im unbeheizten Gerätehaus .....	45
5.1.4	Mehrfacher Einsatz der Lampen mit LIB.....	46
5.2	Praxisnahe simulierte Einsatzszenarien in der Versuchskammer .....	48
5.2.1	Innerer Defekt des LIB .....	48
5.2.2	Gerichtete Wärmestrahlung auf die Lampen .....	51
5.2.3	Direkte Beflammung der Lampen mit offenem Feuer .....	52
5.2.4	Direkte Beflammung des LIB ohne Lampengehäuse mit offenem Feuer .....	57
5.2.5	Weitere Einflussfaktoren den bestimmungsmäßigen Betrieb von LIB betriebeben Lampen .....	59
5.3	Fazit aus den Ergebnissen der simulierten Einsatzszenarien .....	61
<b>6</b>	<b>Handlungsempfehlungen für die Feuerwehren.....</b>	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>68</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>73</b>
	Anhang 1: Aktuell verfügbare Ausrüstungsgegenstände mit LIB für die Feuerwehr [30] ...	73
	Anhang 2: Online Umfragebogen für die deutschen Feuerwehren [30] .....	74
	Anhang 3: Offene Nennung der Teilnehmenden zu den Erfahrungen mit LIB betriebeben Ausrüstungsgegenständen [30].....	81
	Anhang 4: Einzeldiagramme für den mehrfachen Einsatz der Helmlampe .....	83
	Anhang 5: Einzeldiagramme für den mehrfachen Einsatz der Knickkopflampe .....	84
	Anhang 6: Ergebnisse der Gasmessung bei der Wärmebestrahlung .....	85
	Anhang 7: Details der Ladkontakte an der Knickkopflampe und in der zugehörigen Ladeschale.....	86

## Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril/Butadien/Styrol
AFKzV	Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung
AGBF Bund	Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland
BF	Berufsfeuerwehr
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
bvfa	Bundesverband Technischer Brandschutz e. V.
DEC	Diethylcarbonat
DMC	Dimethylcarbonat
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.
EC	Ethylencarbonat
ELW	Einsatzleitwagen
EMC	Ethylmethylcarbonat
EN	Europäischen Normen
FF	Freiwillige Feuerwehr
FTIR	Fourier-Transform-Infrarot (im Kontext mit –Spektrometer)
FTZ	Feuerwehrtechnisches Zentrum
FwDV	Feuerwehr-Dienstvorschrift
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
HUPF	Herstellungs- und Prüfungsbeschreibung für eine universelle Feuerwehrschutzbekleidung
IBK	Institut für Brand- und Katastrophenschutz
LHF	Lösch- und Hilfeleistungsfahrzeug
LIB	Lithium-Ionen-Battery, dt.: Lithium-Ionen-Akkumulator
LiPF <sub>6</sub>	Lithium-Hexafluorophosphat
PC	Propylencarbonat
PBI	Polybenzimidazol (Oberstoff der Feuerwehreinsatzkleidung)
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
SEI	„Solid Electrolyte Interface“ (Festkörper-Elektrolyt-Schnittstelle)
TWB	Technisch-Wissenschaftlicher Beirat der vfdb
VC	Vinylencarbonat
VdS	VdS (Verband der Sachversicherer e. V.) Schadenverhütung GmbH
vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.

## Symbolverzeichnis

B	Breite
$dT/dt$	Temperaturanstieg/zeitliche Änderung der Temperatur
H	Höhe
i	Indizes
rF	Relative Luftfeuchte
T, t <sub>i</sub>	Zeit/Zeit mit i = 1...∞
T	Temperatur
T	Tiefe
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
WF	Wärmefluss
$\Sigma$	Summe

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines zylindrischen LIB.....	3
Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Batteriesystems [10] .....	5
Abbildung 3: Umfragebeteiligung je Bundesland und Organisation [30].....	13
Abbildung 4: Vorhandene Ausrüstungsgegenstände mit LIB (gruppiert) in Abhängigkeit von der Organisation und Anzahl.....	14
Abbildung 5: Verwendung von originalen und nicht originalen LIB in Ausrüstungsgegenständen .....	15
Abbildung 6: Angaben zum Umgang mit den Ausrüstungsgegenständen nach dem Einsatz.....	16
Abbildung 7: Zuständigkeit für Wartung und Prüfung von LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen in den Feuerwehren.....	17
Abbildung 8: Angaben zum Vorhandensein von Gefährdungsbeurteilungen und Handlungsanweisungen zu den in den Feuerwehren vorhandenen Ausrüstungsgegenständen mit Lithium-Ionen-Technologie .....	20
Abbildung 9: Verteilung der zukünftigen Beschaffung von LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen in Abhängigkeit von der Organisation und Anzahl der Nennung.....	22
Abbildung 10: Privat erworbene Ausrüstungsgegenstände mit LIB in Abhängigkeit von der Organisation und der Anzahl.....	23
Abbildung 11: Mitgeführte private LIB betriebene Gegenstände im Einsatzfall .....	24
Abbildung 12: Ladeverhalten von Ausrüstungsgegenständen mit LIB durch die Feuerwehren.....	25

Abbildung 13: Unterweisungssituation im Umgang mit LIB für a) Gerätewarte und b) Mannschaft .....	26
Abbildung 14: Individuelle Risikoeinschätzung der Teilnehmenden im Umgang mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen.....	27
Abbildung 15: Versuchsaufbau mit Knickkopflampe im Wärme-Kälte-Prüfschrank der Fa. Weiss.....	33
Abbildung 16: Platzierung des Thermoelements T1 in den geöffneten Lampen (links : Knickkopf; rechts: Helmlampe) .....	34
Abbildung 17: Schematischer Aufbau der Versuchskammer .....	36
Abbildung 18: Schematischer Aufbau im Inneren der Versuchskammer.....	37
Abbildung 19: Langzeitversuche Helmlampen (links:1; rechts:2) bei den Parametern T: 85 °C und rF: 0 % .....	40
Abbildung 20: Langzeitversuche Helmlampen (links:1; rechts:2) bei den Parametern T: 85 °C und rF: 100 % .....	41
Abbildung 21: Langzeitversuch Knickkopflampe bei T: 85 °C in rF: 0 % (links) und in rF: 100 % (rechts) .....	42
Abbildung 22: Typische Einsatzjacken der Feuerwehr; Obermaterial 1 (links) und Obermaterial 2 (rechts) .....	43
Abbildung 23: Langzeitversuch (T: 85 °C) mit Knickkopflampe in Brusttasche aus Obermaterial 1 (links) und Obermaterial 2 (rechts).....	44
Abbildung 24: Helmlampe (links) und Knickkopflampe (rechts) im kalten Gerätehaus (T: -5 °C) gelagert mit nachfolgender Brandbekämpfung (T: 85 °C).....	45
Abbildung 25: Zeitliche Verläufe der Gitter- und Lampeninnentemperatur eines Versuchszyklus (Helmlampe).....	46
Abbildung 26: Zeitliche Verläufe der Gitter- und Lampeninnentemperatur eines Versuchszyklus (Knickkopflampe).....	47
Abbildung 27: Verhalten der Knickkopflampe beim inneren Defekt (oben physikalische Messwerte T & WF; unten chemische Messwerte).....	49
Abbildung 28: Verhalten der Helmlampe beim inneren Defekt (oben physikalische Messwerte T & WF; unten chemische Messwerte).....	50
Abbildung 29: Verhalten der Knickkopflampe unter Wärmestrahlungsbeaufschlagung (physikalische Messwerte T & WF).....	51
Abbildung 30: Verhalten der Helmlampe unter Wärmestrahlungsbeaufschlagung (physikalische Messwerte T & WF) .....	52
Abbildung 31: Konfrontation der Knickkopflampe mit offenem Feuer (oben physikalische Messwerte T & WF; unten chemische Messwerte).....	53

Abbildung 32: Konfrontation der Helmlampe mit offenem Feuer (oben physikalische Messwerte T & WF; unten chemische Messwerte).....	55
Abbildung 33: Zusammensetzung der Carbonate (Elektrolyte) aus den Poolfeuerversuchen .....	57
Abbildung 34: Beflammung eines LIB ohne Gehäuse (oben physikalische Messwerte T & WF; unten chemische Messwerte) .....	58
Abbildung 35: Detailansichten zu den Ladekontakten an der Helmlampe und der zugehörigen Ladeschale .....	61
Abbildung 36: Helmlampe (1) bei T: 85 °C und rF: 100 %, Versuch 1 von 3 .....	83
Abbildung 37: Helmlampe (1) bei T: 85 °C und rF: 100 %, Versuch 2 von 3 .....	83
Abbildung 38: Helmlampe (1) bei T: 85 °C und rF: 100 %, Versuch 3 von 3 .....	83
Abbildung 39: Knickkopflampe (1) bei T: 85 °C und rF: 100 %, Versuch 1 von 3 .....	84
Abbildung 40: Knickkopflampe (1) bei T: 85 °C und rF: 100 %, Versuch 2 von 3 .....	84
Abbildung 41: Knickkopflampe (1) bei T: 85 °C und rF: 100 %, Versuch 3 von 3 .....	84
Abbildung 42: Verhalten der Knickkopflampe unter Wärmestrahlungsbeaufschlagung-chemische Messwerte .....	85
Abbildung 43: Verhalten der Helmlampe unter Wärmestrahlungsbeaufschlagung-chemische Messwerte .....	85
Abbildung 44: Detailansichten zu den Ladekontakten an der Knickkopflampe und der zugehörigen Ladeschale .....	86

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typische Elektrolytbestandteile [9, 14–16] .....	4
Tabelle 2: Vorkommnisse mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen [30].....	18
Tabelle 3: Übersichtsmatrix der vordefinierten Versuchsparameter im Kälte-Wärme-Prüfschrank .....	32
Tabelle 4: Lage, Art und Typ der verwendeten Sensoren .....	34
Tabelle 5: Matrix der Versuchsparameter in der Versuchskammer .....	35
Tabelle 6: Bezeichnung, Typ und Lage der verwendeten Messsensoren der Versuchskammer.....	38
Tabelle 7: Chemische Beständigkeit der Materialproben für beide Lampen.....	60

# 1 Einleitung

Das Aufgabenspektrum der deutschen Feuerwehren ist vielschichtig. Um die unterschiedlichen Aufgaben wahrnehmen zu können, sind die Feuerwehreinsatzkräfte mit entsprechenden Ausrüstungsgegenständen ausgestattet. Die Mindestausstattung mit Ausrüstungsgegenständen der Einsatzkraft gemäß ihrer Einsatzaufgabe ist in den Feuerwehr-Dienstvorschriften [1–4] angegeben.

Grundsätzlich werden die Einsatzkräfte der Feuerwehr mit für notwendig erachteten Ausrüstungsgegenständen durch ihre jeweilige Organisation ausgestattet, welche entweder in den Feuerwehrräumen (wie Taucherequipment) vorgehalten werden oder auf den Fahrzeugen (z. B. BOS-Funkgeräte) verlastet sind. Zusätzlich statten sich die Einsatzkräfte unter Umständen mit Gegenständen wie Helmlampe, Knickkopflampe, oder Handscheinwerfer aus [5].

Durch die Grundbedingungen diverser Einsatzlagen, bspw. Brandbekämpfung im schwer zugänglichen Waldgebiet, besteht die Forderung nach mobil einsetzbaren Ausrüstungsgegenständen, welche ohne stete Stromversorgung durch ein infrastrukturell vorgegebenes Stromversorgungsnetz oder durch einen mit fossilen Brennstoffen betriebenen Stromgenerator/-kompressor benutzt werden können. Diese mobile Unabhängigkeit wird durch die Verwendung von Batterien und Akkumulatoren realisiert und ist mittlerweile etabliert. Hier zu nennen sind Ausrüstungsgegenstände, wie die verschiedenen Lampen [6], Werkzeuge [7] und sonstigen Einsatzmittel [8].

In den letzten Jahren werden durch die Hersteller zunehmend Lithium-Ionen-Akkumulatoren (LIB, Sekundärbatterien) in Ausrüstungsgegenständen verwendet. Vorteile dieser LIB [9] sind:

- hohe Leistungsdichten bei kleinem Volumen bzw. geringer Masse,
- hohe Wirkungsgrade beim Laden und Entladen,
- geringes Selbstentladungspotential sowie
- ein geringerer Memoryeffekt im Vergleich zu anderen Akkumulatoren.

Dem gegenüber stehen folgende Nachteile [10]:

- sehr kleiner Temperatur-Zellspannungs-Arbeitsbereich und die sich daraus ergebenden Grenzen der thermischen und elektrischen Belastbarkeit (Kälte, Wärme, Überladung, Kurzschluss),
- geringe mechanische Belastbarkeit (Perforation, Penetration, Vibration, Schlag u. a.).

Trotz alledem erobern die LIB weiterhin den Markt und halten in fast allen Lebensbereichen Einzug. Insbesondere die geförderte Elektromobilität und die damit verbundene Weiterentwicklung dieser Akkumulatoren führen zum Vordringen dieser Technik. Dabei können für die LIB kritische Randbedingungen auftreten. Zu nennen sind die rauen Einsatzbedingungen der Feuerwehr [11], wie sie bei der Brandbekämpfung vorliegen.

Die Verwendung von LIB unter den Einsatzbedingungen der Feuerwehr kann kritische Folgen für die Einsatzkräfte nach sich ziehen. Diese sind zunehmend verunsichert, weil Hersteller Feuerwehr-Produkte [12] mit eingesetzten LIB zurückrufen oder die Fachpresse [13] aus Sicherheitsgründen auf den Verzicht dieser Akkumulatoren-Technologie in Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehr verweist. Zusätzlich werden die Einsatzkräfte im täglichen Dienst mit der Brandbekämpfung von E-Automobilen konfrontiert und sind sich dadurch der möglichen Gefahren dieser Technologie bewusst.

Der vorliegende Bericht zeigt eine Datenerhebung zur Verwendung von LIB in den Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehr, wobei auch die Erfahrungen mit solchen Ausrüstungsgegenständen beleuchtet werden. Gleichfalls werden die Wartung und Pflege in die Betrachtung einbezogen. Im Nachgang werden die für LIB kritischen Einsatzszenarien definiert. Zwei ausgewählte Ausrüstungsgegenstände, welche LIB zur Stromversorgung verwenden, werden den kritischen Bedingungen im Einsatz ausgesetzt und ihr Verhalten dokumentiert. Aus der Gesamtheit der Betrachtung werden Empfehlungen für den sicheren Einsatz abgeleitet und wichtige Hinweise für die Verwendung solcher Ausrüstungsgegenstände gegeben.

## 2 Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Ausrüstungsgegenständen

### 2.1 Aufbau von Lithium-Ionen-Akkumulatoren

LIB gehören zur Gruppe der elektrochemischen Energiespeichersysteme. Diese werden in primäre und sekundäre Speichersysteme unterteilt. Zu den primären Speichersystemen gehören alle nicht wieder aufladbare elektrochemische Energiespeicher, deren Energietransport zwischen den Elektroden irreversible ist. Sie werden Batterien oder auch Primärzellen genannt. Zu den sekundären Speichersystemen zählen alle wieder aufladbaren elektrochemischen Energiespeicher, deren Energietransport zwischen den Elektroden reversibel ist. Sie werden als Akkumulatoren oder auch Sekundärzellen bezeichnet.

Ein LIB besteht im Wesentlichen aus einer Kathode, einer Anode, einem Separator, einem Elektrolyten und einem Leitsalz. In Abbildung 1 ist der schematische Aufbau dargestellt. Es existieren verschiedene Bauformen für LIB, wie Zylinder-, Prisma-, Pouch- und Knopfzellen. Sie unterscheiden sich u. a. durch implementierte Sicherheitsventile.

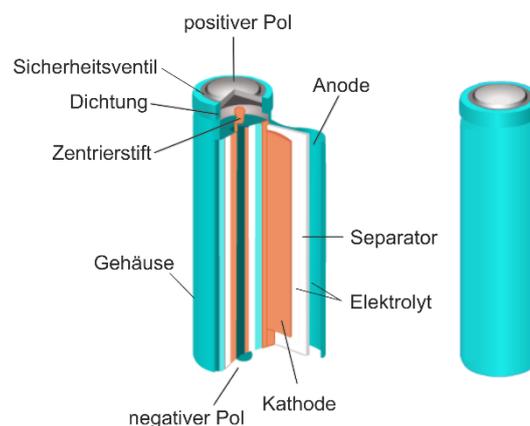


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines zylindrischen LIB

Die für Anode und Kathode verwendeten Elektrodenmaterialien können abhängig vom Hersteller variieren und beeinflussen maßgeblich die folgenden Eigenschaften der Akkumulatoren [9, 11]:

- spezifische Energie,
- Leistung,
- Lebensdauer,
- Kosten,
- Schnellladbarkeit und
- Sicherheit.

Der ionendurchlässige Separator trennt Anode und Kathode voneinander, lässt jedoch einen Ionenaustausch in beide Richtungen zu. Somit kann der Akkumulator geladen oder entladen werden. Für die Ionendurchlässigkeit werden 15 – 30 µm starke Membranen aus Polymer, Keramik, Nanofaservlies-, Vliesstoff oder Glasfaser verwendet.

Der Elektrolyt ist ein flüssiges ternäres Gemisch oder ein Polymer/Gel, welcher das Leitsalz enthält und sich zwischen Anode und Kathode befindet. Der Elektrolyt gewährleistet neben dem Stromtransport über das in ihm gelöste Leitsalz auch Schutzfunktionen für den Akkumulator selbst und seine Bestandteile durch entsprechende zugemischte Additive. In den häufigsten Anwendungen kommen aufgrund der besseren Leitfähigkeit flüssige Elektrolytgemische zum Einsatz. In der Tabelle 1 sind typische Bestandteile eines flüssigen Elektrolyten mit zugehörigen Eigenschaften zusammengestellt.

*Tabelle 1: Typische Elektrolytbestandteile [9, 14–16]*

Bestandteil	Kurz- wort	Schmelz- punkt [°C]	Siede- punkt [°C]	Flamm- punkt [°C]	Zünd- punkt [°C]
<b>Dimethylcarbonat</b>	DMC	2-4	90	15	458
<b>Ethylencarbonat</b>	EC	36	247-249	143	465-450
<b>Diethylcarbonat</b>	DEC	- 43	125-129	25	445
<b>Propylencarbonat</b>	PC	- 49	242	116	430
<b>Ethylmethylcarbonat</b>	EMC	- 55	107	21	443
<b>Vinylencarbonat</b>	VC	19-22	162	73	•

In den Elektrolyten ist das Leitsalz möglichst vollständig gelöst. Das am häufigsten in kommerziell hergestellten LIB verwendete Leitsalz ist Lithium-Hexafluorophosphat (LiPF<sub>6</sub>). Alternative Leitsalze bspw. Lithium bis(trifluormethyl)sulfonylimid, - fluorsulfonyl)imid und Derivate, Lithium Fluoralkylphosphate sowie Lithium-bis(oxalato)borat haben sich noch nicht durchgesetzt oder sind nicht vollumfänglich getestet.

Eine einzelne Zelle genügt für die meisten Alltagsanwendungen nicht aus. Aus diesem Grunde werden je nach den Eigenschaften der einzelnen Zelle und den geforderten elektrischen Bedingungen der Anwendung die einzelnen Zellen in einer Reihen- oder Parallelschaltung verbaut. Die Zusammenführung und Verschaltung von einzelnen Zellen werden als Modul (ggf. auch „Pack“) bezeichnet.

Für komplexere Endanwendungen wie bei Elektrofahrzeugen oder stationären Speicheranlagen zur alternativen Energiegewinnung werden die einzelnen Module weiterverschaltet und zu Batteriesystemen zusammengefasst. Zusätzlich sind in Batteriesystemen sicherheitstechnische Baugruppen implementiert, die Überwachungs- und

Regulierungsaufgaben für wichtige Kennwerte wie Temperatur, Spannung, Ladungszustand u. a. übernehmen sowie das System vor äußeren Einflüssen schützen. In Abbildung 2 ist schematisch der Aufbau eines Batteriesystems abgebildet.

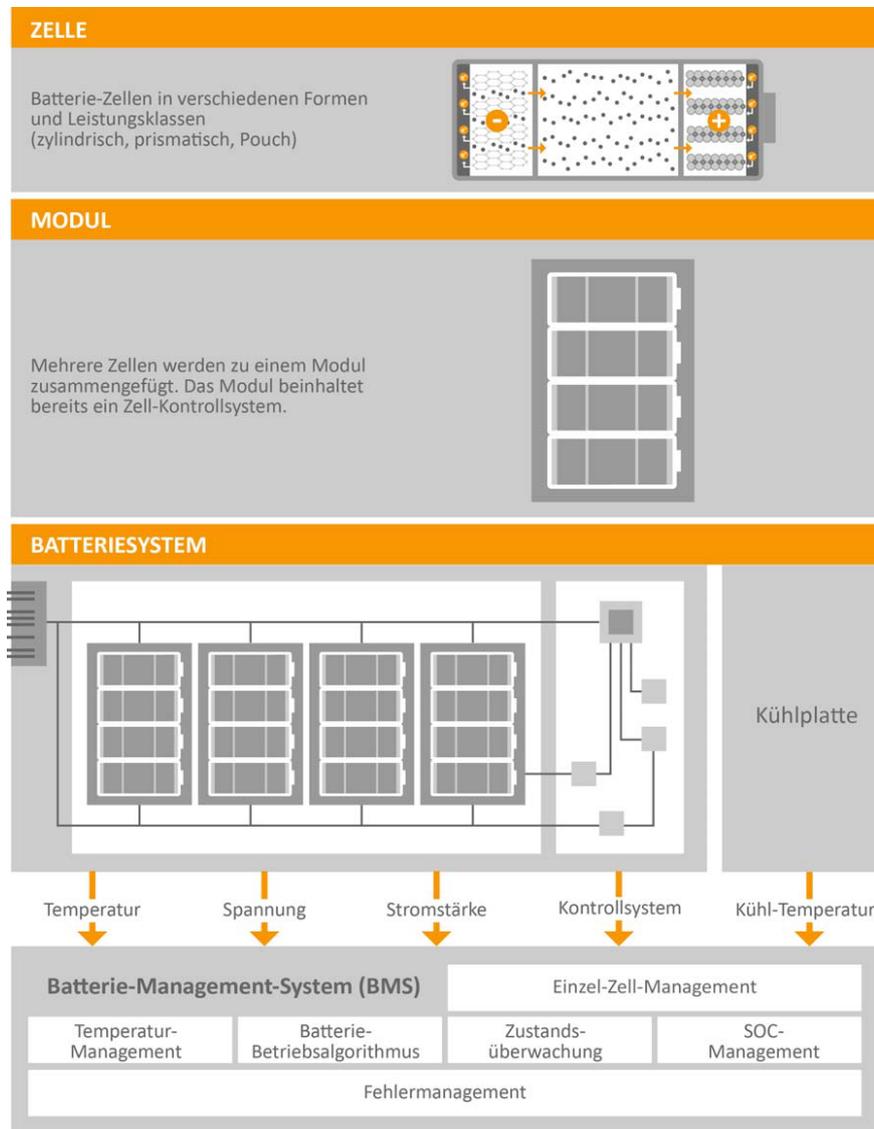


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Batteriesystems [10]

## 2.2 Mögliche Gefährdungsszenarien für Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Ausrüstungsgegenständen

Aus den Aufgaben der Feuerwehr – Retten, Löschen, Bergen, Schützen – ergeben sich verschiedene Einsatzszenarien, die sich grob in Brandbekämpfung, Technische Hilfeleistung, und übrige Einsätze (Tierrettung, Katastrophenbewältigung u. s. w.) [17] einteilen lassen. Die aktuellste statistische Erhebung durch den Deutschen Feuerwehrverband e. V. [18] zeigt auf, dass der Hauptteil der bestätigten Einsätze der deutschen Feuerwehren mit 66,7 % in den

Tätigkeitsbereich der Technischen Hilfeleistung fällt. Einsätze zur Brandbekämpfung stehen diesem Tätigkeitsbereich mit nur 27,5 % gegenüber (unberücksichtigt: Fehlalarme, Rettungsdiensteinsätze). Die übrigen Einsätze nehmen in der Statistik einen Anteil von 5,8 % ein. Dementsprechend sind die Technische Hilfeleistung und die Brandbekämpfungseinsätze die maßgeblichen Aufgabenbereiche, in denen Ausrüstungsgegenstände mit der Lithium-Ionen-Technologie verwendet werden.

Die Gefährdungsszenarien ergeben sich aus den Einsatzbedingungen und den Nachteilen der LIB (s. Kapitel 1). Je nach Höhe der Belastung der LIB kann diese im Inneren der Zelle den sogenannten „thermal runaway“ (in dt. thermisches Durchgehen) initiieren. Dieser Prozess, welcher auf einer sich selbst verstärkenden, exothermen chemischen Reaktion [19, 20] fundiert, kann nicht unterdrückt oder beendet werden und zerstört den LIB komplett.

Der Ablauf des thermal runaways beginnt mit einer sprunghaftigen Temperaturerhöhung im Inneren des Akkumulators. Dadurch bedingt erfolgt eine Volumenvergrößerung, welche wiederum zu einem Druckaufbau im Inneren des hermetisch geschlossenen Akkumulators führt. Je nach Bauform des LIB (keine Sicherheitsventile sind bei Pouch- und Knopfzellen vorhanden) besitzen diese Sicherheitsventile Berstscheiben, so dass diese beim Erreichen eines Grenzdrucks nachgeben. Im Anschluss wird der innere Druck des Akkumulators abgebaut, indem ein Aerosol ausgetrieben wird, welches auch glühende Bestandteile enthalten kann. Währenddessen steigt die Temperatur im Inneren des Akkumulators weiter an und kann in einer Selbstentzündung oder einer Explosion münden. Untersuchungen an Einzelzellen hierzu zeigten, dass beim thermal runaway neben den zuvor genannten Vorgängen auch toxische Gase (bspw. Fluorwasserstoff) austreten können [21]. Die Intensität des thermal runaways ist von verschiedenen Randbedingungen der Zellen (Ladezustand, Elektrodenmaterialien usw.) abhängig.

Im Kapitel 2.1 wurde darauf hingewiesen, dass LIB in seltenen Fällen als Einzelzelle zur Stromversorgung in Endanwendungen genutzt werden. Wesentlich öfter werden LIB als Module (wie im Laptop) oder als komplette Batteriesysteme (z. B. E-Fahrzeug) in der Endanwendung verbaut. Findet in einer Einzelzelle eines Moduls/ Batteriesystems ein thermal runaway statt, können die benachbarten Zellen durch Wärmeübertragungsprozesse ebenfalls in den thermal runaway überführt werden. Dies kann mit einem sehr großen Zeitverzug (> 24 h) der Fall sein. Einige Hersteller solcher Module und Batteriesysteme haben diese Problemstellung erkannt und arbeiten intensiv an Lösungen wie Kühlsysteme oder Wärmeisolationen innerhalb ihrer Module und Batteriesysteme [22–24].

Bei den Einsatzbedingungen der Feuerwehr muss eine klare Unterscheidung zwischen den beiden Einsatzarten Technische Hilfeleistung und Brandbekämpfung vollzogen werden. Prinzipiell werden Standardeinsatzszenarien für die Feuerwehren definiert. Dabei wird jedoch nicht auf die Randbedingungen des Szenarios eingegangen, sondern nur auf die

Schadenslage (vgl. [25]) . Die Randbedingungen sind jedoch in den Szenarien deutlich unterschiedlich.

Eine Technische Hilfeleistung findet häufig unter normalen Umgebungsbedingungen statt. Entscheidend ist hier die Wetterlage (bspw. Autounfall mit eingeklemmter Person bei Schneefall) oder die örtliche Gegebenheit (z. B. verschüttete Person im Warenlager). Im Gegensatz hierzu sind die Randbedingungen bei der Brandbekämpfung häufig rau. Zu nennen sind hier hohe Temperaturen, eine hohe Luftfeuchtigkeit, eine hohe Wärmestrahlung sowie toxische und aggressive Gase. Daneben können Flammen und extreme Brandphänomene kurzzeitig und unvorhersehbar auftreten, ebenso wie mechanische Kräfte, die durch strukturelle Instabilitäten hervorgerufen werden können.

Die Abstraktion eines realen Brandbekämpfungseinsatzes gestaltet sich schwierig, da angenommene Randbedingungen ggf. die Realität beschneiden oder überbewerten. Umfangreiche Untersuchungen zu dem Szenario der Brandbekämpfung und geeignete Prüfbedingungen wurden u. a. von Neske [26, 27] durchgeführt.

Als Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen wird resultierend aus den o. g. Untersuchungen und den Studien von Schubert [28] und Grabski [29] ein moderater Ansatz für die Bedingungen während der Brandbekämpfung gewählt.

Auf der Grundlage der Bewegung des Angriffstrupps in einer Gebäudestruktur wird eine maximale „Arbeitshöhe“ der Einsatzkräfte von 1150 mm für den Kopf und 900 mm für die Brust angenommen. Damit resultiert eine Umgebungstemperatur von etwa 85 °C. Der maximale Feuchtigkeitsgehalt der Umgebung wird für diese Temperatur mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % angenommen. Dies ist gleichbedeutend mit der mit Wasserdampf gesättigten Luft während und nach einem Löschangriff. Aufgrund der Luftvorrates in der Pressluftflasche und der körperlichen Anstrengung der Einsatzkraft wird für die Expositionszeit ein Ansatz von 30 min gewählt. Die maximale Wärmestrahlung ohne Konvektionsanteil am Boden beträgt 20 kW/m<sup>2</sup> unmittelbar vor dem Beginn eines Flashover. Der Flashover stellt eine Extremsituation dar, die nicht abgebildet werden soll. Unter Berücksichtigung der Abstandsabhängigkeit von der Strahlungsquelle wurde ein geringer Betrag für die Wärmestrahlung mit einem Wärmefluss von 16,5 kW/m<sup>2</sup> definiert. Für die Erzeugung einer aggressiven Atmosphäre (Rauchgas) mit typischer Weise enthaltenen Mineralsäuren (z. B. HCl) wird verzichtet. Ihre Wirkung soll unabhängig von dem Rauchgas getestet werden.

## **2.3 Recherche zu Vorkommnissen**

Im Rahmen des Projektes und der fertiggestellten Bachelorarbeit [30] wurde eine Recherche zu Vorkommnissen mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen bei den Feuerwehren

durchgeführt. Ziel dieser Recherche war, einen aktuellen Sachstand über das Gefährdungspotential durch solche Ausrüstungsgegenstände zu erlangen.

Die Recherche umfasste dabei die Analyse von Literatur, Internetseiten und Sozial Media Plattformen (auch Feuerwehr-Foren) auf nationaler und internationaler Ebene. Anfragen bei Ministerien, Verbänden, Versicherungen und Organisationen wurden zeitgleich zu dieser Thematik gestellt. Eine Übersicht zu den angefragten Behörden, Gremien und Gesellschaften usw. ist in [30] aufgeführt.

Durch diese Recherche wurden keine Vorkommnisse im Zusammenhang mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen identifiziert. Lediglich die B. Z. Berlin - Umland [31] hat über ein Ereignis der Freiwilligen Feuerwehr Eichwald (Brandenburg) berichtet. Hierbei ist im Jahr 2018 ein LIB beim Ladevorgang eines Smartphones thermisch durchgegangen. Auf eine Verwendung dieses Smartphones im Einsatzdienst der Feuerwehr wird nicht eingegangen. Smartphones gehören nicht zu den Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehr. Sie dürfen im Einsatz nicht mitgeführt werden.

Die internationalen Anfragen bei Ministerien, Feuerwehrverbänden, Versicherungen und Organisationen blieben ergebnislos. Neben der Feststellung, dass von den 23 angefragten Instanzen nur etwas mehr als die Hälfte (13) auf die Anfrage antworteten (USA reagierten teilweise und Kanada, China, Frankreich, Italien, Japan, Russland gar nicht), muss berücksichtigt werden, dass die angefragten Stellen oft erst Kenntnis von solchen Ereignissen erhalten, wenn ein Personenschaden mit dem Ereignis einherging.

Die Anfrage bei der „Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung“ (DGUV) und den 16 einzelnen Unfallkassen der jeweiligen Bundesländer lieferte ebenfalls kein Anzeigenergebnis zu Vorkommnissen mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen.

Weiterhin wurde der Arbeitskreis Technik des Landesfeuerwehrverbands Hessen und der Fachausschuss Technik der AGBF Bund - Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland (AGBF) angefragt, ob zur Thematik Ereignisse bekannt oder gar Fragestellungen zur Klärung aus den deutschen Feuerwehren vorliegen. Bis zur Fertigstellung dieses Berichtes erfolgte von beiden Gremien keine Rückantwort.

Aufgrund der fehlenden Reaktionen und den Fehlanzeigen zu Vorkommnissen mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen könnte geschlussfolgert werden, dass bei den Feuerwehren keine Ereignisse mit dieser Technik aufgetreten sind.

Dass diese Schlussfolgerung trügerisch ist, zeigten Gespräche zu dieser Thematik mit Hauptfachlehrer E. Schröder und Frau K. Vagel [32, 33]. So wurde über einen Zeitraum von 10 Jahren die Entwicklung bei den Funkgeräten (vor Einführung des BOS-Funks) in der Ausbildung des IBK Heyrothsberge beobachtet und festgestellt, dass in diesem Zeitraum die LIB der in der Ausbildung verwendeten Funkgeräte dreimalig erneuert werden mussten. Der

Grund hierfür waren die Eigenerwärmung einiger Akkumulatoren während der Verwendung und die unterschiedliche voluminöse Ausdehnung diverser Akkumulatoren, so dass diese nicht an die Geräte gekoppelt werden konnten.

Des Weiteren trat ein Ereignis nach einem Einsatz in Sachsen-Anhalt auf. Dabei wurde eine mit einem LIB betriebene Lampe unmittelbar nach dem Einsatz in die Ladeschale auf dem Fahrzeug gesteckt. Während des Ladevorgangs erfolgte wahrscheinlich ein Kurzschluss des Akkumulators und dadurch begann der thermal runaway. Das zufällige aber schnelle Handeln einer Einsatzkraft, welche Ladeschale und Lampe aus dem Fahrzeug entfernte, verhinderte größeren Schaden an Mensch und Sachwerten.

Beide hier genannten Vorkommnisse wurden weder verschriftlicht, noch an entsprechende Instanzen weitergemeldet. So kann aus dieser Recherche insgesamt das Fazit gezogen werden, dass Vorkommnisse und Ereignisse mit LIB in Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehr nicht gemeldet bzw. angezeigt werden. Ursachen hierfür können vielschichtig sein:

- Nachlässigkeit: Vernachlässigung der Sorgfaltspflicht beim Gebrauch solcher Ausrüstungsgegenstände durch Missachten der Reinigungs- und Wartungsangaben,
- Fehlverwendung: bewusste Zuwiderhandlung gegen die Herstellergebrauchsangaben für den Ausrüstungsgegenstand,
- undokumentierte Achtsamkeit: Feststellung und Eliminierung von Fehlzuständen des LIB in Ausrüstungsgegenständen, ohne Anzeige desselben bei übergeordneten Stellen und Instanzen,
- Problem der Brandursachenermittlung: technischer Defekt ohne weitere Klassifizierung als Brandursache bei Bränden in Feuerwehrfahrzeugen und Feuerwehrgerätehäusern
- Eigeninitiative der Hersteller: kein Einsatz von LIB bei allen mobilen Ausrüstungsgegenständen oder Revidierung des Einsatzes von LIB durch Hersteller,
- Zeit- und Kostenfaktor: Einführung und Umstellung von modernen Technologien bei Ausrüstungsgegenständen in den Feuerwehren ist zeit- und kostenabhängig.

## **2.4 Geltende Richtlinien und Vorschriften**

Nachfolgend werden wesentliche Richtlinien, Normen und Vorschriften aufgeführt, die zur Bearbeitung des Projektes notwendig sind. Darüber hinaus existieren weitere Richtlinien, Normen und Vorschriften, die hier nicht erwähnt werden.

Grundsätzlich sind LIB nach den geltenden Normen in Deutschland zertifiziert. In diesem Bericht wird darauf nicht weiter eingegangen. Erst die Verwendung des LIB als Energiequelle

in einem Ausrüstungsgegenstand und dem Anwendungsbereich dieses Ausrüstungsgegenstandes kann kritische Bedingungen für den LIB hervorrufen.

Wie in der Einleitung erwähnt, wird in den Feuerwehrdienstvorschriften 1, 7, 8 und 500 [1–4] die Mindestausstattung mit Ausrüstungsgegenständen der Einsatzkraft gemäß der Einsatzaufgabe angegeben. Dabei ist zu beachten, dass die Aufgabenbereiche der Einsatzkräfte neben der Brandbekämpfung gleichfalls auch andere Einsatzgebiete wie Technische Hilfeleistung und Tierrettung umfassen.

Hier besteht u. a. die Forderung nach Batterien und Akkumulatoren, welche geschlossen und für die Nutzung im explosionsgefährdeten Bereich zugelassen sind. Gemäß der Feuerwehrdienstvorschrift 1 [1] dürfen im Fall der Kopfleuchten nur dafür vorgeschriebene und zertifizierte Batterien und Akkumulatoren verwendet werden. Im Gegensatz dazu wird z. B. für BOS-Funkgeräte in den Feuerwehrdienstvorschriften, insbesondere in denen die den Sprechfunk betreffen [34, 35], keine Forderung an die Batterie oder die Akkumulatoren gestellt. Neben der Aufzählung und Beschreibung der Mindestausstattung mit Ausrüstungsgegenständen in den Feuerwehrdienstvorschriften müssen eine Vielzahl von diesen Ausrüstungsgegenständen nach der entsprechenden Norm des europäischen Komitees für Standardisierung (EN), ggf. des Deutschen Instituts für Normung (DIN) geprüft sein. Beispielsweise müssen Helmlampen, welche eine Zusatzeinrichtung bzw. Zubehör des Feuerwehrhelmes darstellen, gemeinsam mit dem Helm geprüft und zertifiziert sein. Die Grundlagen der Prüfung in diesem Fall liefert die DIN EN 443 [36]. Hier heißt es unter „Anforderungen“: „Falls der Hersteller der Helme Gegenstände [...] zum Gebrauch mit dem Helm bereitstellt, muss auch der mit diesen Gegenständen ausgestattete Helm weiterhin die Anforderungen dieser Europäischen Norm erfüllen.“

Es ist jedoch zu beachten, dass sich viele der Normen zu Feuerwehrausrüstungsgegenständen seit einiger Zeit in der Überarbeitung befinden. So wird in der Überarbeitung der DIN EN 13204:2016-12 „Doppelt wirkende hydraulische Rettungsgeräte für die Feuerwehr und Rettungsdienste“ [37] batteriebetriebene Geräte betrachtet, aber für die aktuell auf dem Markt verfügbaren Rettungsgeräte dieser Art gilt noch die Norm für die herkömmlich angetriebenen Geräte.

Normen, die unlängst aktualisiert wurden, bspw. die Norm DIN 14649:2018-03: „Explosiongeschützte Leuchten für Feuerwehr-Einsatzkräfte“ [38], setzt klare Bedingungen zum Einsatz von Akkumulatoren in den Leuchten, wie die Verwendung von originalen Akkumulatoren. Lampe und Akkumulator werden zusammen geprüft und sind nur in dieser Kombination für den Gebrauch im Feuerwehreinsatz zugelassen. Das Auswechseln von Teilen, so schreibt diese Norm vor, muss seitens des Herstellers in der Betriebsanleitung beschrieben sein. Diese muss zudem eine Sichtprüfung vor Inbetriebnahme vorschreiben. Die Reparatur durch autorisiertes Personal oder autorisierte Werkstätten wird von der Norm

ebenso gefordert. Die Gesamtheit der Forderungen dient letztlich dem Schutz der Einsatzkraft vor möglichen Gefahren durch eine nichtbestimmungsgemäße Nutzung oder Verwendung von nicht zugehörigen bzw. nicht zertifizierten Teilen der explosionsgeschützten Leuchte.

Darüber hinaus sind in den Normen des DIN für die unterschiedlichen Feuerwehrfahrzeuge (z. B. Einsatzleitwagen, Löschfahrzeuge etc.) Tabellen enthalten, in denen die Mindestausrüstung bzw. die Normbeladung aufgelistet ist. Eine Auflistung relevanter Normen ist in [30] enthalten. Aus den Feuerwehrdienstvorschriften, den relevanten Normen und einer Analyse des Marktes wurde in [30] eine Übersicht über Ausrüstungsgegenstände der Feuerwehr zusammengestellt, die mit LIB auf dem Markt angeboten werden und damit für Feuerwehren verfügbar sind. Eine Überprüfung der Zertifizierung dieser Gegenstände für den Feuerwehreinsatzdienst erfolgte nicht. Im Anhang 1 sind diese Ausrüstungsgegenstände tabellarisch zusammengestellt. Keine Berücksichtigung fanden in dieser Übersicht die Elektro-Feuerwehrfahrzeuge.

Neben diesen Normen und Dienstvorschriften existieren weitere Hinweise und Vorschriften der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e.V. (DGUV) [39–42], Merkblätter von unterschiedlichsten Verbänden [43, 44] sowie Herstellerempfehlungen und -anleitungen [8, 45–47]. Nicht immer steht dabei die LIB als Einsatzmittel im Vordergrund, sondern oft als Objekt der Gefährdung. Nichtsdestotrotz sind die enthaltenen Aussagen dieser Dokumente wesentlich (z. B. Verwendung originaler Ladegeräte [40] oder Lagerung und Transport von LIB [43]), um den sicheren Umgang und den Einsatz mit den LIB enthaltenen Ausrüstungsgegenständen zu gewährleisten. Beispielhaft zu nennen ist der Hinweis der DGUV in seiner Information 205-014 „Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung für Einsätze bei der Feuerwehr basierend auf einer Gefährdungsbeurteilung“ [42]. In Anhang A von [42] empfiehlt die DGUV: „Durchführung von Trageversuchen zur Feststellung der Eignung und Kompatibilität von PSA der Feuerwehren“. Zur PSA zählen auch Ausrüstungsgegenstände, die an der PSA angebracht sind.

In den Angaben der Hersteller wird oft das Ladeverhalten, die Wartung und Reinigung der Gerätschaft bzw. des LIB beschrieben. Zudem wird auf die Verwendung von originalen Akkumulatoren und Ladegeräten verwiesen. Der Verlust von Garantieansprüchen wird bei Zuwiderhandlungen angedroht.

### 3 Datenerhebung

#### 3.1 Umfrage bei den deutschen Feuerwehren

Statistische Übersichten zu Themen der Feuerwehr in Deutschland sind nicht automatisch abrufbar, sondern bedürfen einer Datenerhebung. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Bachelorarbeit [30] angefertigt, die eine Datenerhebung zum Thema LIB-betriebene Ausrüstungsgegenstände bei der Feuerwehr zum Ziel hatte.

Hierzu wurde eine Online-Umfrage (vgl. Anhang 2) erstellt und versucht, diese Umfrage allen deutschen Feuerwehren (Berufs-, Werk-, Bundeswehrfeuerwehren und Freiwilligen Feuerwehren) zur Verfügung zu stellen. Im Fragebogen wurde nach der Organisation (Berufs-, Werk-, Bundeswehrfeuerwehren oder Freiwilligen Feuerwehren) unterschieden, um durch die Zuordnung die Ergebnisse umfangreicher interpretieren zu können. Durch eine aktive Teilnahme der Feuerwehren sollte ein Überblick über die bei den Feuerwehren verwendeten Ausrüstungsgegenstände mit LIB erlangt und die Erfahrungen mit dieser Art von Ausrüstung gesammelt werden.

Der Link zur Online-Umfrage wurde

1. per E-Mail über
  - die Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland (AGBF Bund),
  - den Bundesverband Betrieblicher Brandschutz Werkfeuerwehrverband Deutschland e. V.,
  - den Verband der Bundeswehrfeuerwehren e. V.,
  - die Landesfeuerwehrverbände der 16 deutschen Bundesländer und
2. über Social-Media-Kanäle
  - Zeitschrift „FEUERWEHR“ des Forum Verlags,
  - Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge (IBK),
  - vfdb – Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e. V.,
  - [www.feuerwehr-forum.de](http://www.feuerwehr-forum.de),
  - [www.beamtentalk.de](http://www.beamtentalk.de) sowie in einer Ausgabe der Zeitung „BRANDSchutz – Deutsche Feuerwehr-Zeitung“

veröffentlicht (s. [30]). Daneben wurde der Link weiterhin über die privaten Netzwerke der Mitarbeiter der Einrichtung verteilt.

Insgesamt haben sich an dieser Umfrage 524 Personen aus 16 deutschen Bundesländern beteiligt. In der Abbildung 3 ist die Verteilung der Teilnehmer an der Umfrage nach dem Bundesland und der Organisation dargestellt. Zu den Feuerwehren mit hauptamtlichen Kräften gehören 134 Personen, von denen 2 Personen Mitglied einer Bundeswehrfeuerwehr waren. Durch die fehlende Angabe des Bundeslandes dieser 2 Personen waren sie nicht

zuordnungsfähig und wurden in der Abbildung 3 nicht berücksichtigt. Aus der Gruppe der Freiwilligen Feuerwehr nahmen 390 Personen teil. 37 % der Teilnehmenden an der Umfrage gaben an, die Funktion eines Gerätewartes inne zu haben.

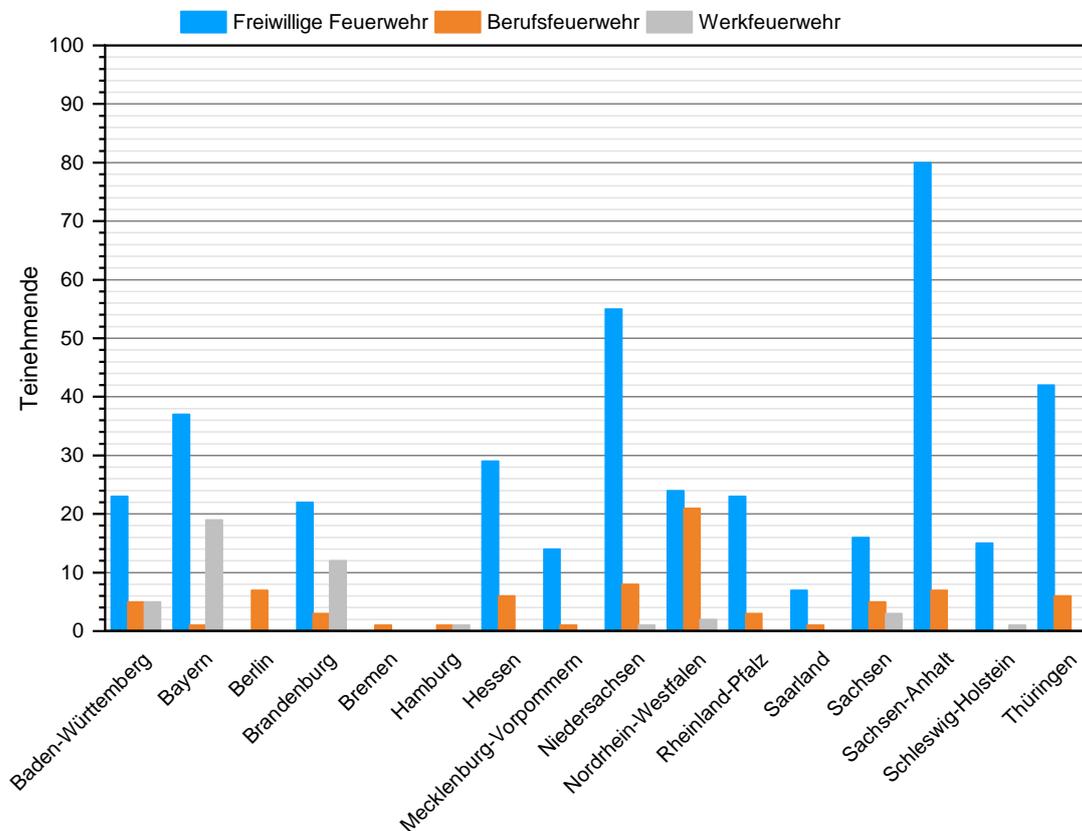


Abbildung 3: Umfragebeteiligung je Bundesland und Organisation [30]

### 3.2 Ergebnisse der Datenerhebung

Die Ausrüstungsgegenstände der Feuerwehr umfassen ein breites Spektrum, z. B. Rettungsleine, Wärmebildkamera, Feuerwehr-Haltegurt usw. Dabei sind verschiedene Ausrüstungsgegenstände nicht anwendbar ohne eine energieliefernde Quelle bspw. Druckbelüfter, Funkgerät, Motorkettensäge o. ä.. Stetig werden diese Gegenstände immer unabhängiger von fossilen Energiequellen oder vom festen Kontakt zum Versorgungsnetz. D. h. ein am Gegenstand verbauter Akkumulator liefert die für den Einsatz benötigte Energie. Diese verbauten Akkumulatoren werden seit einigen Jahren zunehmend durch LIB ersetzt. Jedoch ist eine Koexistenz der alten und neuen Akkumulatorarten nicht vernachlässigbar. Nichtsdestotrotz wird davon ausgegangen, dass in den nachfolgend dargestellten Ergebnissen der Online-Umfrage sich die Teilnehmenden immer auf den mit einem LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstand bezogen haben.

In einem ersten Abfragepunkt wurden die Ausrüstungsgegenstände in 31 Oberbegriffe (wie akkubetriebenes Werkzeug) gruppiert, um eine bessere Zuordnung zu den Einsatzfeldern (z. B. Brandbekämpfung, Technische Hilfeleistung usw.) im Fortschritt der Auswertung zu erlangen. Die Analyse der Umfragedaten über alle Feuerwehren ergab, dass im Durchschnitt 10 dieser Gruppen von mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen pro Feuerwehr vorhanden sind. Dies entspricht ca. einem Drittel der Gesamtanzahl der Ausrüstungsgruppen (31 Stück).

Keine LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstände in ihrer Organisation zu besitzen, gaben 16 der Teilnehmenden an. In der Abbildung 4 sind die Oberbegriffe der mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstände in Abhängigkeit der Organisation und Anzahl der Nennung dargestellt.

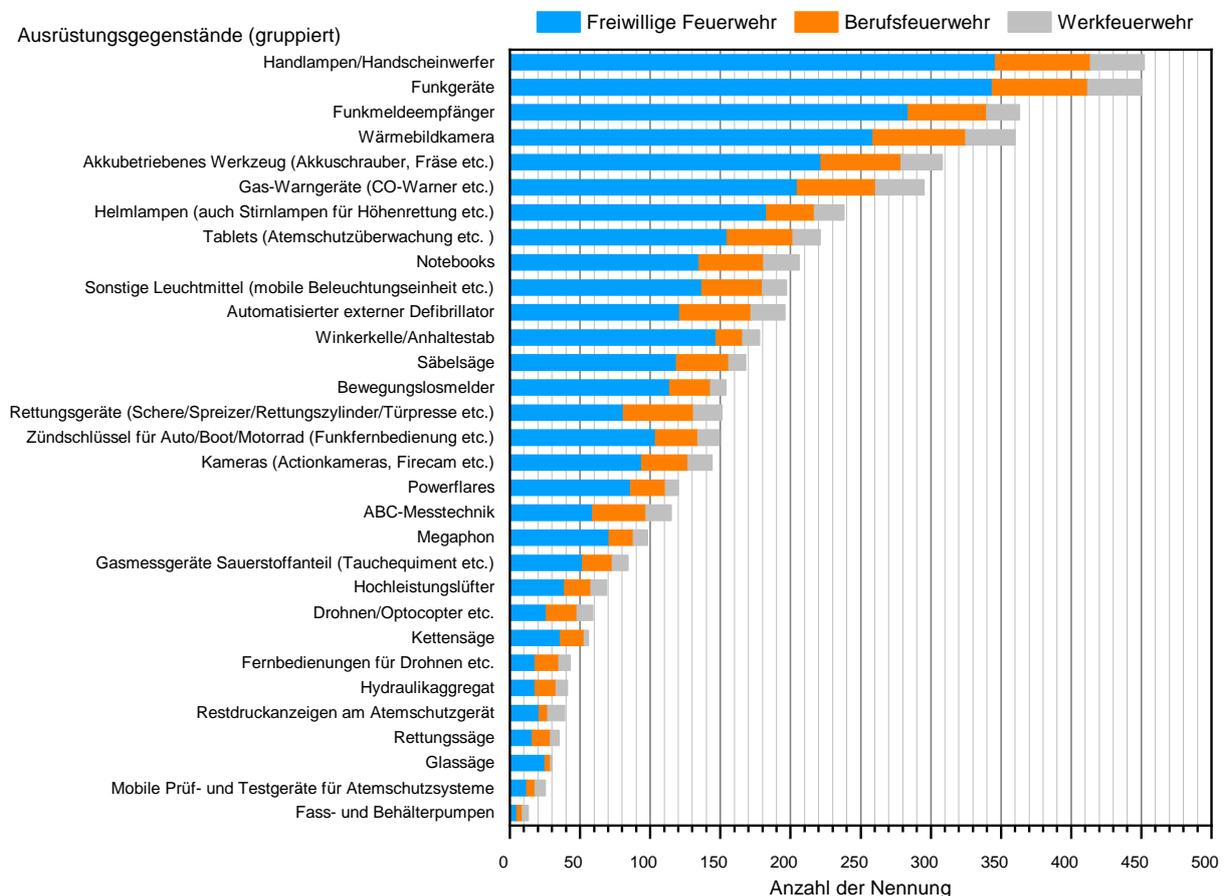


Abbildung 4: Vorhandene Ausrüstungsgegenstände mit LIB (gruppiert) in Abhängigkeit von der Organisation und Anzahl

Anhand der Abbildung 4 kann festgestellt werden, dass 5 der 10 meistgenannten Gruppierungen der mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstände zur Mindestausrüstung eines Löschfahrzeuges [48] gehören. Dazu zählen die Handlampen/Handscheinwerfer, Funkgeräte, Wärmebildkameras, Helmlampen und sonstige Leuchtmittel.

Bei der Betrachtung der Unterschiede zwischen den Feuerwehren mit hauptamtlichen Kräften und den Freiwilligen Feuerwehren kann festgestellt werden, dass die Feuerwehren mit

hauptamtlichen Kräften häufiger Technik wie Drohnen/Optocopter etc., Fernbedienungen für Drohnen etc., Fass- und Behälterpumpen, mobile Prüf- und Testgeräte für Atemschutzsysteme, Hydraulikaggregate sowie Rettungssägen mit LIB vorhalten als die Freiwilligen Feuerwehren. Diese dagegen besitzen einen höheren Anteil an LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen wie Glassägen, Winkerkellen/Anhaltestäbe, Funkgeräte, Funkmeldeempfänger, Handlampen/Handscheinwerfer und Helmlampen (auch Stirnlampen für Höhenrettung etc.). Als Gründe hierfür wurden überwiegend der Stand der Technik (421 Teilnehmende, 80 %) und die bessere Mobilität im Einsatz (366 Teilnehmende, 70 %) genannt. Fehlende Alternativen bei Geräten wie Handlampen oder Handfunkgeräten wurden ebenso für die Verwendung solcher Ausrüstungsgegenstände angegeben. Diese fehlenden Alternativen sind jedoch notwendig, um im Einsatzgeschehen wesentliche Technik einzusetzen. Die Einsatzstatistik zeigt, dass bspw. Berufsfeuerwehren (BF) im Vergleich zu Freiwilligen Feuerwehren (FF) öfter zur Technischen Hilfeleistung – BF 3.398 Einsätze (72 %) : FF 13.539 Einsätze (47 %) – als zu Brandeinsätzen - BF 1.305 Einsätze (28 %) : FF 15.268 Einsätze (53 %) [17] ausrücken. Dadurch liegt z. B. ein Schwerpunkt der modernen Ausrüstungsgegenstände entsprechend bei der BF auf den Rettungsgeräten und bei der FF auf den Handlampen/Handscheinwerfer und Funkgeräten.

Neben den bei den Feuerwehren vorhandenen Ausrüstungsgegenständen, die mit LIB betrieben werden, lag ein weiteres Augenmerk auf den verwendeten LIB selbst. Diese können je nach Beanspruchung und Lebensdauer bei verschiedenen Ausrüstungsgegenständen ausgetauscht werden. Beispielhaft zu nennen sind Akkumulatoren von Wärmebildkameras, welche vom Hersteller oft als Wechselakkumulatoren empfohlen werden [49]. In der Abbildung 5 ist das Ergebnis der Umfrage prozentual abgebildet.

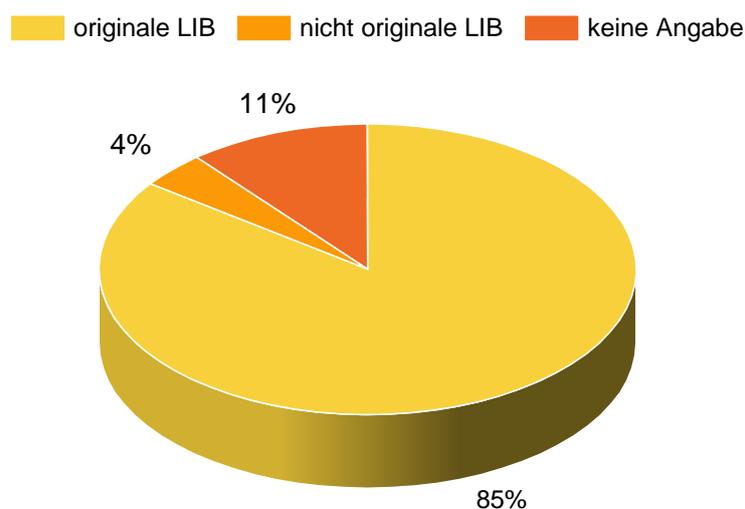


Abbildung 5: Verwendung von originalen und nicht originalen LIB in Ausrüstungsgegenständen

Aus der Datenerhebung geht hervor, dass 85 % der Befragten den Angaben der Gerätehersteller Folge leisten und die originalen LIB verwenden, wenn dieser ausfällt oder

beschädigt ist. Die bewusste Verwendung von nicht originalen LIB aufgrund eines günstigeren Preises beim Erwerb benannten 4 % der Teilnehmenden. Bei 22 der 23 Teilnehmenden liegt eine Handlungsanweisung zur Verwendung der nicht originalen LIB vor. 11 % der Befragten waren unsicher über die Art der eingesetzten LIB.

Bei genauer Betrachtung der positiven Antworten zur Verwendung von Originalen konnte festgestellt werden, dass Werkfeuerwehren und Bundeswehrfeuerwehren nur originale LIB verwenden.

Ein weiterer Aspekt der Umfrage galt den Fragen: „Wann werden die Ausrüstungsgegenstände gereinigt und gewartet?“ und „Wer ist zuständig für die Wartung und die Reinigung?“. Diese Fragen wurden durch verschiedene mündliche Hinweise aus dem Feuerwehrbereich aufgeworfen, weil die Wiederherstellung der Einsatzbereitschaft der Ausrüstungsgegenstände nicht einheitlich geregelt wird. Insbesondere Ausrüstungsgegenstände, die in der Brandbekämpfung im Einsatz waren, können schmutzig und feucht sein und damit Gefahr laufen, beim Ladevorgang einem Kurzschluss zu unterliegen. Die Abbildung 6 zeigt die Befragungsergebnisse zum Umgang mit den LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen nach dem Einsatz.

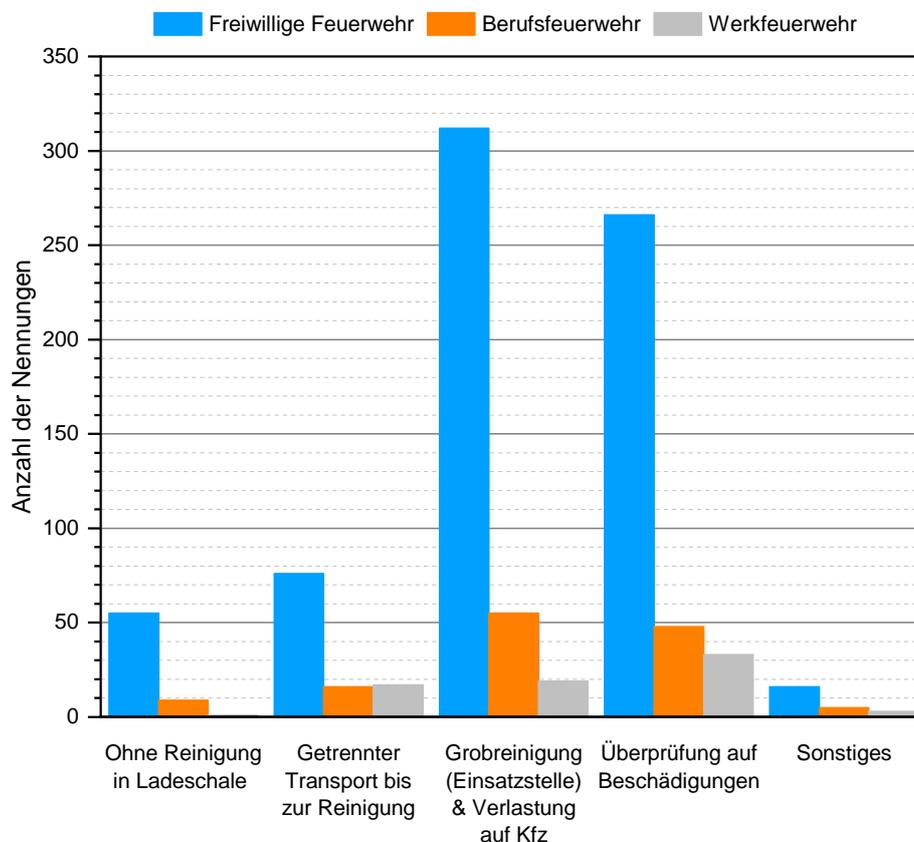


Abbildung 6: Angaben zum Umgang mit den Ausrüstungsgegenständen nach dem Einsatz

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, werden die Ausrüstungsgegenstände am häufigsten grob an der Einsatzstelle gereinigt und danach auf dem Fahrzeug verlastet. Ob die Verlastung

bedeutet „zurück in die Ladeschale auf dem Kfz“ oder „getrennter Transport zur Wache auf dem Kfz“, blieb unklar.

Viele der Teilnehmenden überprüfen die genutzten Gegenstände nach dem Einsatz auf Beschädigungen. Kritisch zu bewerten sind die Antworten der Einsatzkräfte, die die Ausrüstungsgegenstände unmittelbar nach dem Einsatz, ohne eine jegliche Reinigungshandlung durchzuführen, in die Ladeschale zurückstecken. Bei älteren Geräten kann dies u. U. durch Restfeuchte oder Restverschmutzung zur Schädigung des Akkumulators führen.

Im Freifeld dieser Fragestellung gaben viele der Teilnehmenden an, dass die Reinigung des Ausrüstungsgegenstandes abhängig von Einsatzart, Verschmutzungsgrad und der Tätigkeit der Einsatzkraft ist.

Einige der Befragten gaben weiterhin an, dass die Akkumulatoren im Feuerwehrgerätehaus gewechselt werden, sofern dies für die Geräte möglich ist und eine ausreichende Anzahl an Ersatzakkumulatoren vorgehalten wird.

Hieran schloss sich die Frage nach der Zuständigkeit für die Wartung und Prüfung der Ausrüstungsgegenstände an, wenn diese mit Lithium-Ionen-Technologie betrieben werden. In Abbildung 7 sind die Angaben grafisch dargestellt.

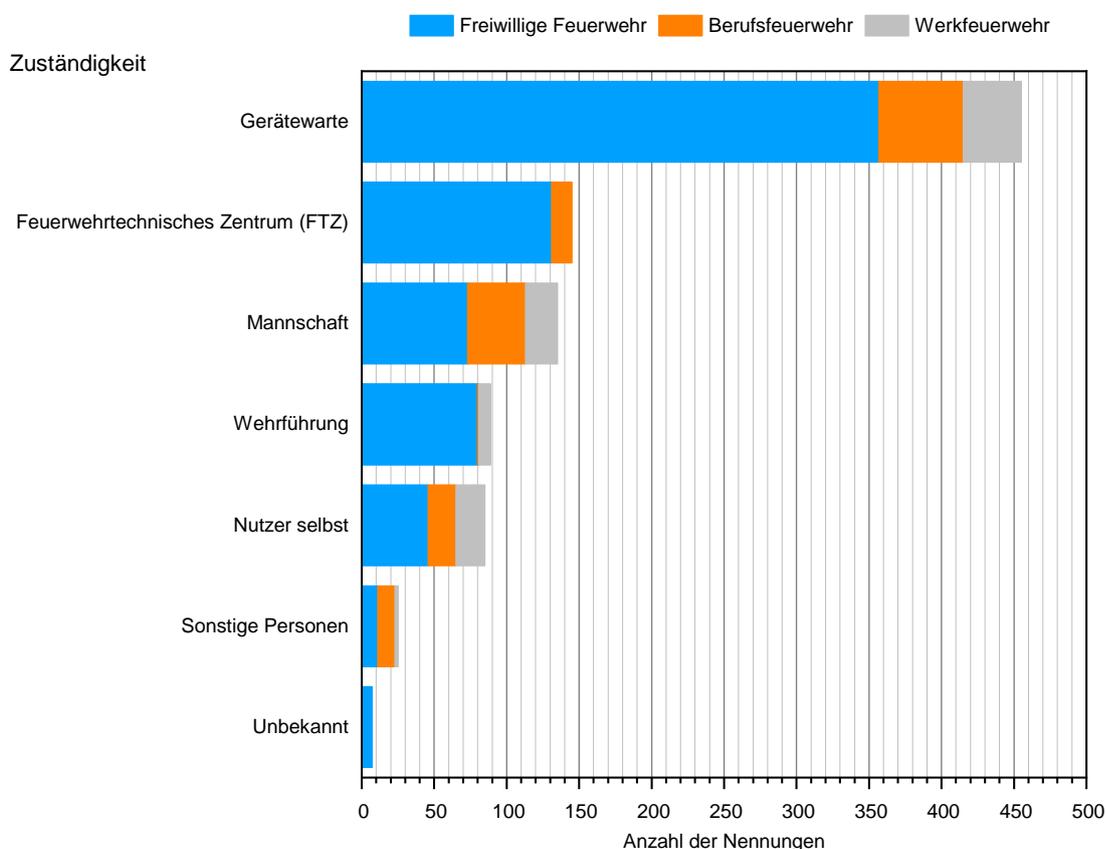


Abbildung 7: Zuständigkeit für Wartung und Prüfung von LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen in den Feuerwehren

Am häufigsten nimmt, unabhängig von der Feuerwehrart, der Gerätewart die Aufgaben für Wartung und Prüfung der Ausrüstungsgegenstände mit Lithium-Ionen-Technologie wahr. Danach erfolgt erst eine Differenzierung je nach Art der Feuerwehr. So wird vornehmlich die Wartung und Prüfung dieser Ausrüstungsgegenstände bei den Freiwilligen Feuerwehren durch die Feuerwehrtechnische Zentrale (FTZ) wahrgenommen. Im Gegensatz dazu wird dies bei den Berufsfeuerwehren und Werkfeuerwehren durch die Mannschaft ausgeführt.

Bei der Nennung von sonstigen Personen wurden oft die Werkstatt der Feuerwehr (Funk-, Geräte-, Atemschutzwerkstatt) oder der Hersteller für diese Aufgabe genannt.

Die Akzeptanz von Ausrüstungsgegenständen mit Lithium-Ionen-Technologie als Folge der Erfahrung mit diesen Gerätschaften wurde in der Umfrage ebenso erfragt. Dabei gaben 72 % der Teilnehmenden an, dass solche Ausrüstungsgegenstände einen hohen einsatztaktischen Wert besitzen. 65 % der Teilnehmenden nannten eine gute Akkulaufzeit als positive Erfahrung. Dem stehen 73 Personen (14 %) gegenüber, die angaben, dass diese Ausrüstungsgegenstände eine zu geringe Akkulaufzeit und zu hohe Kosten bei der Ersatzbeschaffung des LIB aufweisen. Mit Gerätedefekten wurden 8 % der teilnehmenden Personen konfrontiert. Im Anhang 3 ist eine Übersicht zu den Erfahrungen der Teilnehmenden, welche in Form von Freitexten geäußert wurden.

Des Weiteren wurden die Teilnehmenden befragt, ob Ausrüstungsgegenstände mit Lithium-Ionen-Technologie zu Vorkommnissen führten, die den Einsatz oder Personen gefährdet haben (vgl. Frage 25 im Anhang 2). Diese Daten, die vornehmlich kleinere Ereignisse und Beinahe-Ereignisse umfassen, z. B. durch technische Defekte mit geringem Schadensausmaß, liegen den Unfallkassen eventuell nicht in dieser Art vor. Die am häufigsten genannten Vorkommnisse wurden durch leere und aufgeblähte Lithium-Ionen Akkumulatoren verursacht. Dabei waren hauptsächlich Handlampen, Handfunkgeräte und Smartphones/Diensthandys betroffen. In Tabelle 2 sind die Angaben der Teilnehmenden zu Vorkommnissen mit solchen Ausrüstungsgegenständen nach Freiwilligen Feuerwehren und Feuerwehren mit hauptamtlichen Kräften untergliedert und zusammengefasst.

*Tabelle 2: Vorkommnisse mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen [30]*

<b>Ereignis</b>	<b>Schadenshöhe</b>
<b>Freiwillige Feuerwehren</b>	
Überladung von Akkus.	Keine Angabe
Defekter Akku führte zum Funktionsausfall einer Handlampe. Dadurch wurde nur die Handlampe beschädigt.	< 1.000 €
Entstehungsbrand in einem Einsatzleitwagen (ELW 1) durch eine defekte Fahrzeugladehalterung für Handfunkgeräte. Dabei wurden die Ladehalterung, das Funkgerät und der umgebende Kunststoff im Fahrzeug beschädigt.	< 10.000 €
Akkus aus Handfunkgeräten waren aufgebläht.	Keine Angabe
Ausfall mehrerer Handfunkgeräte nach sehr kurzer Zeit.	< 1.000 €
Schmorbrand einer Handlampe in einem Fahrzeug.	< 1.000 €

Kurzschluss an einem Handscheinwerfer in einem Fahrzeug. Danach war lediglich der Handscheinwerfer unbrauchbar.	< 1.000 €
Der Akku einer Handlampe hat sich selbstentzündet und einen Schmelbrand in einem Fahrzeug ausgelöst. Beschädigt wurden dabei nur die Handlampe und die Fahrzeugladehalterung.	< 1.000 €
Leere Akkus im Einsatzfall <i>(berichtet von insgesamt sieben Teilnehmenden)</i>	Keine Angabe
Aufgeteilte Akkus <i>(Leider sind aus der Aussage des Teilnehmenden keine weiteren Informationen hervorgegangen. Es ist nicht bekannt, was mit aufgeteilten Akkus gemeint ist.)</i>	< 1.000 €
Akku einer Handlampe hat sich aufgebläht und wurde rechtzeitig vor einer Entzündung entdeckt.	< 1.000 €
Defekter Überstromschutz eines Akkubohrhammers nach unsachgemäßer Benutzung. Sowohl der Bohrerhammer, als auch der verwendete Akku sind dadurch kaputtgegangen.	< 1.000 €
Brandentwicklung eines Diensthandy aufgrund von hohen Außentemperaturen. Das Diensthandy lag bei dem Ereignis auf einem Fensterbrett in der Sonne.	< 1.000 €
Selbstentzündung einer Knopfzelle im Schlüsselanhänger.	Keine Angabe
Akku eines Handfunkgeräts war nach sehr kurzer Zeit leer. Durch den Tausch des Funkgerätes verzögerte sich die Brandbekämpfung.	< 1.000 €
Einige Fahrzeuge stehen regelmäßig im Freien. Dabei kommt es im Sommer zu Überhitzungen der Akkus. Auch tiefe Temperaturen führen zu Problemen. Dadurch sind bereits viele Handfunkgeräte ausgefallen.	Keine Angabe
Auf dem Einsatzleitwagen wurde ein preiswertes Smartphone mit aufgeblähtem Akku entdeckt. Bevor ein Brand entstehen konnte, wurde das Gerät ausgebaut. Dabei wurden das Smartphone und die dazugehörige Ladehalterung beschädigt.	< 1.000 €
Entladener Akku bei einer Notfalltüröffnung.	< 1.000 €
Ausfall eines Funkgerätes mit angeschlossenem Headset bei Feuchtigkeit in einer Einsatzsituation. Durch den Dachstuhlbrand (Einsatzsituation) entstanden Brand- und Wasserschäden.	< 100.000 €
Schwacher Akku eines Handfunkgerätes. Das führte zum Ausfall des Gerätes.	< 1.000 €

Ereignis	Schadenshöhe
<b>Feuerwehren mit hauptamtlichen Kräften</b>	
Brand einer Handlampe in einer Fahrzeugladehalterung. Das Fahrzeug stand zu diesem Zeitpunkt in der Kfz-Werkstatt. Dabei wurde die Werkstatt und die sich darin befindliche Ausrüstung verrauchert.	< 100.000 €
Überladung von Akkus. Dabei wurden Fahrzeuge beschädigt.	< 100.000 €
Kurzschluss eines Gerätes in einer Ladeschale.	< 1.000 €
Entzündung zweier Akkus in einem Fahrzeug. Dabei wurden das Fahrzeug sowie das Feuerwehrgerätehaus beschädigt.	< 500.000 €
Fahrzeugbrand eines Lösch- und Hilfeleistungsfahrzeugs (LHF). <i>(Eine Brandursache wurde nicht genannt. Es wird davon ausgegangen, dass der Brand durch einen Ausrüstungsgegenstand mit Lithium-Ionen-Akku ausgelöst wurde.)</i>	< 500.000 €
Regelmäßig leere oder defekte Akkus hauptsächlich in Handfunkgeräten.	< 1.000 €
Defekte Handlampe in einem Fahrzeugladesystem hat einen Brand im Inneren des Fahrzeuges ausgelöst. Dabei wurden das Fahrzeug, das Gebäude und Ausrüstung beschädigt.	< 500.000 €
Defekte Handlampe.	< 1.000 €

Bei den 34 angegebenen Ereignissen sind 11 Ereignisse ohne Schadensangabe (davon 7 x leerer Akku im Einsatzfall), 16 Ereignisse mit einer Schadensangabe unter 1.000 €, 1 Ereignis unter 10.000 € und jeweils 3 Ereignisse mit Schadensangaben unter 100.000 € und unter 500.000 €. Den 11 Ereignissen ohne Schadensangabe kann eine Schadenshöhe unter 1.000 € zugewiesen werden. Damit sind 27 der 34 Ereignisse (79 %) unter 1.000 €.

Der Großteil der angegebenen Vorkommnisse mit einer Schadenshöhe unter 1.000 € fand bei den Freiwilligen Feuerwehren statt. Eine Ausnahme stellt das Ereignis dar, das vermutlich den

Gesamtschaden des primären Einsatzes mit < 100.000 € (Dachstuhlbrand) und nicht den Schaden durch das Vorkommnis angab. Bei den Feuerwehren mit hauptamtlichen Kräften lag die Schadenshöhe meistens oberhalb von 10.000 €, u. a., weil ganze Fahrzeuge und/oder Gebäude nachfolgend durch das Vorkommnis involviert waren.

Zur Verhütung solcher zuvor genannten Vorkommnisse und damit einhergehend möglicher Unfälle sollten Gefährdungsbeurteilungen und Handlungsanweisungen erstellt werden. Die Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung ist nach der DGVU Information 205-021 [42, 50] die Pflicht des Trägers einer Feuerwehr. Die DGVU fordert die Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung: „...

- bei Beschaffung und Umrüstung von Arbeitsmitteln (z.B. Werkzeuge, Maschinen) ...
- nach Unfällen oder Beinaheunfällen im Feuerwehrdienst oder tätigkeitsbedingten Erkrankungen ...
- bei Hinweisen zu gefährlichen Situationen, z.B. von Behörden, Unfallversicherungsträgern oder Feuerwehrverbänden ...“.

Innerhalb der Umfrage wurde deshalb abgefragt, inwieweit eine Gefährdungsbeurteilung und Handlungsanweisung zu Geräten mit Lithium-Ionen-Technologie in den Feuerwehren vorliegen. In Abbildung 8 wurden diese Ergebnisse grafisch dargestellt.

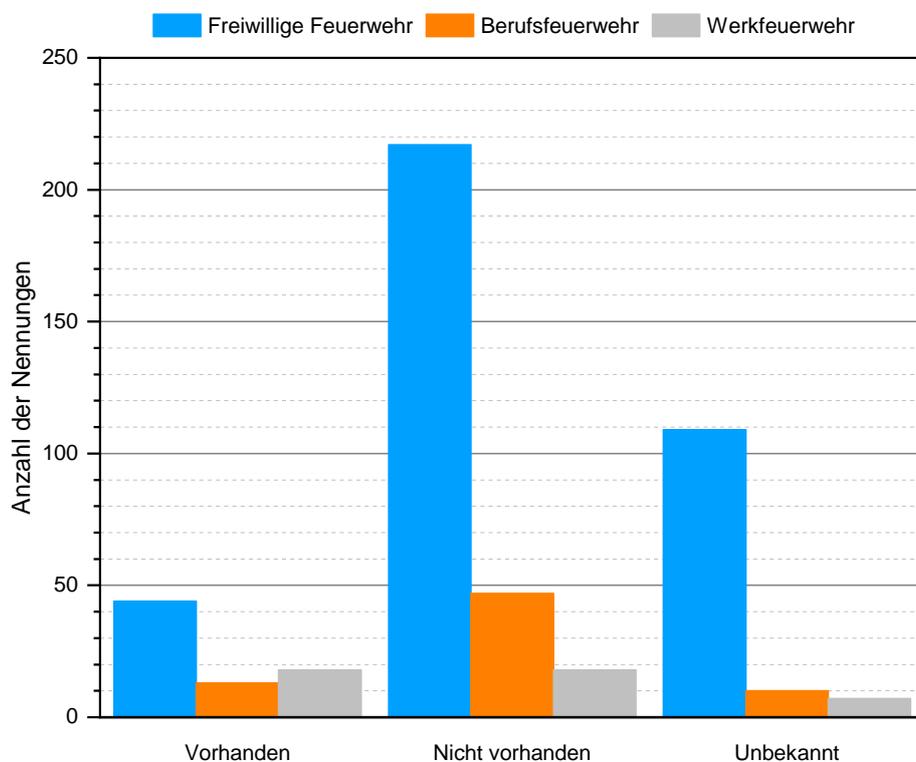


Abbildung 8: Angaben zum Vorhandensein von Gefährdungsbeurteilungen und Handlungsanweisungen zu den in den Feuerwehren vorhandenen Ausrüstungsgegenständen mit Lithium-Ionen-Technologie

Deutlich sticht in der Abbildung 8 der Anteil der Antworten hervor, der die Frage nach der Existenz einer Gefährdungsbeurteilung und Handlungsanweisung für diese mit LIB

betriebebenen Ausrüstungsgegenstände mit „Nicht vorhanden“ beantwortete. Dies sind 58 % der Teilnehmenden. Zudem trifft diese Aussage für alle Feuerwehrrarten zu. Auch die Unkenntnis darüber, ob Gefährdungsbeurteilungen und Handlungsanweisungen existieren, ist mit 26 % der Teilnehmenden besorgniserregend. D. h. 408 von 483 Teilnehmenden (84 %) sind hinsichtlich des Einsatzes unvorbereitet, wenn sie Ausrüstungsgegenstände mit Lithium-Ionen-Technologie einsetzen. Diese Zahl ist alarmierend. Kenntnis von solchen Gefährdungsbeurteilungen und Handlungsanweisungen zu haben, gaben lediglich 16 % der Teilnehmenden an.

### **3.3 Nebenergebnisse**

Im Rahmen der Datenerhebung wurde der Trend für einen möglichen zukünftigen Erwerb von LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen erfragt. Ziel dieser Informationsabfrage war es, eine vorausschauende Einschätzung für anstehende Erfordernisse im Feuerwehrralltag geben zu können. Von allen Teilnehmenden an der Umfrage erklärten 59 %, Ausrüstungsgegenstände dieser Art beschaffen zu wollen, wobei im Mittel 7 LIB betriebene Ausrüstungsgegenstände in der Beschaffung angestrebt sind. Die Abbildung 9 stellt die Verteilung der genannten Ausrüstungsgegenstände nach Organisation und Nennungsanzahl dar. Eine Beschaffung von Fahrzeugen mit Elektroantrieb gaben in dem themenbezogenen Freitextfeld der Umfrage 13 % (66) der Teilnehmenden an.

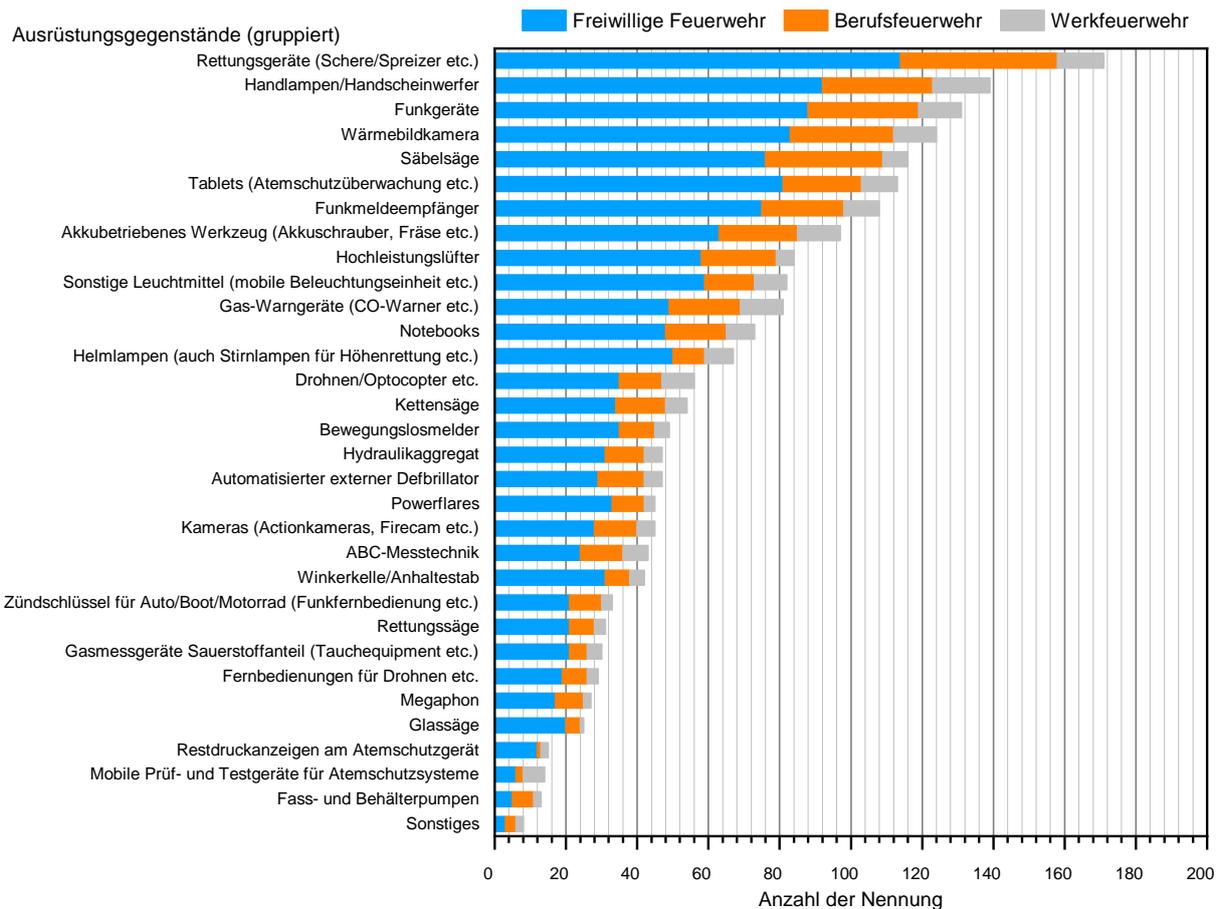


Abbildung 9: Verteilung der zukünftigen Beschaffung von LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen in Abhängigkeit von der Organisation und Anzahl der Nennung

Bemerkenswert ist, dass die Feuerwehren bestrebt sind, die vorhandenen Rettungsgeräte durch Rettungsgeräte mit Lithium-Ionen-Technologie zu ersetzen. Der große Vorteil der LIB, die hervorragenden Verhältnisse zwischen Volumen/Masse zur Leistungsfähigkeit, könnte hierfür vermutlich der Grund sein. Durch diese Geräte könnten die Masse und das Volumen bei der Beladung der Fahrzeuge reduziert werden. Weiterhin wäre die Unfallgefahr für die Einsatzkräfte, insbesondere bei hydraulisch betriebenen Geräten (z. B. Schere, Spreizer, Rettungszylinder usw.), reduziert. Die Gefahr über die Hydraulikleitungen zu stolpern, wäre dadurch beseitigt. Daneben planen die Feuerwehren mit hauptamtlichen Kräften die Neubeschaffung zusätzlicher Ausrüstungsgegenstände mit Lithium-Ionen-Technologie. Dies legt nahe, dass die Rettungskräfte einen höheren Verschleiß durch eine höhere Nutzungsfrequenz vermuten, den sie durch den Neuzugang kompensieren wollen.

Ein weiteres Interesse lag in einer Bestandsaufnahme zu den privat erworbenen Ausrüstungsgegenständen, die mit LIB betrieben werden. Hierauf antworteten 103 Teilnehmende insgesamt. Bei der Auswertung der Umfrageergebnisse wurde festgestellt, dass vornehmlich Angehörige der Freiwilligen Feuerwehren (95 von 103 Teilnehmende [30]) privat solche Ausrüstungsgegenstände erworben haben und diese im Einsatz nutzen. In der

Abbildung 10 sind privat erworbene mit LIB betriebene Ausrüstungsgegenstände in Abhängigkeit von der Organisation und der Anzahl der Nennungen abgebildet.

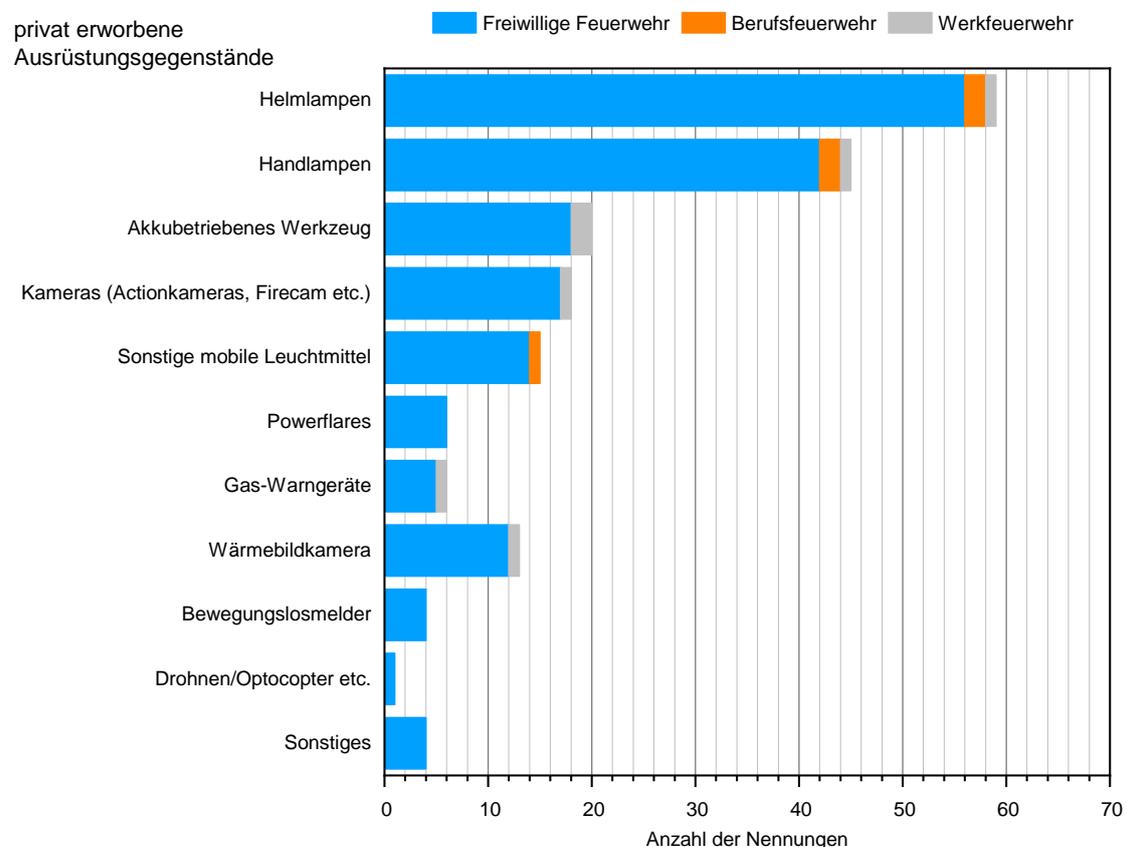


Abbildung 10: Privat erworbene Ausrüstungsgegenstände mit LIB in Abhängigkeit von der Organisation und der Anzahl

Helmlampen und Handlampen werden entsprechend der Umfrage häufig in allen drei Organisationsformen der Feuerwehr privat erworben. Die Ursachen hierfür sind vielschichtig. Die Organisationen stellen nicht ständig neue Ausrüstungsgegenstände zur Verfügung, weil ein Gerät ausgesondert wurde oder ein neuer Modelltyp auf dem Verkaufsmarkt erschienen ist. Zudem führt die Unzufriedenheit mit den Leistungseigenschaften (Standzeit, Leistung etc.) vorhandener Ausrüstung und der Habitus neuer Modelle, „Will haben, weil cool“ wie von Obergöker [5] aufgeworfen, zum Privaterwerb solcher Gegenstände.

In der Vergangenheit sind Gegenstände, die zum Privatbesitz zählen und mit Lithium-Ionen-Technologie betrieben werden z. B. Handys, immer wieder in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt worden. Besonders, wenn diese Gegenstände Fehlfunktionen im Kontext der Lithium-Ionen-Technologie aufwiesen [51–53]. Grundsätzlich dürfen solche Gegenstände nicht im Einsatz mitgeführt werden. Jedoch tauchen nach prägnanten Einsätzen unterschiedlichster Art in den Netzwerken bspw. Fotos und Filmsequenzen auf, die viral verteilt werden.

Hieraus ergab sich die Frage nach den privaten Gegenständen mit Lithium-Ionen-Technologie, welche zum Einsatz mitgeführt werden. In der Abbildung 11 sind die Antworten der

Teilnehmenden zu typischen privaten Gegenständen in Abhängigkeit zur Organisation und Anzahl der Nennungen dargestellt.

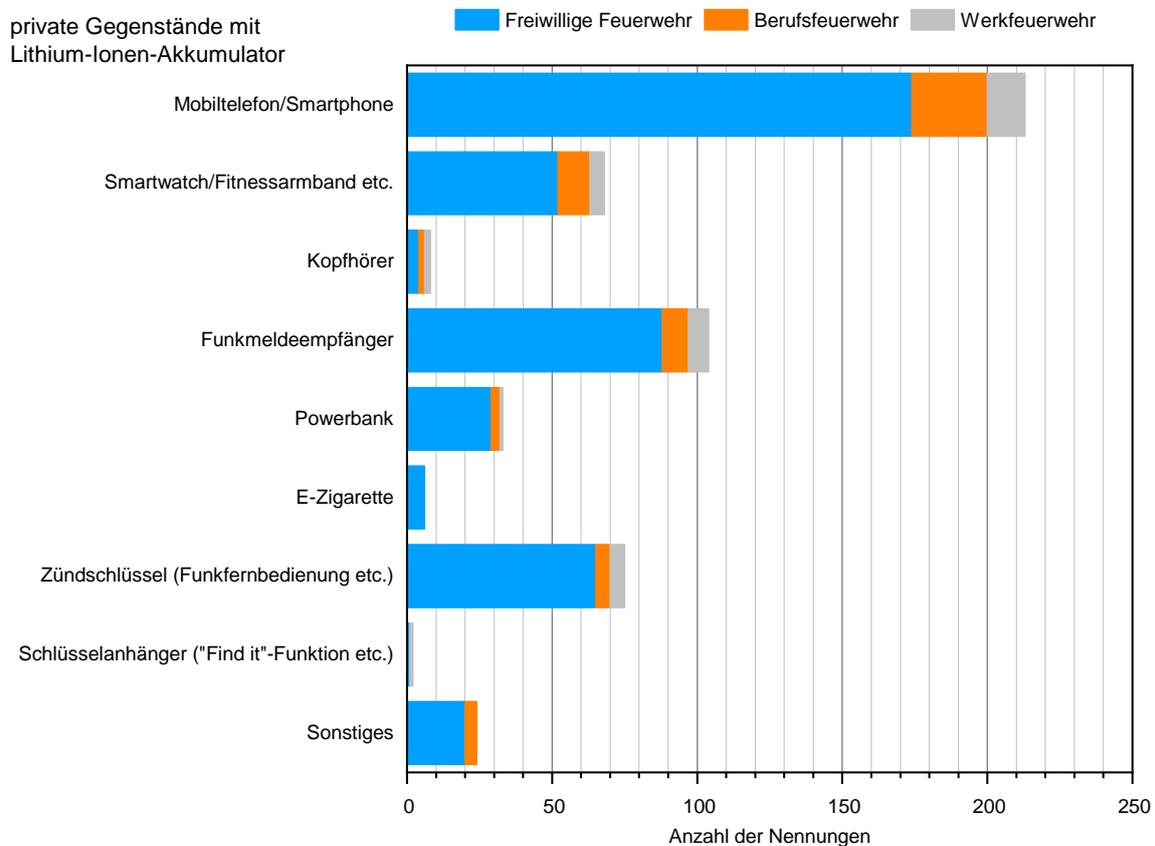


Abbildung 11: Mitgeführte private LIB betriebene Gegenstände im Einsatzfall

Das Mitführen von privaten Gegenständen erklärten 219 Teilnehmende bei der Beantwortung der Umfrage. Ganz konkret das Handy mit in den Einsatz genommen zu haben, gaben 213 Teilnehmende (97 % die nur auf diese Frage antworteten) an. Werden die 213 Personen auf die Gesamtzahl der Umfrageteilnehmenden bezogen, sind dies 47 %. D. h. fast die Hälfte der Einsatzkräfte trägt ein Handy im Einsatzfall bei sich.

Im vorangegangenen Abschnitt wurde aufgezeigt, welche Behandlung die LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstände nach dem Einsatz erfahren. In diesem Kontext war wissenswert, welchen Vorgaben bei den Feuerwehren existieren, um die LIB wieder aufzuladen. Die Abbildung 12 zeigt die Antworten der Feuerwehrkameraden zum Ladeverhalten der mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstände nach dem Einsatz. Auffallend ist, dass die Feuerwehren am häufigsten eine kontinuierliche Ladung dieser Ausrüstungsgegenstände vornehmen. Dieses Verhalten wird maßgeblich durch die auf den Fahrzeugen montierte Technik, welche von den Ausrüstungsherstellern beim Erwerb des Gegenstandes oft ebenso angeboten wird, begünstigt. Somit ist eine schnelle und unkomplizierte Wiederherstellung der Einsatzbereitschaft des Ausrüstungsgegenstandes gegeben.

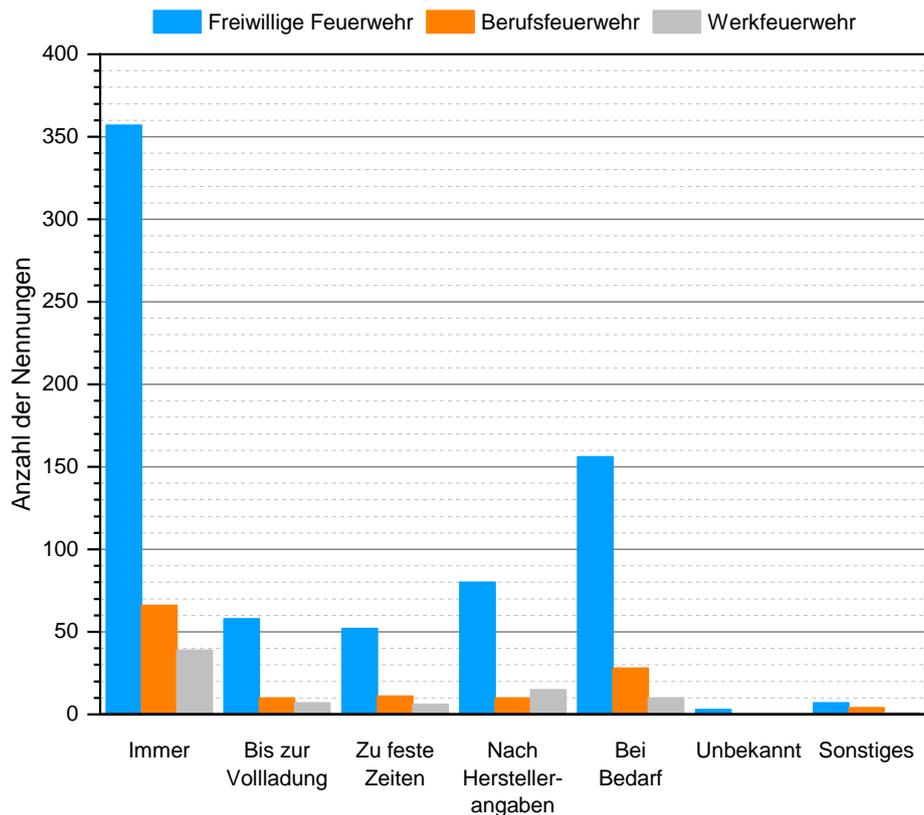


Abbildung 12: Ladeverhalten von Ausrüstungsgegenständen mit LIB durch die Feuerwehren

Das Laden der Ausrüstungsgegenstände nach Bedarf beruht vermutlich auf der Tatsache, dass nicht für alle Ausrüstungsgegenstände Ladeschalen auf dem Fahrzeug verbaut sind, da diese zu groß bzw. zu platzraubend auf dem Fahrzeug sind. Gleichfalls sind hier auch Geräte zu nennen, die eine geringe Einsatzfrequenz besitzen und dadurch selten geladen werden müssen. Auch Geräte von einem Hersteller, die mit einem Akkumulator arbeiten und zeitgleich eingesetzt werden, gehören hierzu.

Im Punkt „Sonstiges“ gaben die Feuerwehren detaillierter an, das bspw. nicht alle Geräte kontinuierlich geladen werden oder definierte Entlade- und Aufladezyklen existieren. Bemerkenswert bei diesen Angaben war eine Aussage, die auf modernere Ladeschalen verwies, welche einen sogenannten intelligenten Ladevorgang vollziehen. Diese Ladeschalen sind zusätzlich vorhanden und nicht auf den Fahrzeugen montiert. Sie dienen der Erhöhung der Lebensdauer von LIB.

Bei Erstellung des Fragebogens wurde vermutet, dass die Verantwortung für diese LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstände nicht einheitlich bei allen Feuerwehren identisch ist. Aus diesem Grunde wurde eine weitere Frage in die Datenerhebung eingebaut, die sich mit der Unterweisung zu diesen Ausrüstungsgegenständen bei den Feuerwehren beschäftigt. In der Abbildung 13 sind die Ergebnisse dieser Fragestellung abgebildet, wobei nach der Unterweisungssituation im Umgang mit LIB einerseits bei den Gerätewarten und andererseits bei den Mannschaften hinterfragt wurde.

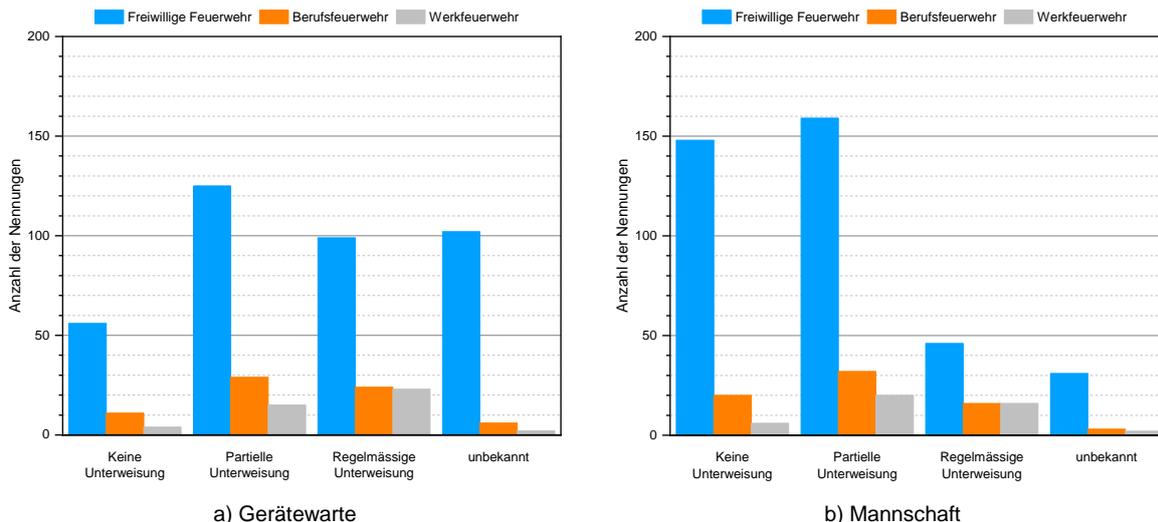


Abbildung 13: Unterweisungssituation im Umgang mit LIB für a) Gerätewarte und b) Mannschaft

Auffällig bei den Antworten zu dieser Frage ist, dass die Gerätewarte aller Feuerwehren (vgl. Abbildung 13a) größtenteils regelmäßig oder partiell unterwiesen sind. Im Bereich der Freiwilligen Feuerwehren sind dies 59 % der Teilnehmenden. Dem gegenüber stehen jedoch 41 % der Teilnehmenden aus dem Bereich der Gerätewarte der Freiwilligen Feuerwehren, die keine Unterweisung erhielten bzw. nicht wissen, ob sie eine erhalten haben. Bei den hauptamtlichen Gerätewarten ist der Anteil wesentlich kleiner und liegt bei 24 % (Berufsfeuerwehr) bzw. 14 % (Werkfeuerwehr) der Teilnehmenden.

Eine unzureichende Schulung im Umgang mit LIB ist im Fall der Mannschaft erkennbar (vgl. Abbildung 13b). Eine regelmäßige Schulung der Mannschaft wird bei der Freiwilligen Feuerwehr von 12 %, bei der Berufsfeuerwehr von 23 % und bei der Werkfeuerwehr von 36 % bezogen auf die Gesamtanzahl der Teilnehmenden je nach Art der Feuerwehr durchgeführt. Diese Zahlen sind bedenklich, insbesondere, weil Wartungs- und Prüfungsaufgaben der Ausrüstungsgegenstände mit Lithium-Ionen-Technologie zwar am häufigsten bei den Gerätewarten, aber auch bei der Mannschaft und dem Nutzer selbst (vgl. Abbildung 7) liegen. Alarmierend sind des Weiteren die Anteile bei den Antworten der Feuerwehren mit hauptamtlichen Kräften. Hier gaben die Teilnehmenden an, nicht oder nur partiell im Umgang mit LIB geschult zu sein. Jedoch liegt auch hier nach dem Gerätewart der Punkt „Wartung und Prüfung“ bei der Mannschaft und dem Nutzer selbst.

In einem abschließenden Punkt in der Umfrage wurden die Teilnehmenden auf die individuelle Einschätzung zum Risiko von LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen fokussiert. Insbesondere durch die Zunahme der Elektromobilität auf den Straßen und der damit einhergehenden Verunsicherung der Einsatzkräfte bei der Brandbekämpfung von solchen Fahrzeugen wurde vermutet, dass die Einsatzkräfte das Risiko der Ausrüstungsgegenstände ebenso kritisch betrachten. In der Abbildung 14 sind die Antworten der Teilnehmenden dargestellt.

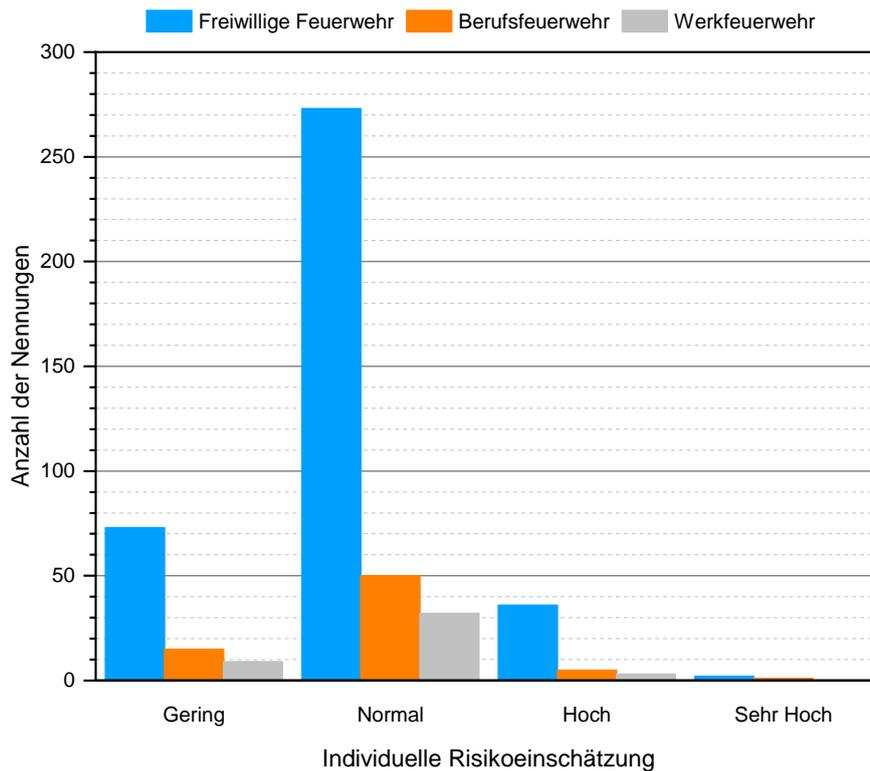


Abbildung 14: Individuelle Risikoeinschätzung der Teilnehmenden im Umgang mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen

Aus der Abbildung 14 ist ersichtlich, dass die meisten Teilnehmenden unabhängig von der Feuerwehrtzugehörigkeit das Risiko der mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstände genauso oder teilweise sogar geringer einschätzen, als das Risiko bei der Verwendung bisheriger herkömmlicher Ausrüstungsgegenstände. Lediglich 9 % der Befragten aller Feuerwehren schätzten das Risiko als hoch oder sehr hoch ein.

Damit ist die in diesem Punkt vermutete kritische Einschätzung des Risikos der Teilnehmenden nicht eingetreten. D. h., die Unsicherheiten der Feuerwehren, die im Bereich der Elektromobilität in jüngster Zeit auftreten, wirken sich nicht auf den Umgang mit der gleichen Technik im Einsatzdienst aus.

### 3.4 Ableitungen aus der Analyse

Die durchgeführte Datenerhebung bei den deutschen Feuerwehren hat neue Erkenntnisse zur Thematik der Ausrüstungsgegenstände mit Lithium-Ionen-Technologie geliefert. Auch wenn die Umfrage infolge ihrer Reichweite nicht von dem Gros der deutschen Feuerwehren beantwortet wurde, bildet sie den Trend in den deutschen Feuerwehren stichprobenartig ab. Diese gewonnenen Erkenntnisse zeigen die positive Akzeptanz der modernen Technik in den Feuerwehren auf, welche die Stärken dieser Technologie zu schätzen wissen. Jedoch werden auch Defizite aufgedeckt. Diese positiven und negativen Aspekte sollen an dieser Stelle zusammengefasst werden.

Bemerkenswert ist die Vielzahl der Ausrüstungsgegenstände mit LIB, die im alltäglichen Einsatzdienst vorgehalten und schließlich auch angewendet werden. Dass dieser Prozess der Umrüstung von älteren auf modernere Ausrüstungsgegenstände nicht abgeschlossen ist, sondern in Abhängigkeit von Finanzierungsmitteln und Dringlichkeit zukünftig weiter realisiert wird, zeigt, dass die deutschen Feuerwehren der modernen Technik positiv gegenüberstehen. Mit derartigen Geräten werden Arbeitsschritte erleichtert und die Effektivität im Einsatz erhöht. Dies spiegelt sich gleichfalls in der individuellen Risikoeinschätzung zu diesen Ausrüstungsgegenständen wider. Ihre „Gefährlichkeit“ bzw. „Sicherheit“ wird nur selten als höher bzw. niedriger eingeschätzt im Vergleich zur altbewährten Technik mit Alkali-Batterien, fossilen Energieträgern oder der Stromversorgung aus einer Netzstromquelle.

Beachtenswert ist, dass bei den Feuerwehren mit hauptamtlichen Kräften ausschließlich und bei den Freiwilligen Feuerwehren nahezu vollständig den Hersteller-Forderungen und den Normen Folge geleistet wird, indem originale LIB in den Ausrüstungsgegenständen verwendet werden. Dadurch ist eine mögliche Gefahrenquelle ausgeschlossen.

Positiv zu bewerten ist ebenso, dass bei den meisten Feuerwehren Wartung und Prüfung der LIB-betriebenen Ausrüstungsgegenstände bei den Gerätewarten ggf. beim zuständigen FTZ der Feuerwehren angesiedelt ist. Somit obliegt einem bestimmten Personenkreis die Sicherheit der Gegenstände entsprechend den Vorgaben durch die Hersteller. Eine zusätzliche Prüfung durch die Mannschaft bzw. den Nutzer selbst unmittelbar nach dem Einsatz und bevor die Ausrüstungsgegenstände wieder in die Ladeschalen verbracht werden, ist wünschenswert. Jedoch zeigen sich hier erste markante Unterschiede zwischen den Feuerwehren mit hauptamtlichen Kräften und den Freiwilligen Feuerwehren (vgl. Abbildung 13). So wird eine grobe Reinigung und Unversehrtheitsprüfung durchgeführt. Jedoch bleibt im Unklaren, was mit den Ausrüstungsgegenständen danach passiert. Nur ein geringer Teil der Feuerwehren realisiert einen getrennten Transport bis zur Reinigung und Prüfung durch den Gerätewart oder das FTZ. Damit entsprechen diese Feuerwehren den Vorgaben der Einsatzstellenhygiene. Nicht zulässig ist die unmittelbare Verbringung der Gegenstände ohne Säuberung und Sichtprüfung in die Ladeschale nach dem Einsatz. Insbesondere bei älteren Modellen sind die Gegenstände oder die Ladeschalen nicht optimal konzipiert, so dass anhaftende wetter- oder einsatzbedingte Kondensate (Wasser, aggressive Rauchgasbestandteile, etc.) an den Geräteoberflächen Kriechströme begünstigen und letztlich zu Kurzschlüssen führen können. Aus Sicht der Hygiene und der Sicherheit ist eine Sensibilisierung der Einsatzkräfte zwingend notwendig.

Inwieweit diese Verhaltensweisen im Bezug zu den Vorkommnissen in den Feuerwehren stehen, kann nicht rekapituliert werden. Jedoch sollten die hauptamtlichen Feuerwehren, welche bei den angegebenen Vorkommnissen hohe Schadenshöhen aufwiesen, prüfen, welche Maßnahmen nach dem Einsatz für die Ausrüstungsgegenstände mit eingesetzten LIB

vorgegeben sind und ob diese entsprechend umgesetzt werden. Die Freiwilligen Feuerwehren weisen zwar eine höhere Anzahl an Vorkommnissen auf, sie sind jedoch achtsamer mit der entsprechenden Technik. Hier sind die Schadenshöhen deutlich niedriger.

Ein Resümee hinsichtlich möglicher Gefahrenquellen beim Ladeverhalten von LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen ist schwer feststellbar. Eine stetige Aufladung bestimmter Gerätegruppen wie Funkgeräte oder Lampen, die ständig einsatzbereit sein müssen, ist nachvollziehbar. Ebenso verständlich ist, dass andere Gerätegruppen (z. B. Glassäge), deren Einsatzhäufigkeit geringer ist, wieder voll aufgeladen oder zu bestimmten Zeiten oder nach Bedarf geladen werden. Vorbildlich handeln hierbei die Feuerwehren, die diese Technik mit Lithium-Ionen-Technologie gemäß den Vorgaben durch die Hersteller laden und die sogenannten Ladezyklen im definierten Zeitrhythmus mit vollständiger Entladung und Aufladung vollziehen.

Es ist bedauerlich, dass in vielen Feuerwehren keine Gefährdungsbeurteilungen und Handlungsanweisungen vorhanden sind bzw. unbekannt ist, ob solche in ihren Feuerwehren existieren. Hier werden die Feuerwehren dringend aufgefordert, diesen Mangel zu beseitigen, um Unfälle durch Ausrüstungsgegenstände mit LIB zu vermeiden.

Die Rechtskonformität des Einsatzes von privat erworbenen Ausrüstungsgegenständen mit der Lithium-Ionen-Technologie ist kritisch einzustufen. Auch wenn ihr Anteil nicht hoch ist und dieser maßgeblich bei den Freiwilligen Feuerwehren vorzufinden ist, so ist hier die Frage nach der Rechtssicherheit, der Wartung und der Prüfung zu stellen.

Gravierender stellt sich die Mitnahme von mit LIB betriebenen Privatgegenständen im Einsatz dar. Die Angehörigen der Feuerwehren müssen intensiver darüber belehrt werden, dass die Mitnahme privater Ausrüstungsgegenstände in den Einsatz untersagt ist. Diese Geräte sind weder für den Einsatzdienst ausgelegt noch getestet. Sie sind besonders im Fall der Brandbekämpfung eine zusätzliche Gefahrenquelle.

## **4 Versuchsaufbau und -durchführung**

### **4.1 Untersuchungsobjekte**

Resultierend aus der Datenerhebung zu LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen bei der Feuerwehr [30] wurden insgesamt 31 Gerätegruppen identifiziert, die im Einsatzdienst verwendet werden. Hiervon können folgende acht Gerätegruppen den extremen Umgebungsbedingungen der Brandbekämpfung ausgesetzt sein:

1. Handlampen/ Handscheinwerfer,
2. Funkgeräte,
3. Funkmeldeempfänger,
4. Wärmebildkamera,
5. Helmlampen,
6. Bewegungslosmelder,
7. Kameras,
8. elektronische Restdruckanzeigen am Atemschutzgerät.

Die o. g. acht Gerätegruppen sind nach abnehmender Häufigkeit in der Nennung geordnet (s. auch Abbildung 4).

Bewegt sich ein Angriffstrupp bei der Innenbrandbekämpfung, so ist dabei die Helmlampe durch ihre exponierte Position am Helm den rauen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Sie wird vor allen anderen Ausrüstungsgegenständen diesen Bedingungen widerstehen müssen. Aus diesem Grund wurden für die nachfolgenden Untersuchungen eine Helmlampe und eine Knickkopflampe ausgewählt. Beide Modelle sind mit LIB betrieben.

### **4.2 Auswahl der Einsatzszenarien**

Die Ausrüstungsgegenstände der Feuerwehr müssen aufgrund der Einsatzlagen extreme Bedingungen verkraften (vgl. Kapitel 2.2). Daher sind spezielle Anforderungen an die Ausrüstungsgegenstände zu stellen. Diese müssen sich in den simulierten Einsatzszenarien der experimentellen Untersuchungen widerspiegeln.

Die Einsatzkräfte sind im Brandeinsatz einer hohen Luftfeuchtigkeit (nahezu gesättigte Bedingungen) und hohen Temperaturen ausgesetzt. Beide Parameter müssen sich in den Experimenten wiederfinden.

Eine Einsatzkraft ist in ihrer Einsatzzeit durch den Luftvorrat und die körperliche Belastbarkeit limitiert. Als Faustregel gilt eine Einsatzzeit von maximal 30 min. Damit ist ein weiterer Parameter definiert. Weiterhin ergab die Marktanalyse, dass im Durchschnitt eine

Gesamtleuchtdauer für Knickkopflampen bei 4 h und für Helmlampen bei 3 h liegt (Bedingung: neuwertige Lampe, 100 % Akku-Ladung). Hieraus wurde abgeleitet, dass anstehende Untersuchungen sowohl 30 min als auch 3 h andauern sollten.

Es ist nicht auszuschließen, dass in Einsätzen die Ausrüstungsgegenstände mehrfach in die raue Umgebung müssen, weil die Einsatzkraft nach entsprechender Ruhezeit wieder aktiv Brandbekämpfungsmaßnahmen durchführt oder aber der Gegenstand an eine andere Einsatzkraft übergeben wird. Hieraus ergibt sich, dass Experimente mit der kurzen Zeitdauer von 30 min dreimalig wiederholt wurden.

Weiterhin soll der Einsatz möglichst originalgetreu dargestellt werden. Bei der Knickkopflampe bedeutet dies aufgrund der unterschiedlichen Befestigung an der Einsatzjacke, dass diese sowohl per Clip vor der Brusttasche als auch in die Brusttasche eingesteckt sein kann. Daraus folgt, dass in den Experimenten die Knickkopflampe an beiden Positionen der Einsatzjacke getestet werden sollte, wobei Experimente ohne Einsatzjacke, die Befestigung mit dem Clip an der Brusttasche widerspiegeln. Der Oberstoff der Einsatzjacken kann je nach Hersteller verschiedenen sein.

Außerdem soll das Szenario der Kaltlagerung/Einsätze bei Temperaturen um 0 °C und anschließender Verwendung im Brandbekämpfungseinsatz betrachtet werden.

Um die Gesamtheit der Parameterschar reproduzierbar zu gestalten, wurden die Experimente im Labor durchgeführt.

Neben diesem simulierten Einsatzszenario im Klimaschrank (Abbildung 15) wurden ausgewählte Versuche in einer Versuchskammer (Abbildung 17) durchgeführt. Diese besaß eine höhere Beständigkeit gegen offene Flammen, Wärmestrahlung und auftretende Rauchgase.

Somit werden in der Versuchskammer ausschließlich Experimente durchgeführt, bei denen ein thermal runaway vermutet wird. Hierzu zählen ein Fehler in dem LIB selbst, starke Beaufschlagung durch Wärmestrahlung (Rauchgasschicht) und die Teil- oder Gesamtbeflammung des Ausrüstungsgegenstandes. Zusätzlich wird ein ausgebauter LIB (ohne den Ausrüstungsgegenstand) hinsichtlich seiner Beständigkeit gegenüber einer direkten Beflammung getestet.

Abschließend wird die chemische Beständigkeit der Gehäuse (Material APS-V0-Acrylnitril/Butadien/Styrol) mit Brandbeständigkeit V0<sup>1</sup> an ausgewählten Substanzen getestet, die vornehmlich im Rauchgas enthalten sind und deren Aggressivität mit der Temperatur steigt.

---

<sup>1</sup> V0 bedeutet selbstverlöschend bis spätestens 10 Sekunden, brennende Tropfen sind nicht zulässig, Nachglimmen maximal 30 Sekunden [55])

## 4.3 Simulierte Einsatzszenarien im Labor

### 4.3.1 Wärme- und Feuchtebelastung im Kälte-Wärme-Prüfschrank

In Tabelle 3 ist die Matrix für die Versuchsparameter der simulierten Einsatzszenarien im Labor dargestellt. Diese basieren auf den im Kapitel 2.2 und 4.2 getroffenen Aussagen zu den Einsatzszenarien.

Tabelle 3: Übersichtsmatrix der vordefinierten Versuchsparameter im Kälte-Wärme-Prüfschrank

Temperatur	Relative Luftfeuchte	Messzeit	Bedingungen
T	rF	t	
85 °C	0 %	4 h	
85 °C	100 %	4 h	
85 °C	100 %	3 x 30 min	
85 °C	0 %	4 h	In Einsatzjacke aus Obermaterial 1 (Brusttasche, vgl. Abbildung 22)
85 °C	0 %	4 h	In Einsatzjacke aus Obermaterial 2 (Brusttasche, vgl. Abbildung 22)
-5 °C	0 %	Lagerung: ≈ 3 h Einsatz: ≈ 2 h	Lagerung und anschließendem Einsatz bei T = 85 °C und rF ≈ 0 %

Die angegebenen Parameter für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit (s. Tabelle 3) sind die im Programm des Kälte-Wärme-Prüfschranks programmierten Soll-Werte.

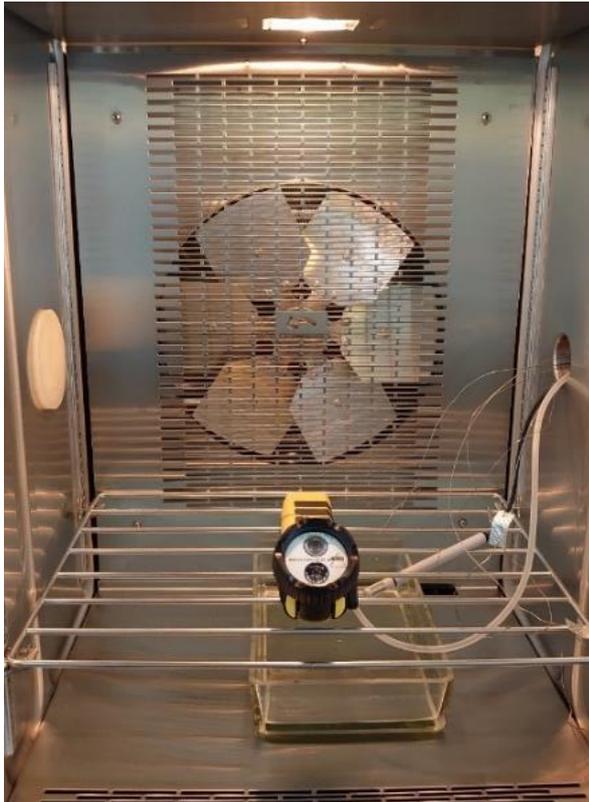
Jedes Parameterset wurden in drei Versuchen pro Lampentyp (Helmlampe/ Knickkopflampe) an jeweils zwei Exemplaren des Lampentyps durchgeführt. Die Lampen wurden vor Versuchsbeginn zu 100 % (Ausnahme: 3 x 30 min Versuche) aufgeladen. Die Experimente begannen jeweils mit voller aktivierter Leuchtkraft der Lampe (Status der Helmlampe: Normalmodus; Status der Knickkopflampe: Hauptlicht & Pilotlicht).

### 4.3.2 Experimenteller Aufbau und Messtechnik der Laborexperimente

Die Experimente zu den simulierten Einsatzszenarien im Labor gemäß der Parametermatrix (vgl. Tabelle 3) wurden in einem Kälte-Wärme-Prüfschrank der Firma Weiss durchgeführt. Der Prüfrinnenraum besitzt die Innenmaße 680 mm x 540 mm x 820 mm (B x H x T). Das Gerät ermöglicht die Vorwahl der Parameter Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit. Diese können per Programmierung auf einem konstanten Wert gehalten werden. Auch die Programmierung von Rampen (zeitabhängiges Abfahren von Temperaturwerten) ist möglich. Der

Einstellbereich liegt für die Temperatur zwischen  $-75\text{ °C}$  –  $180\text{ °C}$  und für die relative Luftfeuchte zwischen  $10\text{ – }98\text{ \%}$ .

Die Abbildung 15 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Versuchs im Wärme-Kälte-Prüfschrank mit einer Knickkopflampe (hier ohne eingeschaltetem Licht). Der nachfolgend beschriebene Aufbau und die Positionierung der Messsensoren im Innenraum des Prüfschranks blieben bei Versuchen mit Helmlampen bestehen.



Die Prüfobjekte wurden auf ein Edelmetallgitter ca.  $10\text{ cm}$  über den Prüfschrankboden platziert. Unterhalb des Prüfobjektes auf dem Prüfschrankboden wurde eine temperaturbeständige Glaswanne zum Auffangen möglicher fluider Substanzen gestellt. Durch eine verschließbare Seitenöffnung im Prüfschrank wurden Thermoelemente, ein Druck- und ein Feuchtesensor eingeführt. Die Messdaten wurden mittels einer Ahlborn-Messbox vom Typ Almemo 8990-6 alle  $6\text{ min}$  erfasst. Während des Experiments wurde mit dem Ventilator des Prüfschranks eine Gleichverteilung der vorgegebenen Parameter im Prüfinnenraum erzeugt. Dabei war der Prüfinnenraum verriegelt.

*Abbildung 15: Versuchsaufbau mit Knickkopflampe im Wärme-Kälte-Prüfschrank der Fa. Weiss*

In der Tabelle 4 sind die verwendeten Messsensoren der Experimente im Wärme-Kälte-Prüfschrank angegeben. Es sind neben der Bezeichnung, die Art des Messensors und die Lage im experimentellen Aufbau angegeben.

Tabelle 4: Lage, Art und Typ der verwendeten Sensoren

Bezeichnung	Typ	Lage
T1	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 0,5 mm	im Inneren der Lampe, direkt neben dem Akkumulator
T2	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	außen direkt an der Lampe
T4	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	unter der Lampe in der Auffangwanne
T5	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	am Gitter
Feuchtefühler	Kapazitiv; Typ FHA646 mit Taupunkt	auf dem Gitter liegend oder auf der Jacke
barometrischer Drucksensor	Piezoresistiver Drucksensor; Messbereich 700 – 1050 mbar	auf dem Prüfobjekt liegend

Die Thermoelemente T4 und T5 dienen zur Überwachung der homogenen Wärmeverteilung im Schrankinneren während der Versuchsdurchführung, die Thermoelemente T1 und T2 überwachen die Temperatur der Lampe und des Akkumulators.

In der Abbildung 16 sind die geöffneten Lampen abgebildet und die Position des Thermoelements T1 in den jeweiligen Lampen angezeigt. Dieses Thermoelement wurde auf der Höhe der halben Akkumulatorlänge festgeklemmt, so dass die Thermoelementspitze Kontakt zur Akkumulatoroberfläche besitzt. Das Thermoelement T2 wird mit selbstklebendem Kapton®-Band (hitzebeständig) außen am Gehäuse der jeweiligen Lampe befestigt.

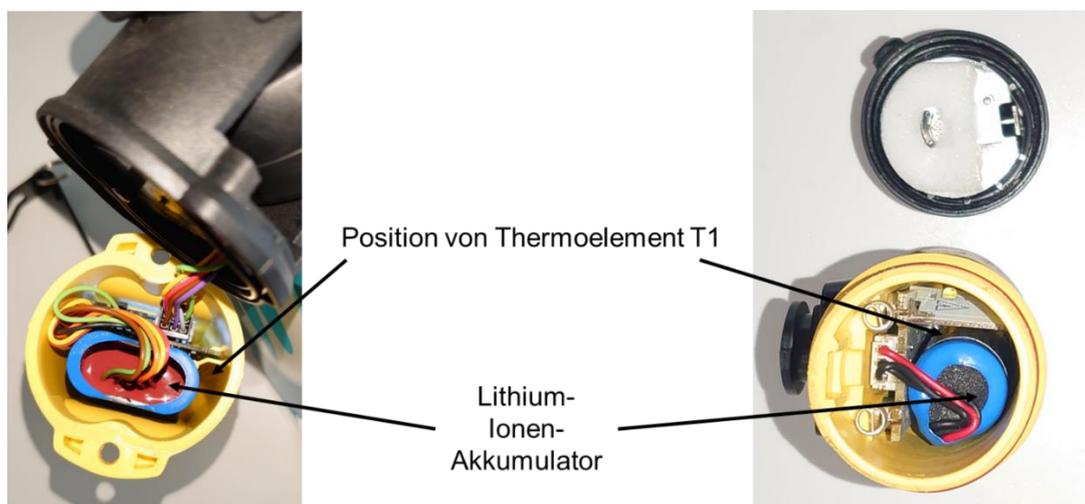


Abbildung 16: Platzierung des Thermoelements T1 in den geöffneten Lampen (links: Knickkopf; rechts: Helmlampe)

Vor dem Versuchsbeginn wurden die Parameter an der Steuerungseinheit des Wärme-Kälte-Prüfschranks programmiert. Nachdem an der zu untersuchenden Lampe die Thermoelemente angebracht wurden, wurde diese im Prüfschrank ausgerichtet und die weitere Messtechnik positioniert. Danach wurde die Lampe eingeschaltet und der Prüfschrank geschlossen. Nach dem Start der Messwerterfassungssoftware wurde 12 min gewartet, bevor das Programm des Wärme-Kälte-Prüfschranks gestartet wurde. Hier durch wurden die Ausgangswerte miterfasst. Je nach Parameterset wurde nach Erreichen der Versuchsdauer der Wärme-Kälte-Prüfschrank ausgeschaltet und die Kammertür geöffnet. Die vorgegebene Versuchsdauer begann bei den durchgeführten Experimenten jeweils zum Zeitpunkt, an dem die vorgegebenen Versuchsparameter zeitlich konstant waren. Weitere 12 min nach der Schranktüröffnung wurde die Messwerterfassung gestoppt. Sowohl das untersuchte Objekt als auch der Prüfschrank konnten sich an die Ausgangswerte wieder anpassen.

## 4.4 Praxisnahe simulierte Einsatzszenarien in der Versuchskammer

### 4.4.1 Übersicht der durchgeführten Versuche

In Tabelle 5 ist die Matrix für die Versuchsparameter der simulierten Einsatzszenarien in der Versuchskammer dargestellt. Diese basieren auf den im Kapitel 2.2 und 4.2 getroffenen Aussagen zu den Einsatzszenarien.

*Tabelle 5: Matrix der Versuchsparameter in der Versuchskammer*

Simulationsziel	Wärmequelle	Ort	Erwartete Reaktion
Innerer Defekt des LIB (bspw. Produktionsfehler)	Heizkartusche	Im Inneren der Lampe	„thermal runaway“
Gerichtete Wärmestrahlung auf die Lampe (z. B. durch Rauchgasschicht)	Wärmestrahler	Definierter Abstand von der Lampe	Wärmeeinfluss auf Lampenkörper ggf. mit „thermal runaway“
Direkte Beflammung der Lampe	Poolfeuer, n-Heptan	Lampe oberhalb des Feuers	Einfluss von Wärme, Ruß & Rauchgasen auf Lampe ggf. mit „thermal runaway“
Direkte Beflammung des ausgebauten LIB (z. B. beschädigtem Lampenkörper)	Poolfeuer, Isopropanol	Akkumulator oberhalb des Feuers	Einfluss von Wärme, Ruß & Rauchgasen auf den Akkumulator ggf. „thermal runaway“

Die angegebenen Simulationsziele in der Tabelle 5 wurden für die Verwendung der Heizkartusche und den Wärmestrahler zeitlich auf 30 min begrenzt (limitierte Einsatzzeit). Bei der Verwendung der Poolfeuer als Quelle, sofern dieses keine Reaktion während der Abbrandzeit an der Lampe hervorrief, wurde die Versuchszeit ebenfalls auf 30 min nach der Verlöschung des Poolfeuers begrenzt.

Die Simulationsziele für die Lampen wurden jeweils zweifach pro Lampentyp (Helmlampe/ Knickkopflampe) durchgeführt. Dabei wurde jeweils für den Wiederholungsversuch eine neue Lampe des Typs verwendet, um mögliche, noch nicht eingetretene Reaktionen der getesteten Lampe auszuschließen.

Die Lampen wurden vor den Versuchen zu 100 % aufgeladen. Die Experimente begannen jeweils mit voller aktivierter Leuchtkraft (Status der Helmlampe: Normalmodus; Status der Knickkopflampe: Hauptlicht & Pilotlicht) der Lampe.

Die direkte Beflammung des ausgebauten LIB wurde nur für den Lampentyp Knickkopflampe zweifach wiederholt. Die Beflammungsdauer entsprach der Abbrandzeit des *n*-Heptan-Poolfeuers bei den Versuchen mit kompletter Knickkopflampe.

#### 4.4.2 Experimenteller Aufbau und Messtechnik in der Versuchskammer

Die Experimente für die praxisnahen simulierten Einsatzszenarien wurden in einer Versuchskammer mit den Innenmaßen 780 mm x 780 mm x 816 mm (B x H x T) durchgeführt. In der Abbildung 17 ist der schematische Aufbau der Versuchskammer in zwei Perspektiven dargestellt. Die Versuchskammer wurde im Brandraum mit Rauchgasreinigungsanlage aufgestellt.

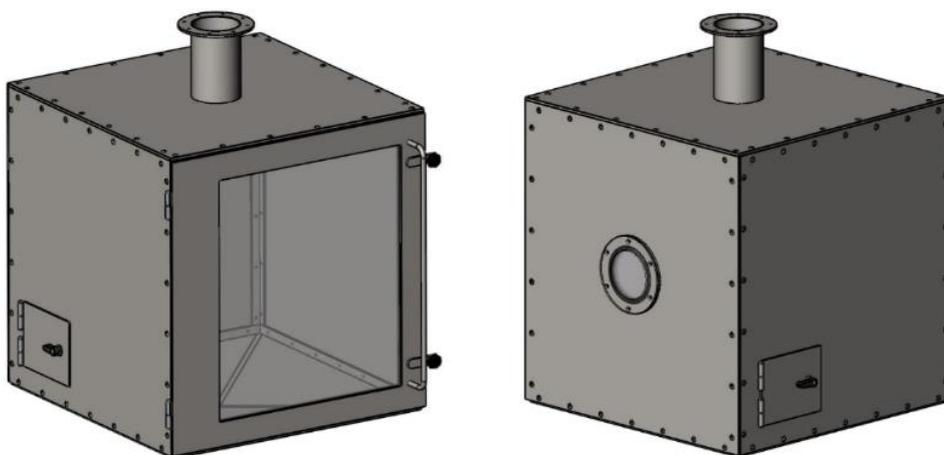


Abbildung 17: Schematischer Aufbau der Versuchskammer

Die Kammer ist aus Edelstahl gefertigt. In der Rückwand ist eine kreisförmige infrarotdurchlässige Sichtscheibe für die Wärmebildkamera mit einem Durchmesser von

125 mm eingesetzt. Die verriegelbare Tür besitzt ein großes wärme- und schlagbeständiges Sichtfenster (s. Abbildung 17). Oben in der Kammer befindet sich ein Abzug mit einem Durchmesser von 130 mm. Hier können Gasentnahmesonden angebracht werden. Der Boden der Kammer verläuft prismatisch zur Mitte nach unten und mündet in einem absperrbaren Ablauf. Seitlich befindet sich der Zugang für elektrische und messtechnische Leitungen, die selbstdichtend verschraubt werden können.

Die Abbildung 18 zeigt den inneren Aufbau der Versuchskammer mit den installierten Messsensoren. Informationen zu den eingesetzten Sensoren können Tabelle 6 entnommen werden.

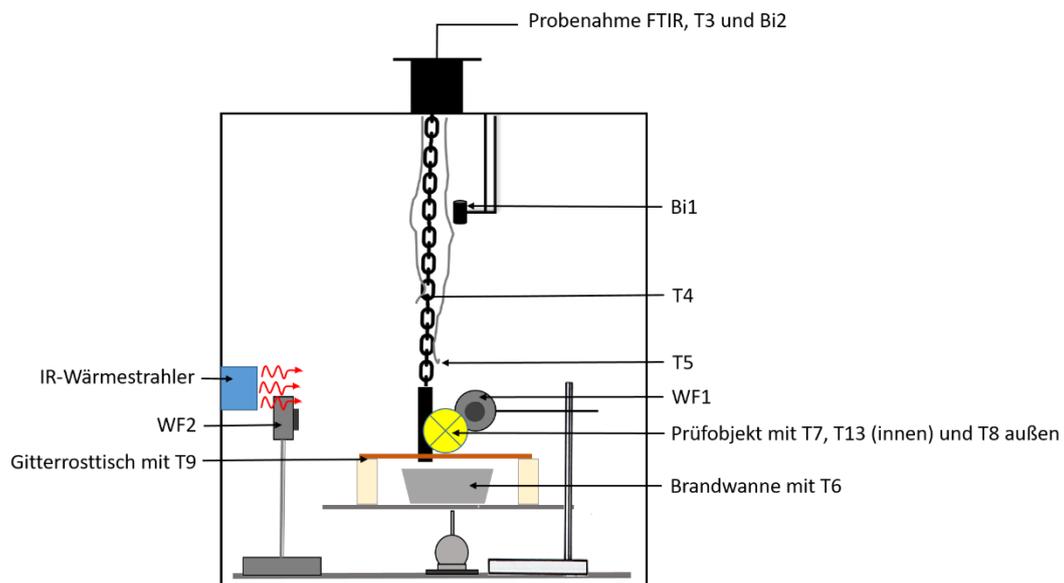


Abbildung 18: Schematischer Aufbau im Inneren der Versuchskammer

Für den Versuchsaufbau (s. Abbildung 18) wurden je nach Simulationsziel ein Gitterrosttisch oder eine erhöhte Gitterstahlplatte auf den Boden der Versuchskammer gestellt, um eine ebene Grundfläche zu erhalten. Dadurch wurde außerdem sichergestellt, dass die Untersuchungsobjekte auf Höhe des infrarottransparenten Sichtfensters positioniert werden. Alle Versuche wurden mit zwei visuellen (GoPro Inc. und Nikon Europe B.V.) und einer Infrarotkamera (InfraTec GmbH) aufgezeichnet. Die Kameratechnik war auf das Untersuchungsobjekt ausgerichtet.

In der Kammer wurden verschiedene Messsensoren installiert. Eine Übersicht zu deren Position gibt Abbildung 18. In der Tabelle 6 sind neben der Bezeichnung des Messsensors die Sensorart und die genaue Position beschrieben. Darüber hinaus wurden an und in den Prüfobjekten Sensoren verbaut (s. Abbildung 18, vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Bezeichnung, Typ und Lage der verwendeten Messsensoren der Versuchskammer

Nr.	Typ	Lage (Messposition)
T1	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	außerhalb der Messkammer, Umgebung
T2	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	außerhalb der Messkammer, Umgebung
T3	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	60 cm über dem Gitter mittig im Abzug, direkt neben dem Ansaugrohr der FTIR-Probenahmeeinheit
T4	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	40 cm über dem Gitter mittig
T5	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	20 cm über dem Gitter mittig
T6	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	An der Zündquelle (im Pool, am IR-Strahler) Kammerraumtemperatur (bei Heizkartusche)
T7	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	im Inneren der Lampe am Akkumulator; diametral zu T13
T8	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	Außen oben an der Lampe
T9	Mantelthermoelement Typ K; Toleranzklasse 2; Mantel-Ø: 1 mm	Am Gitter, unterhalb der Lampe
T13	Oberflächenthermoelement Typ K; Toleranzklasse 1	im Inneren der Lampe am Akkumulator; diametral zu T7
WF1	Wärmeflussensor des Typs Schmidt-Boelter von der Firma MEDTHERM Corporation (kalibriert)	rechtwinklig zu WF2 und in Höhe des Prüfobjektes Messfläche auf das Objekt gerichtet
WF2	Wärmeflussensor des Typs Schmidt-Boelter von der Firma MEDTHERM Corporation (kalibriert)	rechtwinklig zu WF 1 und in Höhe des Prüfobjektes Messfläche auf das Objekt gerichtet
Bi1	Bidirektionale Sonde mit Differenzdruckaufnehmer; Druckbereich +/- 250 Pa	40 cm über dem Gitter mittig, parallel zur Strömung
Bi2	Bidirektionale Sonde mit Differenzdruckaufnehmer Druckbereich +/- 250 Pa	60 cm über dem Gitter mittig im Abzug, parallel zur Strömung, direkt neben dem Ansaugrohr der FTIR-Probenahmeeinheit
FTIR	Ansaugrohr der FTIR- Probenahmeeinheit	60 cm über dem Gitter mittig im Abzug, Analysator außerhalb vom Brandraum

Die Messsignale der in Tabelle 6 angegebenen Sensoren mit Ausnahme des FTIR wurden über ein Feldbussystem digital mit einer Messwerterfassungssoftware erfasst und auf einem Messrechner gespeichert. Die Messfrequenz betrug 1 Hz.

Die chemischen Komponenten im freigesetzten Rauchgas wurden mittels eines Fourier-Transform-Infrarotspektrometers (FTIR-Spektrometer) der Firma Gasmet Technologies GmbH messtechnisch erfasst. Das entstehende Rauchgas, welches komplett durch den Abzug in der Kammerdecke entweicht, kann auf bestimmte Substanzen hin analysiert werden. Die Substanzen, die bei einem Feuerwehreinsatz besondere Gefahren für die Einsatzkraft bedeuten können und bei dem „thermal runaway“ von LIB zu erwarten sind, wurden für die Detektion ausgewählt. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Elektrolyte aus dem Akkumulator selbst, auf HF und HCl sowie auf die Zwischenprodukte des Leitsalzes  $\text{POF}_3$  und  $\text{COF}_2$  gelegt. Für die Messung wurde zur kondensationsfreien Probenzufuhr ein beheizter Schlauch verwendet. Alle 5 s wurde ein Messpunkt inkl. Spektrum aufgenommen. Die Berechnung der Konzentration dauerte 2 s. Die Laufzeit zwischen Probenahmerohr und Analysatoreingang wurde separat bestimmt.

Die vier Simulationsziele wurden durch unterschiedliche Beaufschlagung der Untersuchungsobjekte mit Wärme realisiert.

Zur Simulation eines inneren Defekts wurde in die Lampe eine Heizkartusche mit direktem Oberflächenkontakt an den LIB eingeführt. Die Kartusche besaß einen Durchmesser von 6,5 mm und eine Länge von 40 mm. Die Kartusche (200 W) wurde bei einer Spannung von 65 V und einem Strom von 0,23 A über einen Trennstelltrafo betrieben, so dass eine definierte Temperaturerhöhung am LIB initiiert wurde. Durch die Thermoelemente T7 und T13 wurde der Anstieg detektiert. In diesem Szenario war die Lampe äußerlich intakt.

Die gerichtete Wärmestrahlung wurde durch einen keramischen Wärmestrahler erzeugt. Dieser ist temperaturgeregelt und erreicht eine maximale Oberflächentemperatur auf dem keramischen Heizelement von 750 °C. Im seitlichen Abstand von 30 cm zur Lampenmitte war der Wärmestrahler befestigt und beaufschlagte die Lampe seitlich. In diesen Versuchen wurde ein Wärmeflussensor gegenüber der Strahlungsfläche ausgerichtet, um die auf die Lampe treffende Wärmestrahlung zu bestimmen.

Zur direkten Beflammung der Lampe wurden 175 ml n-Heptan in einer Brandwanne unterhalb des Gitters entzündet. Der Abstand zwischen dem Boden der Brandwanne und der Lampe betrug 15 cm. Die Abbrandzeit des Poolfeuers betrug 5 min.

Die direkte Beflammung des LIB ohne Lampe gestaltete sich ebenso. Lediglich der Brennstoff des Poolfeuers wurde aufgrund geringerer Rußbildung gegen 120 ml *iso*-Propanol ausgetauscht. Die Positionierung der Wanne und die Abbrandzeit waren identisch.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Simulierte Einsatzszenarien im Klimaschrank

In den nachfolgend dargestellten Ergebnissen wurde auf die Temperaturmessstelle „Wanne“ verzichtet, da diese identische Werte wie die Temperaturmessstelle „Gitter“ lieferte. In den Diagrammen wurde nur die Temperaturmessstelle „Gitter“ dargestellt und zur Diskussion herangezogen.

Grundsätzlich ist folgender Temperaturverlauf aus den Diagrammen zu erkennen. Die Temperatur „Gitter“ als simulierte Umgebungstemperatur bei der Brandbekämpfung steigt am schnellsten, danach folgen die Temperatur „außen an der Lampe“ und die Lampeninnentemperatur. Letztere steigt aufgrund des zeitbeanspruchenden Wärmedurchgangs durch den Lampenkörper am langsamsten. Durch eine höhere Luftfeuchtigkeit wird der Wärmetransport beschleunigt.

#### 5.1.1 Vergleich von feuchtem und trockenem LIB-Lampen-Einsatz

Gemäß der Untersuchungsmatrix (s. Tabelle 3) wurden die Helmlampen und die Knickkopflampen aufgeladen, eingeschaltet und in den Langzeitversuchen 4 h bei einer Temperatur von 85 °C gelagert. In den beiden Versuchsserien pro Lampenart wurde die relative Luftfeuchtigkeit variiert.

##### Helmlampen

In den Abbildungen 19 und 20 wurden exemplarisch für zwei Versuche der Versuchsserien die aufgezeichneten zeitlichen Verläufe der Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit dargestellt. Der variierte Parameter ist die relative Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank.

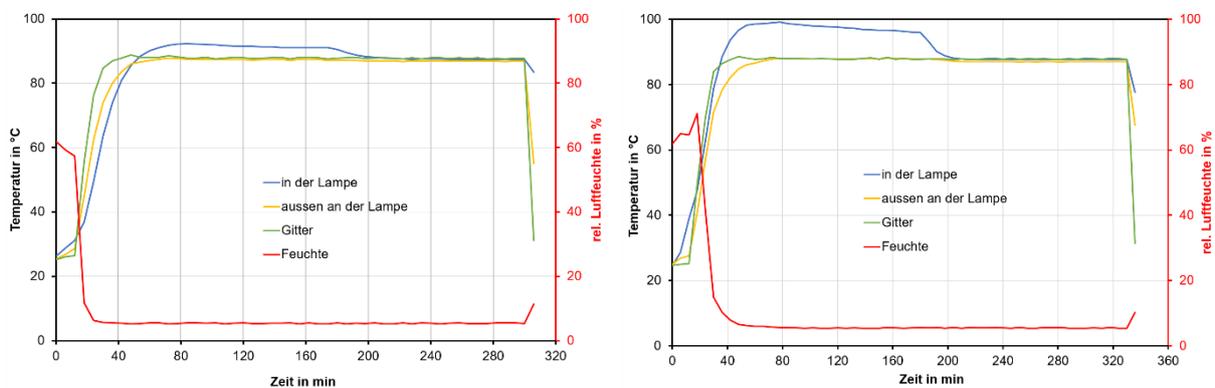


Abbildung 19: Langzeitversuche Helmlampen (links:1; rechts:2) bei den Parametern  $T: 85\text{ °C}$  und  $rF: 0\%$

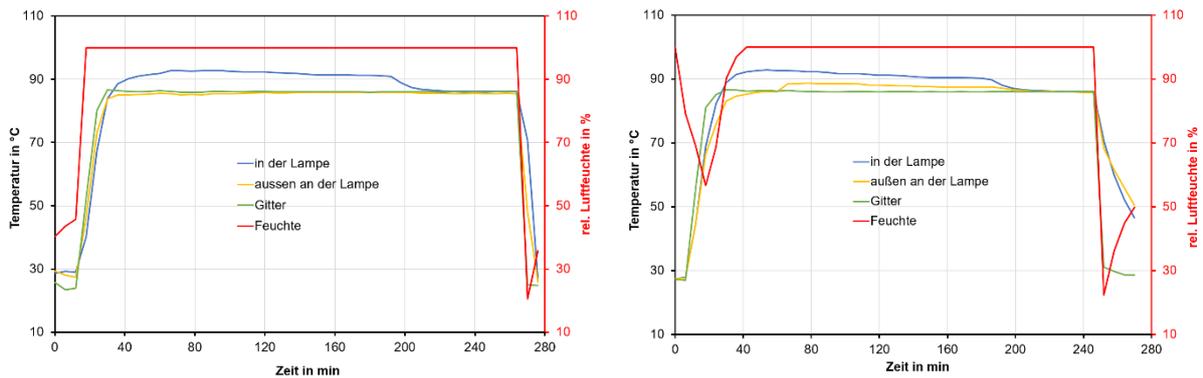


Abbildung 20: Langzeitversuche Helmlampen (links:1; rechts:2) bei den Parametern  $T: 85\text{ °C}$  und  $rF: 100\%$

Im Vergleich der Abbildung 19 und der Abbildung 20 ist die eingangs erwähnte Beeinflussung durch die relative Luftfeuchtigkeit erkennbar. Die Wärmeübertragung erfolgt in feuchter Raumluft schneller als in trockener. An den Temperaturkurven „in der Lampe“ (blau) ist dies deutlich erkennbar. Die Versuchszeit bis zum Erreichen einer Innentemperatur der Lampe von  $85\text{ °C}$  liegt im Mittelwert bei trockenem Raumklima bei 45 min. Liegt die Luftfeuchte bei 100 %, steigt die Temperatur im Inneren der Lampe im Mittel nach 33 min auf  $85\text{ °C}$ . Zur Bestimmung der mittleren Zeit bis zum Erreichen der Innentemperatur von  $85\text{ °C}$  wurden die durchgeführten Experimente einer Versuchsserie zugrunde gelegt. Trotz des großen Messzyklus von 6 min, ist der Trend eindeutig.

Weiterhin ist in beiden Abbildungen feststellbar, dass die Innentemperatur der Helmlampe (blaue Kurven in Abbildungen 19 und 20) über der Temperaturkurve des Gitters (grüne Kurve) und damit oberhalb der vordefinierten Umgebungstemperatur liegt. Die Überschreitung der Raumtemperatur im Klimaschrank liegt im Bereich von 5 – 20 K und ist anhand der Diagramme in der Abbildung 19 dokumentiert. Die Überschreitung nimmt mit abnehmendem Ladezustand ab. Dieses Verhalten ist in beiden Abbildungen deutlich durch den Abfall der blauen Kurve sichtbar. Der LIB in der Helmlampe erwärmt sich demzufolge bei der Entladung. In einigen wenigen Fällen der Versuchsserien wurden neben der Temperaturerhöhung am LIB ebenso eine Temperaturerhöhung von ca. 5 K am Gehäuse der Lampe registriert (vgl. Abbildung 20, rechts, gelb). Eine eindeutige Ursache konnte im Rahmen des Projektes nicht gefunden werden. Es wird vermutet, dass die LIB die Innenseite des Gehäuses berührte und der zeitliche Verzug des Temperaturanstiegs von ca. 30 min auf die Wärmeleitung durch die Gehäusewand zurückgeführt werden kann.

## Knickkopflampen

In der Abbildung 21 wurden exemplarisch für einen Versuch der Versuchsserien die aufgezeichneten zeitlichen Verläufe der Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit dargestellt. Der variierte Parameter ist die relative Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank.

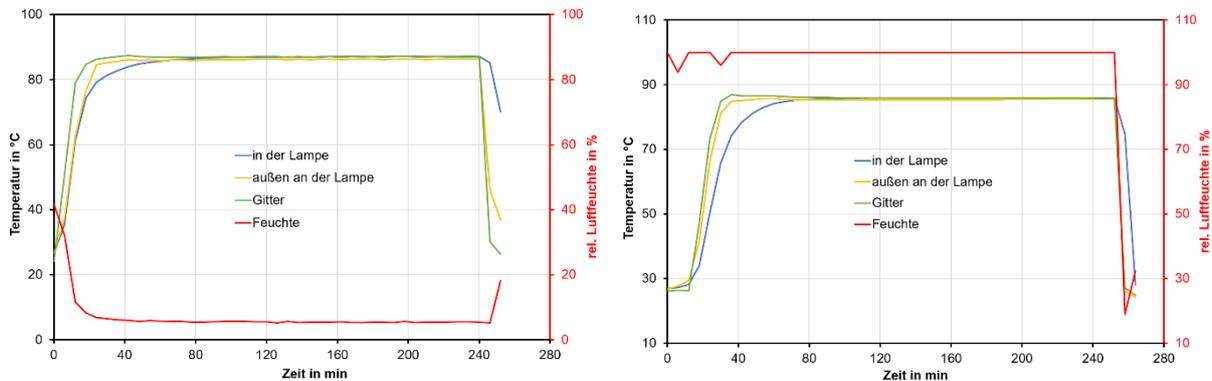


Abbildung 21: Langzeitversuch Knickkopflampe bei  $T: 85\text{ °C}$  in  $rF: 0\%$  (links) und in  $rF: 100\%$  (rechts)

Ähnlich dem Verhalten bei den Helmlampen erhöht sich die Temperatur im Inneren der Lampe langsamer auf  $85\text{ °C}$  als in ihrer Umgebung. Gleichfalls wird ein zeitlich versetzter Temperaturanstieg zwischen trockener und feuchter Atmosphäre der Lampenumgebung registriert (vgl. Abbildung 21).

Im Mittel steigt die Temperatur im Inneren der Knickkopflampe in der trockenen Atmosphäre nach  $82,5\text{ min}$  auf  $85\text{ °C}$  an. In der feuchten Atmosphäre werden die  $85\text{ °C}$  in der Knickkopflampe nach  $61,5\text{ min}$  erreicht. Der zeitliche Unterschied wird mit der besseren Wärmeübertragung in feuchter Atmosphäre an Festkörperoberflächen begründet, weil aus der bewegten, feuchten Luft der Wasserdampf mit der hohen spezifischen Wärmekapazität auf der kalten Festkörperoberfläche kondensiert und diese dann erwärmt. In trockener Luft, welche bei Normalbedingungen ( $T: 20\text{ °C}$ ;  $p: 101,325\text{ kPa}$ ) eine wesentlich kleinere spezifische Wärmekapazität besitzt, findet der Kondensationsprozess nicht statt. Ein zweiter, aber instationärer Effekt findet zum Beginn des Kontakts zwischen feuchter/trockener Luft statt und beeinflusst ebenso die Wärmeübertragung. Dieser Effekt wird durch den Wärmeleitkoeffizienten charakterisiert.

Die bestimmten mittleren Messzeiten der Knickkopflampen bis zum Erreichen der Temperatur von  $85\text{ °C}$  sind fast doppelt so groß wie bei den Helmlampen. Die Ursachen hierfür resultieren aus den Unterschieden bei den geometrischen Abmaßen, der Gehäusewandstärke und den Luftinnenvolumina der Lampen. Diese sind bei der Helmlampe wesentlich kleiner als bei der Knickkopflampe.

Ein Beitrag der Eigenerwärmung durch die Entladung der LIB am Innenthermoelement (blau in Abbildung 21), wie in den Untersuchungen an der Helmlampe, wurde in keinem der durchgeführten Experimente mit den Knickkopflampen gemessen, weil sich alle

Knickkopflampen nach  $(19 \pm 3)$  min selbstständig ausschalteten. Die mittlere Temperatur in der Lampe betrug  $(70,4 \pm 10,6)$  °C. Die Gesamtleuchtdauer der untersuchten Knickkopfleuchten beträgt 3 h bei der angewendeten Schaltstufe 3 (Haupt- und Pilotlicht) [54]. Gemäß der technischen Daten der Knickkopflampe [54] liegt der Bereich, in dem die Lampe angewendet werden darf, zwischen -20 °C und 40 °C.

### 5.1.2 Einfluss von Einsatzkleidung im Fall der Knickkopflampe

Im Einsatzfall ist es oft erforderlich, die Hände für andere Ausrüstungsgegenstände wie eine Wärmebildkamera oder das Strahlrohr zu nutzen. Deshalb sind Lampen häufig so ausgelegt, dass diese an der Einsatzkleidung eingesteckt oder festgeklemmt werden können.

Die hier untersuchten Knickkopflampen sind für zwei Trageweisen ausgelegt, da ihr Kopf um 180 ° schwenkbar ist. Zum einen kann die Lampe mittels eines Clips an der Jackentasche o. ä. festgeklemmt werden. Zum anderen kann die Lampe in die Brusttasche gesteckt werden. Die Abbildung 22 zeigt zwei heutzutage typische Einsatzjacken und je Jacke eine mögliche Position zum Einstecken der Knickkopflampe.



Abbildung 22: Typische Einsatzjacken der Feuerwehr; Obermaterial 1 (links) und Obermaterial 2 (rechts)

Das Einstecken der Knickkopflampe in die Brusttasche der Einsatzjacke kann diese gegenüber äußeren Einflüssen des Brand- oder Hilfeleistungseinsatzes, wie Wärme und Feuchtigkeit, zusätzlich schützen. Unter Umständen kann durch die thermische Isolation die Temperatur in der Tasche niedriger sein. Damit könnte der Randbedingung durch den Hersteller mit einer maximalen Umgebungstemperatur von 40 °C zumindest für das Griffstück der Lampe entsprochen werden. Weitere beeinflussende Größen auf die Schutzwirkung sind neben dem verwendeten Obermaterial, dem Schichtaufbau und der Materialstärke der Jacke auch die Brusttaschenform sowie der angewendete Schnitt der Brusttasche.

Die in der Abbildung 22 gezeigten Jacken wurden für die nachfolgenden Untersuchungen mit der Knickkopflampe verwendet. Beiden Jacken unterscheiden sich im Obermaterial und in der

Nähtechnik. Bei der Einsatzjacke mit Obermaterial 1 ist die Brusttasche aufgesetzt. Die Jacke mit dem Obermaterial 2 besitzt eine eingenähte Brusttasche.

Beide Jacken wurden mit der auf Schaltstufe 3 leuchtenden Knickkopflampe bestückt und in trockener Luft einer Temperatur bis 85 °C für 4 h ausgesetzt.

In der Abbildung 23 sind die zwei Diagramme der Temperaturverlaufskurven für die beiden Jackenmodelle beispielhaft für die Versuchsserie gegenübergestellt.

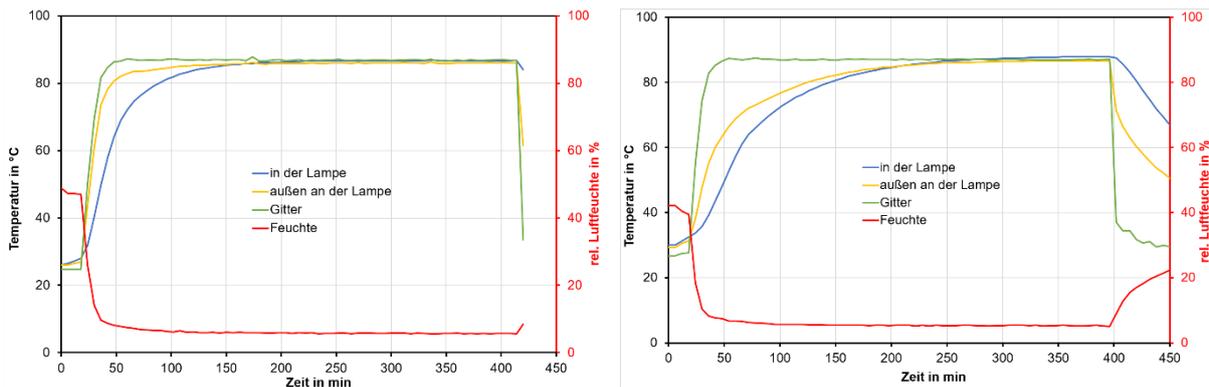


Abbildung 23: Langzeitversuch (T: 85 °C) mit Knickkopflampe in Brusttasche aus Obermaterial 1 (links) und Obermaterial 2 (rechts)

Aus dem Vergleich der beiden Diagramme in Abbildung 23 ist eine unterschiedliche Schutzwirkung der Jacken erkennbar. Die Innentemperatur der Lampe (blau) in der Obermaterial 1-Jacke erreicht in einem Zeitfenster von 100 min die Umgebungstemperatur von 85 °C. Dagegen benötigt die Innentemperatur der Lampe in der Obermaterial 2-Jacke 250 min, um auf diesen Temperaturwert zu steigen.

Dieses Ergebnis ist ferner am Temperaturverlauf des außen an der Lampe (gelb) befestigten Thermoelements nachweisbar. Dieses wurde thermisch durch die Tasche ebenso geschützt. Welcher der beiden Faktoren – Obermaterial oder Nähtechnik – den entscheidenden Einfluss auf die Schutzwirkung besitzt, kann nicht abschließend geklärt werden. Hierzu sind weitere Versuche mit unterschiedlichen Obermaterialien und Nähtechniken notwendig, insbesondere, weil auch eine Abhängigkeit zur Stofflagenanzahl vermutet wird. Eine aktuelle Auswahl von Einsatzjacken ist in [55] angegeben.

Weiterhin konnte die Umgebungstemperatur nicht ausreichend innerhalb der Brusttasche bei einem Temperaturwert von 40 °C gehalten werden, um die angegebene Grenztemperatur der Lampe nicht zu überschreiten. Die Leuchtzeit der Lampe verlängert sich in beiden Fällen auf über 30 min, bevor sie sich eigenständig ausschaltete. Damit sollte während der Einsatzzeit von 30 min in heißer Umgebung die Betriebsfähigkeit der Lampe gegeben sein.

### 5.1.3 LIB-Lampen-Aufbewahrung im unbeheizten Gerätehaus

Die Einsatzkräfte sind auch bei Temperaturen unterhalb von 0 °C im Einsatz. Dabei kann ein längerer Aufenthalt in diesem Temperaturfeld erfolgen und damit die Abkühlung der mitgeführten Ausrüstungsgegenstände. Erfolgt dann ein Innenangriff, können große Temperatursprünge an und in den Ausrüstungsgegenständen auftreten. In diesem Punkt werden in dem Laborszenario diese Temperatursprünge bei einer relativen Luftfeuchte von 0 % an beiden Lampentypen simuliert.

In der Abbildung 24 sind die zeitlichen Temperaturverläufe für die beiden Lampentypen zu sehen.

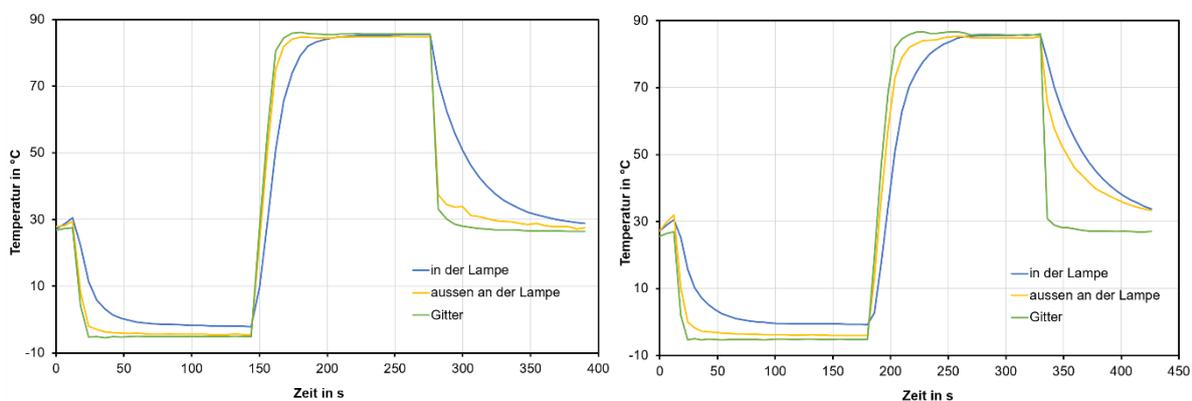


Abbildung 24: Helmlampe (links) und Knickkopflampe (rechts) im kalten Gerätehaus ( $T: -5\text{ °C}$ ) gelagert mit nachfolgender Brandbekämpfung ( $T: 85\text{ °C}$ )

Anhand der zeitlichen Temperaturkurven in Abbildung 24 ist deutlich ersichtlich, dass am Gehäuse beider Lampentypen die Temperaturen (gelb) dem vorgegebenen Temperaturprofil des Klimaschranks folgen. Lediglich in der Abklingphase, nachdem der Klimaschrank abgeschaltet wurde, fällt die Gehäusetemperatur an der Knickkopflampe (rechts) wesentlich langsamer als die Umgebungstemperatur (grün). Die maximale Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungstemperatur und der Gehäusetemperatur liegt bei  $\pm 5\text{ K}$ .

Die Innentemperatur im Gehäuse (blau) folgt sowohl bei der Abkühlung als auch bei der Erwärmung der Umgebungstemperatur. Dies entspricht den zuvor getroffenen Aussagen der vorherigen Untersuchungen. Das Gehäuse wirkt bei beiden Lampen unter aufgeprägten negativen Temperaturen isolierend.

Die Ausprägung einer Temperaturerhöhung im Inneren der Helmlampe (links) als Folge der Eigenerwärmung ist durch die Entladung des LIB (vgl. Abbildung 19) begründet. Da die Lampe nach 3 h Akkulaufzeit erlosch, ist eine Temperaturerhöhung oberhalb der aufgeprägten 85 °C nicht eingetreten.

Bei der Knickkopflampe schaltete sich bei aufgeprägter Umgebungstemperatur von 85 °C nach  $(19 \pm 3)$  min aus. Ein Einfluss niedriger Temperaturen auf den Ausschaltmechanismus konnte nicht nachgewiesen werden. Die Lampe schaltete sich selbstständig wieder ein.

Grundsätzlich kann aus dieser Untersuchung geschlossen werden, dass beide Lampentypen und die enthaltenen LIB resistent gegenüber dieser sprunghaften Temperaturbeanspruchung sind.

### 5.1.4 Mehrfacher Einsatz der Lampen mit LIB

Das Ziel dieser Versuchsserie ist es, die Einsatzsituation nachzuempfinden, in der die LIB-Lampe im Zeitfenster von jeweils 30 min bei der Brandbekämpfung eingesetzt wird. Die Brandbekämpfung erfolgt drei Mal. Zwischen den einzelnen Einsätzen kann die Lampe kurzzeitig abkühlen. Jedoch wird sie nicht wieder aufgeladen. Dieses Szenario simuliert eine Situation, in der nicht in ausreichender Anzahl solche Ausrüstungsgegenstände für alle Einsatzkräfte zur Verfügung stehen.

#### Helmlampen

Bei den 3 x 30 min-Versuchen mit der Helmlampe steigt bei den zu einem Versuchszyklus (3 x 30 min) gehörenden Experimenten die Innentemperatur der Lampe im Vergleich zur Umgebungstemperatur (s. Anhang 4). Ein Versuchszyklus wurde dreimalig wiederholt. Die Umgebungstemperatur wird durch die Gittertemperatur gemessen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Temperaturen variiert. In der Abbildung 25 sind die zeitlichen Verläufe für die beiden Temperaturen eines Versuchszyklus (3 x 30 min) gegenübergestellt.

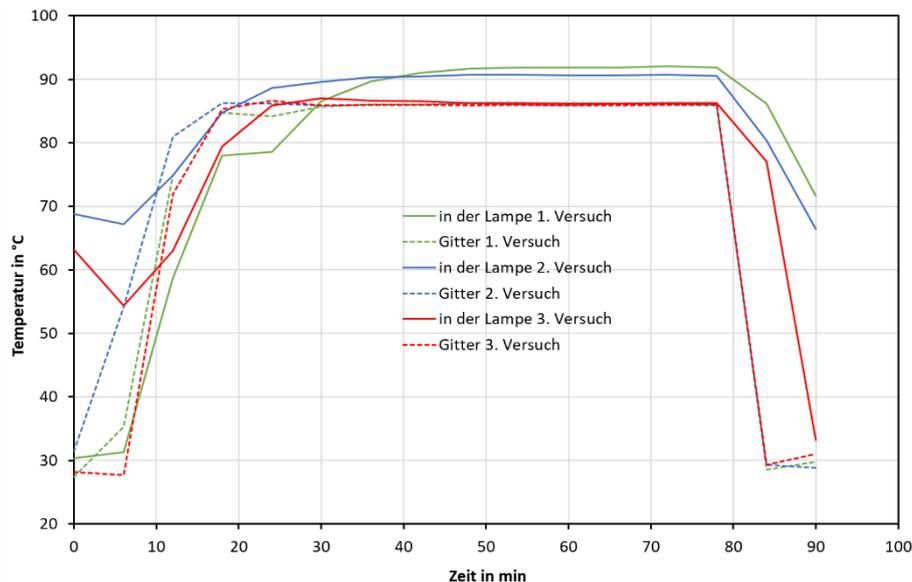


Abbildung 25: Zeitliche Verläufe der Gitter- und Lampeninnentemperatur eines Versuchszyklus (Helmlampe)

Im Punkt 5.1.1 wurde bei den Langzeitversuchen festgestellt, dass innerhalb der Helmlampe eine Temperaturerhöhung zwischen 5 – 20 K durch die Eigenwärme beim Entladungsvorgang

auftritt. Dementsprechend wurde auch in den hier vorgestellten Versuchen eine höhere Innentemperatur erwartet.

Mittels der 3 x 30 min-Versuche kann diese Vermutung bestätigt werden. Durch den Vergleich der Temperaturdifferenzen ( $T_{\text{in der Lampe}} - T_{\text{Gitter}}$ ) der Versuche untereinander, die direkt hintereinander durchgeführt wurden, zeigt sich, dass die Temperaturdifferenz mit zunehmender Entladung des Akkus kleiner wird.

Anhand des Versuchszyklus (3 x 30 min) wird dieses Verhalten veranschaulicht. Im 1. Versuch ist die LIB der Helmlampe vollgeladen (Akkulaufzeit bei ca. 3 h [56]). Die Temperaturdifferenz beträgt 5,9 K. Beim 2. Versuch (Entladungszeit des LIB: 77 min) liegt der Differenzwert nur noch 4,6 K und beim 3. Versuch (Entladungszeit des LIB: 158 min) nur noch 0,2 K. Der Akku wurde zwischen den Versuchen nicht neu geladen. Im 3. Versuch erlosch deshalb die Lampe nach 48 min.

Nichtsdestotrotz wurden diese Versuche mit zwei Modellen dieses Lampentyps wiederholt und die Temperaturdifferenzen jeweils erneut gemessen.

Ein Gegenbeweis wurde angetreten, indem die LIB zwischen den 2. und 3. Versuch erneut voll aufgeladen wurden. In diesen Versuchszyklen betrug die Temperaturdifferenz im 3. Versuch ( $\Delta T = 8,6 \text{ K}$ ) mehr als in dem 1. Versuch ( $\Delta T = 4,7 \text{ K}$ ) des Versuchszyklus.

### *Knickkopflampen*

Die Knickkopflampen wurden gleichfalls dem Szenario der 3 x 30 min-Versuche unterzogen und diese Versuchszyklen mehrfach mit zwei Modellen dieses Lampentyps wiederholt. In der Abbildung 26 sind die gemessenen Temperaturen für einen Versuchszyklus gegenüber gestellt.

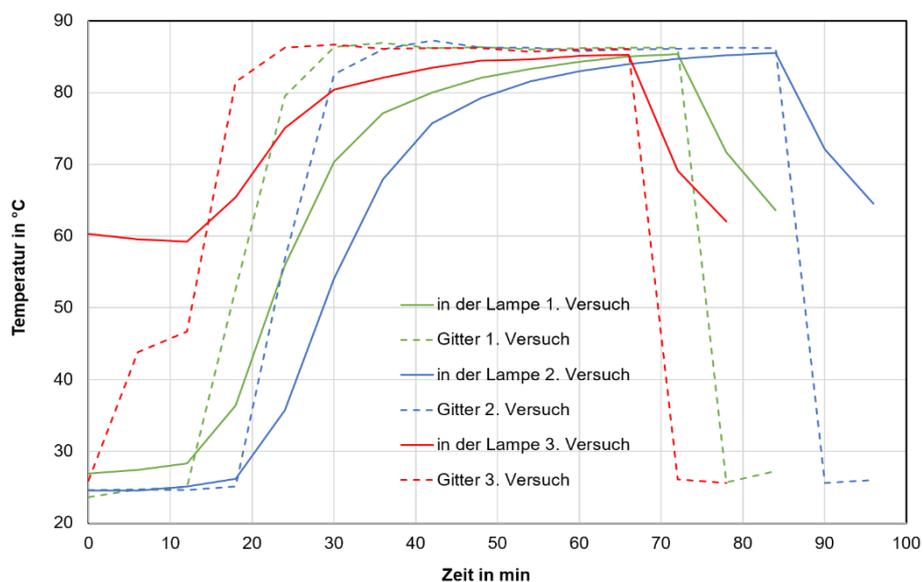


Abbildung 26: Zeitliche Verläufe der Gitter- und Lampeninnentemperatur eines Versuchszyklus (Knickkopflampe)

Aus dieser Gegenüberstellung der zu einem Versuchszyklus gehörenden Versuche ist keine Temperaturerhöhung im Lampeninneren erkennbar. Dieses Ergebnis bestätigt die Erkenntnis aus den Langzeitversuchen mit den Knickkopflampen (vgl. Kapitel 5.1.1). Lediglich die benötigte Aufwärmzeit bis zum Erreichen des Temperaturwerts von 85 °C verkürzt sich mit jedem weiteren Versuch. Die Einzeldiagramme des Versuchszyklus sind im Anhang 5 hinterlegt.

## **5.2 Praxisnahe simulierte Einsatzszenarien in der Versuchskammer**

### **5.2.1 Innerer Defekt des LIB**

Nach den Angaben der Hersteller der Untersuchungsobjekte sind die Ausrüstungsgegenstände ATEX [54, 56] geprüft. Eine Überprüfung dieses Schutzes, wenn die LIB einen inneren Defekt aufweist und selbstständig in den Zustand des thermal runaways übergeht, ist das Ziel dieser Untersuchung. Von besonderem Interesse sind die Gasdichtigkeit und Hitzebeständigkeit des Gerätegehäuses.

Zu diesem Zweck wurden in die Lampen jeweils eine Heizkartusche implementiert, die den LIB erwärmt und dadurch den thermal runaway initiiert. Die Gesamtversuchszeit von 30 min wurde hierbei überschritten, da eine zeitliche Abschätzung für den Beginn des thermal runaway durch die Erwärmung mittels Heizkartusche unbekannt war. Ein Augenmerk lag auf der Gasfreisetzung und einer oft mit dem thermal runaway verbundenen Explosion und Selbstentzündung. In der Abbildung 27 sind die simultan aufgezeichneten physikalischen und chemischen Messwerte dargestellt.

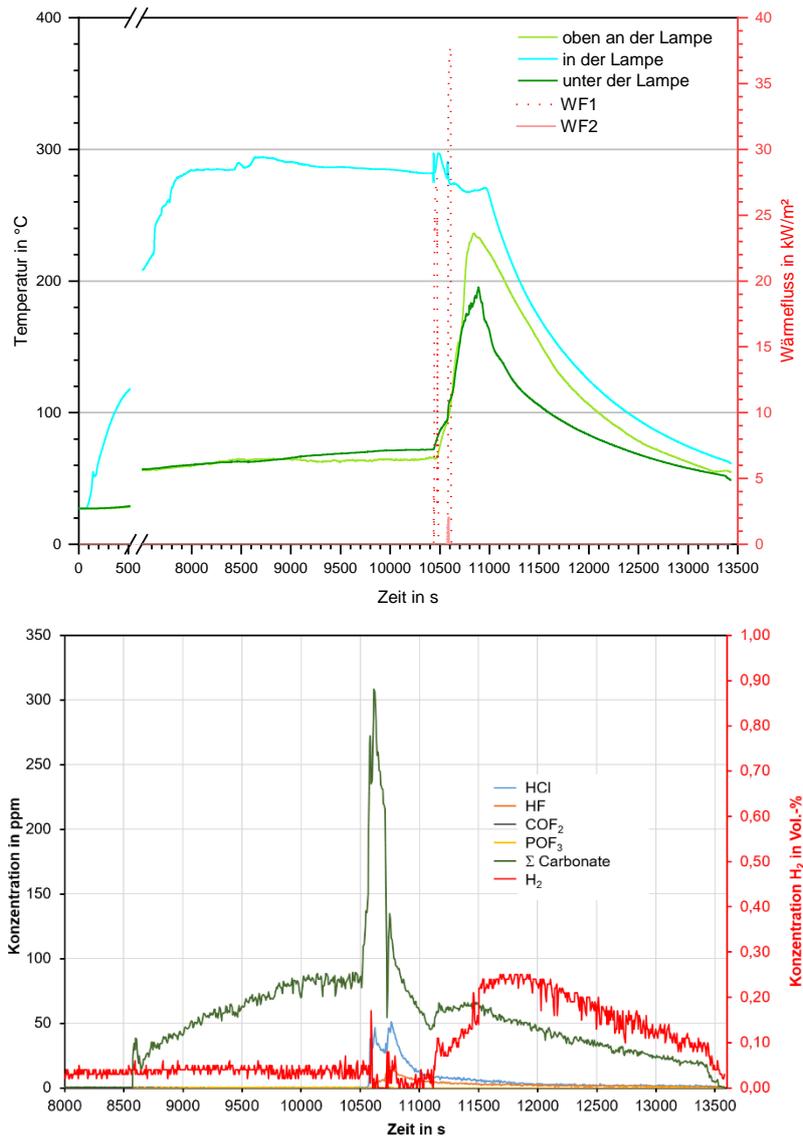


Abbildung 27: Verhalten der Knickkopf Lampe beim inneren Defekt (oben physikalische Messwerte T & WF; unten chemische Messwerte)

Anhand der Abbildung 27 ist ersichtlich, dass der thermal runaway einsetzt, jedoch eine typische Explosion oder Selbstentzündung außerhalb der Lampe nicht stattfindet. Das Lampengehäuse weist keine absolute Gasdichtigkeit des Gehäuses auf, da in kleinen Mengen die Elektrolytbestandteile der LIB nach außen dringen (vgl. grüne Kurve im unteren Diagramm). Konkret ab einem Zeitpunkt von 8600 s, charakterisiert im oberen Diagramm durch den kleinen Temperatur-Peak der Lampeninnentemperatur (blau) und im unteren Diagramm durch den Peak der aufsummierten Elektrolytgase (vgl. hierzu Tabelle 1). Beide Peaks sind Indizien dafür, dass sich mindestens ein Überdruckventil des LIB geöffnet hat und der thermal runaway begonnen hat. Nach ca. 30 min endet der thermal runaway in zwei aufeinanderfolgenden Explosionen ( $t_1 = 10459$  s;  $t_2 = 10577$  s). Diese sind in beiden Diagrammen deutlich sichtbar. Im oberen Diagramm weist die blaue Kurve einen weiteren Temperaturzuwachs von ca. 20 °C auf und zeitgleich verzeichnen beide Wärmeflussensoren einen starken Wärmestrom (rote Kurve). Im unteren Diagramm werden diese Explosionen

durch eine erneute sehr starke Zunahme der Elektrolytfreisetzung (grüne Kurve) gekennzeichnet. Im Maximum dieser Freisetzung wird gleichzeitig Wasserstoff freigesetzt. Der danach zu verzeichnende Anstieg von HCl resultiert aus der Umsetzung von Kunststoffen am und um den LIB. Nach dem Peak der aufsummierten Elektrolyte folgt ebenso eine Freisetzung von HF mit einem maximalen Wert von 47 ppm.

Nach der Explosion ist das Lampengehäuse beschädigt, so dass ungehindert weitere Gase austreten können und die äußeren Temperaturen an der Lampe ansteigen.

Bei Betrachtung der Schadensbilder nach dem jeweiligen Experiment ist erkennbar, dass das Gehäuse nur im Bereich der LIB geschädigt wurde und hier die Gase austreten konnten.

Nachfolgend wurde der Versuch mit der Helmlampe durchgeführt. Die physikalischen und chemischen Messwerte wurden in Abbildung 28 gegenübergestellt.

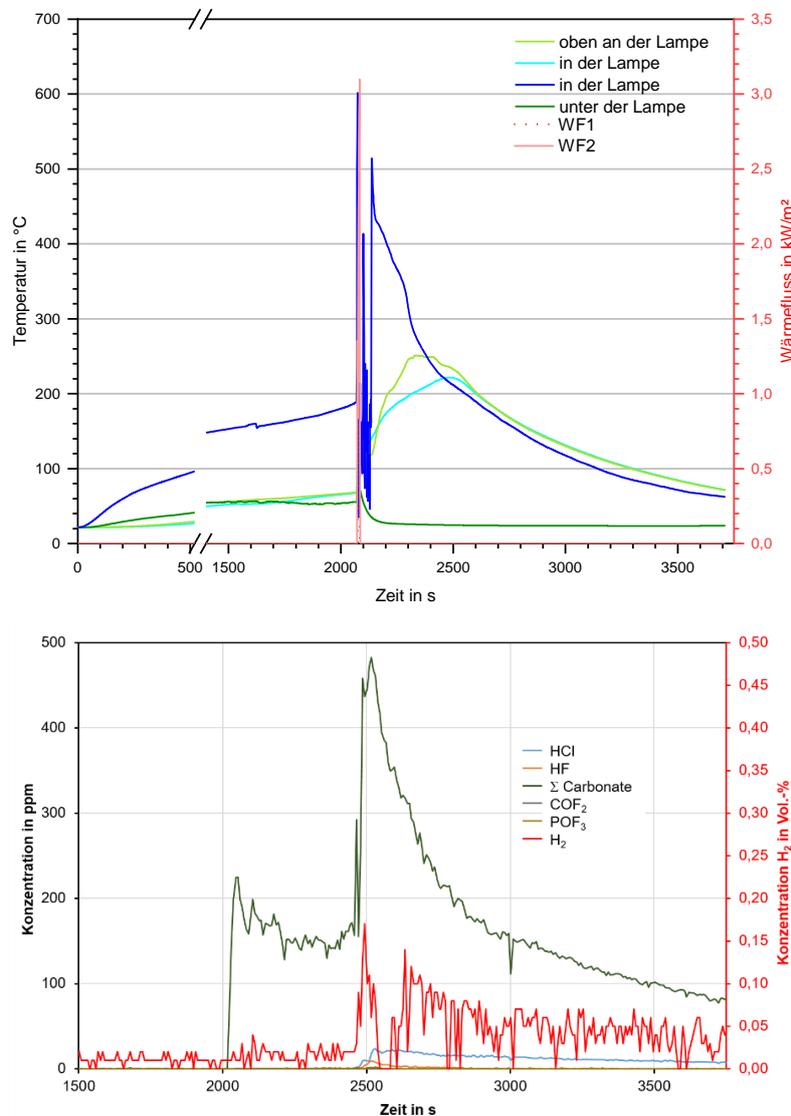


Abbildung 28: Verhalten der Helmlampe beim inneren Defekt (oben physikalische Messwerte T & WF; unten chemische Messwerte)

Im Gegensatz zur Knickkopflampe ist die Helmlampe dichter. Im oberen Diagramm ist an der zweiten blauen Temperaturkurve innerhalb der Lampe (Oberflächenthermoelement) wieder ein kleiner Temperatursprung ( $t = 1600$  s) zu sehen. Im unteren Diagramm der Abbildung 28 erfolgt zu diesem Zeitpunkt kein Gasaustritt. Erst nach der Explosion der LIB zum Zeitpunkt  $t = 2069$  s, gekennzeichnet durch die Peaks der Innentemperatur der Lampe (blau) und der Wärmeflussensoren (rot), sind bei der Messung der Gase Elektrolytfreisetzungen nachweisbar. Im weiteren Verlauf der Brandausbreitung im Gehäuse werden auch HF und Wasserstoff gemessen.

## 5.2.2 Gerichtete Wärmestrahlung auf die Lampen

In einem weiteren Versuch war es das Ziel, den Einfluss der Wärmestrahlung auf die Lampen zu bestimmen. Im Brandbekämpfungsgeschehen können, insbesondere auf die Helmlampe, Wärmeflüsse von mehr als  $20 \text{ kW/m}^2$  einwirken. Dieser Wert tritt üblicherweise vor Beginn des Flashovers, verursacht durch die heiße Rauchgasschicht, auf.

Der verwendete Infrarotstrahler ist temperaturgeregelt. Aufgrund dieser Bedingung und der langsamen Wärmeübertragung auf das jeweilige Prüfobjekt wurde die Gesamtversuchszeit von 30 min auf 3 h erhöht.

In den Abbildungen 29 und 30 sind die zeitabhängigen Verläufe für Temperatur (T) und Wärmefluss (WF) der Experimente der beiden Lampenarten gegenübergestellt. Die zugehörigen Konzentrationsverläufe für ausgewählte Substanzen sind im Anhang 6 dargestellt.

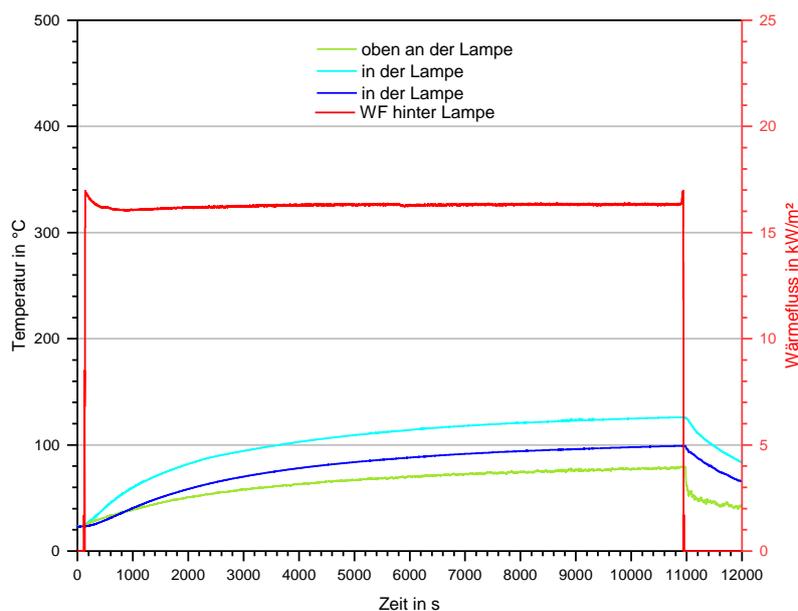


Abbildung 29: Verhalten der Knickkopflampe unter Wärmestrahlungsbeaufschlagung (physikalische Messwerte T & WF)

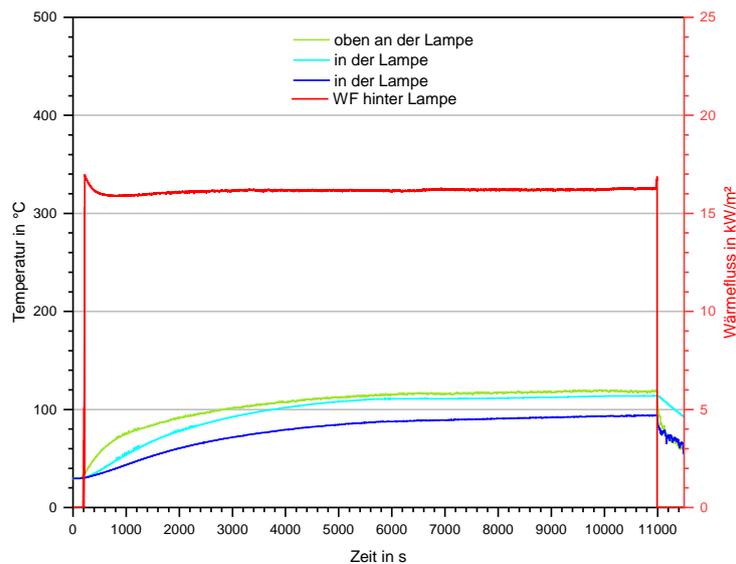


Abbildung 30: Verhalten der Helmlampe unter Wärmestrahlungsbeaufschlagung (physikalische Messwerte T & WF)

Wie in den beiden Abbildungen 29 und 30 zu erkennen ist, besitzt die Wärmestrahlung keinen Einfluss auf beide Lampentypen. Trotz der Wärmestrahlung, die direkt hinter dem jeweiligen Prüfobjekt mit einem Wert von ca. 16,5 kW/m<sup>2</sup> gemessen wurde, erwärmt sich die LIB auf Werte um 100 °C. Über einen Zeitraum von mehr als 80 min ( $dT/dt \Rightarrow 0 \text{ K/s}$ ) erfolgte keine Reaktion der LIB. Es trat kein thermal runaway ein. Dies zeigen bei beiden Lampen auch die chemischen Messdaten (vgl. Anhang 6).

### 5.2.3 Direkte Beflammung der Lampen mit offenem Feuer

Während der Brandbekämpfung ist der Kontakt der Ausrüstungsgegenstände mit Flammen möglich. Dies kann durch das Abfallen der Lampe oder durch eine unbemerkte Flammeneinwirkung erfolgen. Die Flammeneinwirkung muss nicht dauerhaft auf die Lampe erfolgen. Deshalb wurde diese Belastung mit einem Poolfeuer (n-Heptan) mit einer limitierten Abbrandzeit von ca. 5 min sichergestellt. In den beiden nachfolgenden Abbildungen 31 und 32 sind die erzielten physikalischen und chemischen Messdaten dargestellt.

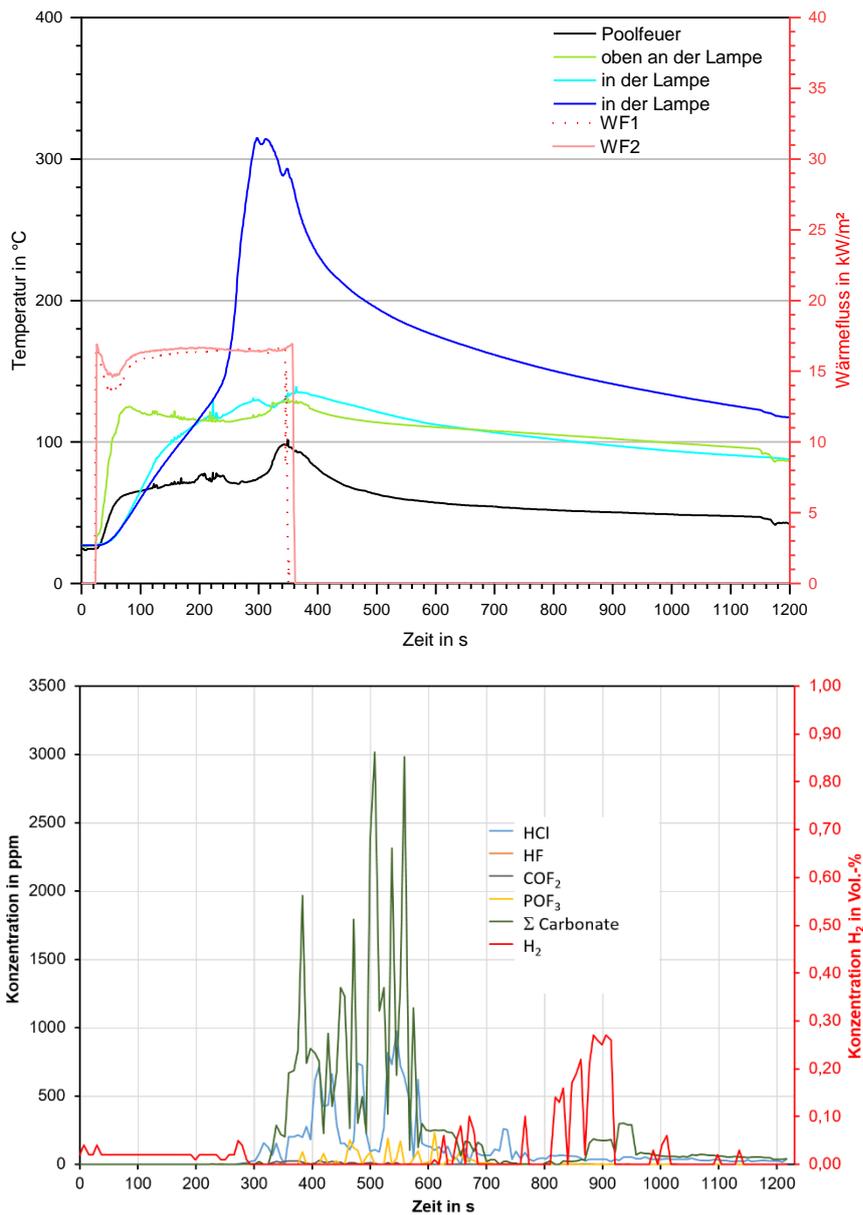


Abbildung 31: Konfrontation der Knickkopflampe mit offenem Feuer (oben physikalische Messwerte T & WF; unten chemische Messwerte)

Anhand des oberen Diagramms in der Abbildung 31 für die Knickkopflampe ist zu erkennen, dass die Brenndauer des Poolfeuers offenbar länger als 5 min (300 s) war. Sowohl die Temperaturkurve des Poolfeuers (schwarz Kurve) als auch die beiden Messsignale der Wärmeflussensoren (WF - rote Kurven) weisen darauf hin. Die beiden blauen Kurven, die die Temperatur im Inneren der Lampe darstellen, weisen Auffälligkeiten im Kurvenverlauf auf. Der dunkelblaue Verlauf springt ab einem Zeitpunkt  $t = 250$  s auf über  $300$  °C. Zuvor durchläuft die hellblaue Kurve einen kleinen Temperaturpeak bei  $t = 222$  s mit einem  $\Delta T = 15$  K. Dieser kennzeichnet den Beginn des thermal runaway der LIB und endet in einer Explosion zu dem Zeitpunkt, an dem die dunkelblaue Kurve ihr Maximum bei  $t = 297$  s mit  $T = 315$  °C durchläuft. Durch die Videoauswertung (hier nicht dargestellt) wurde ermittelt, dass das Prüfobjekt nicht in seiner Position verblieb, sondern Teile davon in die Brandwanne des Poolfeuers fielen und

dort weiter brannten. Dadurch erklärt sich der weitere Anstieg der Temperatur des Poolfeuers (schwarze Kurve) als auch die Aufrechterhaltung sowie leichte Überhöhung der Wärmefluss signale (rote Kurven) nach dem Zeitpunkt  $t = 320$  s. Im Anschluss an diesen Zeitpunkt fallen alle Werte als Folge des endenden thermal runaways.

Im unteren Diagramm der Abbildung 31 sind zu den genannten Zeitpunkten mit einer geringen Zeitverzögerung ebenso Reaktionen erkennbar. Ab einem Zeitpunkt von  $t = 279$  s wurde ein kleiner Anstieg der Wasserstoffkonzentration (rote Kurve) verzeichnet. Dieser kann aus der Gasfreisetzung zum Beginn des thermal runaway resultieren. Bei Berücksichtigung einer ungleichmäßigen Richtung bei der Gasfreisetzung, kann dieser schwache Peak erklärt werden. Das freigesetzte Gas, das mit der Flamme oder heißen Oberflächen Kontakt besitzt, wurde umgesetzt.

Danach nehmen die Konzentrationen von Chlorwasserstoff und den summierten Carbonaten zu. Ab dem Zeitpunkt  $t = 400$  s registriert der Analysator Fluorwasserstoff. Ab diesem Zeitpunkt fallen die Temperaturwerte im System wieder.

Nachdem die Verbrennungsprozesse durch Poolfeuer und LIB beendet sind, sinkt die Fluorwasserstoffkonzentration. Ab diesem Zeitpunkt steigt die freigesetzte Wasserstoffkonzentration bis zu einem Wert  $c = 0,27$  Vol.-% an.

In der Abbildung 32 wurden die zeitlichen Verläufe der physikalischen und der chemischen Messwerte für die Flammenbeaufschlagung der Helmlampe durch ein *n*-Heptan Poolfeuer dargestellt.

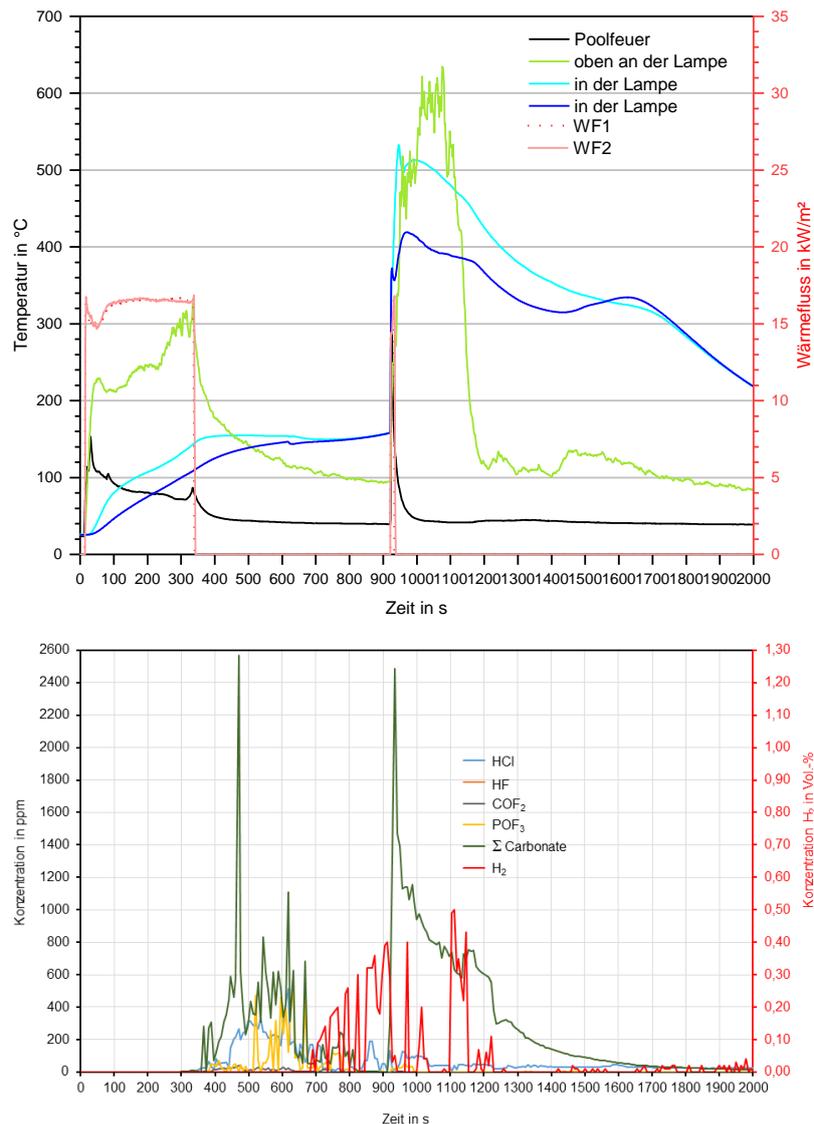


Abbildung 32: Konfrontation der Helmlampe mit offenem Feuer (oben physikalische Messwerte T & WF; unten chemische Messwerte)

Im Gegensatz zur Knickkopflampe weichen die in den Diagrammen der Abbildung 32 zusammengestellten Kurvenverläufe der physikalischen und chemischen Messwerte ab. Ein Grund hierfür sind die geometrischen Verhältnisse der beiden Lampen. Da der experimentelle Aufbau innerhalb der Versuchskammer nicht geändert wurde, kann der anfängliche Temperaturanstieg an dem Thermoelement oben auf der Helmlampe (grüne Kurve im oberen Diagramm) durch die Flamme des Poolfeuers erklärt werden. Jedoch ist während der Flammenbeaufschlagung durch das Poolfeuer (vgl. oberes Diagramm rote und schwarze Kurve) bei  $t = 340$  s keine markante Reaktion durch die Helmlampe und deren LIB in der Abbildung 32 erkennbar. Die inneren Temperaturen (blaue Kurven im oberen Diagramm) steigen zunächst an und verharren in einem Temperaturbereich von ca.  $150$  °C. Die Messwerte des FTIR-Spektrometers zeigen keine wesentlichen Veränderungen.

Im Zeitbereich zwischen  $t = 340 - 922$  s sind kaum Temperaturschwankungen im Prüfobjekt (grüne Kurven im oberen Diagramm der Abbildung 32) aufgetreten. Die

Konzentrationsverläufe des FTIR-Spektrometers zeigen dagegen ab dem Zeitpunkt  $t = 366$  s eine zunehmende Konzentration an gasförmigen Elektrolyten (grüne Kurve im unteren Diagramm der Abbildung 34), gefolgt vom Zwischenprodukt  $\text{POF}_3$  (gelbe Kurve). Dies ist ein Indiz für den Beginn des thermal runaways. Zeitgleich steigt die Konzentration der Gasspezies  $\text{HCl}$  an, was darauf hinweist, dass sich Kunststoffe (z. B. Isolation, Verbindungskabel etc.) in unmittelbarer Umgebung der LIB zersetzen. Der Gasaustritt der Elektrolyte aus der LIB ist nicht zwingend an eine Wärmefreisetzung gekoppelt, insbesondere, wenn der thermal runaway zeitversetzt verläuft. Im Gegensatz hierzu ist eine Gasexpansion in einem kleinen Volumen mit einem Temperaturabfall verbunden. Dies bedingt das Verhalten der Temperaturkurven.

Ab dem Zeitpunkt  $t = 691$  s strebt die Gasfreisetzung des Zwischenprodukts  $\text{POF}_3$  (gelbe Kurve) gegen Null und die Freisetzung von  $\text{H}_2$  (rote Kurve) nimmt zu. Dieses Verhalten deutet an, dass der thermal runaway weiter voranschreitet

Beim Zeitpunkt  $t = 922$  s explodiert die Helmlampe. Dabei wird die freigesetzte Energie sowohl durch die unterschiedlichen Thermoelemente als auch durch die Wärmeflussensoren registriert. Zeitgleich verebbt die Gasfreisetzung von  $\text{H}_2$  und die Summe der Carbonate durchläuft ein Maximum. Die LIB innerhalb der Helmlampe hat sich unter Beschädigung des Lampengehäuses exotherm umgesetzt

Durch Videoauswertung (hier nicht dargestellt) wurde ermittelt, dass am Prüfobjekt unmittelbar nach Erlöschen des Poolbrandes kein offenes Feuer sichtbar war. Erst zu dem Zeitpunkt  $t = 922$  s wurde in beiden Videoaufzeichnungen (infrarot und visuell) eine Flammenerscheinung verzeichnet.

Anhand dieser Versuche wurde die Zusammensetzung der auftretenden Elektrolyte (vgl. Tabelle 1) der Akkumulatoren bei den Prüfobjekten, Knickkopflampe und Helmlampe, untersucht.

Für die Zusammensetzung der Elektrolyte wurden über die ganze Laufzeit des Experiments die gemessenen FTIR-Beiträge der einzelnen Carbonate aufsummiert. Die erhaltenen Summen wurden anschließend gegenseitig ins Verhältnis gesetzt. In der Abbildung 33 sind die berechneten Werte als prozentuale Verteilung dargestellt.

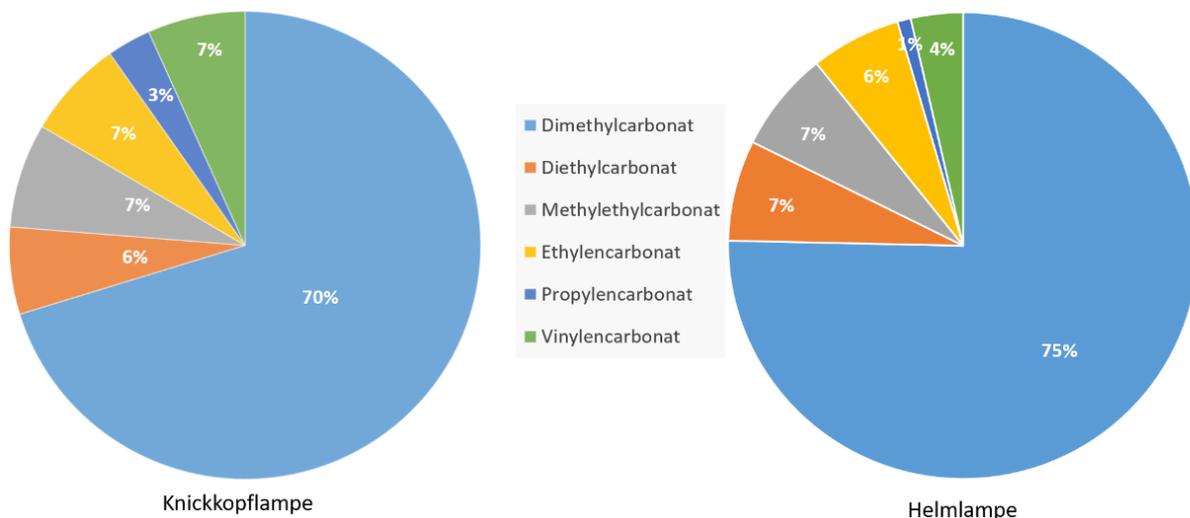


Abbildung 33: Zusammensetzung der Carbonate (Elektrolyte) aus den Poolfeuerversuchen

Aus der Abbildung 33 ist ersichtlich, dass eine sehr ähnliche Zusammensetzung an Elektrolyten in beiden Akkumulatoren der Knickkopflampe und der Helmlampe enthalten sind. Geringe Unterschiede sind beim Propylencarbonat, Vinylencarbonat und Dimethylcarbonat zu verzeichnen. Das Lösungsmittelgemisch Dimethylcarbonat, Diethylcarbonat und Methylethylcarbonat bilden das ternäre System, welches das Leitsalz löst und den Ionentransport ermöglicht. Propylencarbonat setzt die Siedetemperatur der Elektrolytlösung herauf. Sowohl das Vinylencarbonat wie auch das Ethylencarbonat sind Additive, welche die Optimierung der sogenannten „Solid Electrolyte Interface“ (SEI) begünstigen und damit die Lebensdauer sowie die Leistungsfähigkeit des LIB erhöhen.

#### 5.2.4 Direkte Beflammung des LIB ohne Lampengehäuse mit offenem Feuer

Um Aussagen, insbesondere zu den zuvor durchgeführten Gasmessungen zu erlangen, wurde hierfür eine LIB ohne Gehäuse direkt beflammt. Im Gegensatz zu den Beflammungen der gesamten Lampe wurde hierbei *iso*-Propanol verwendet. Im Gegensatz zum *n*-Heptan verbrennt *iso*-Propanol rückstands- und rußfrei, was die Gasmessung weniger stark beeinflusst. Die Brenndauer des Poolbrandes lag bei 166 s.

In der Abbildung 34 wurden die zeitlichen Verläufe der physikalischen und chemischen Messwerte während des Versuchs dargestellt.

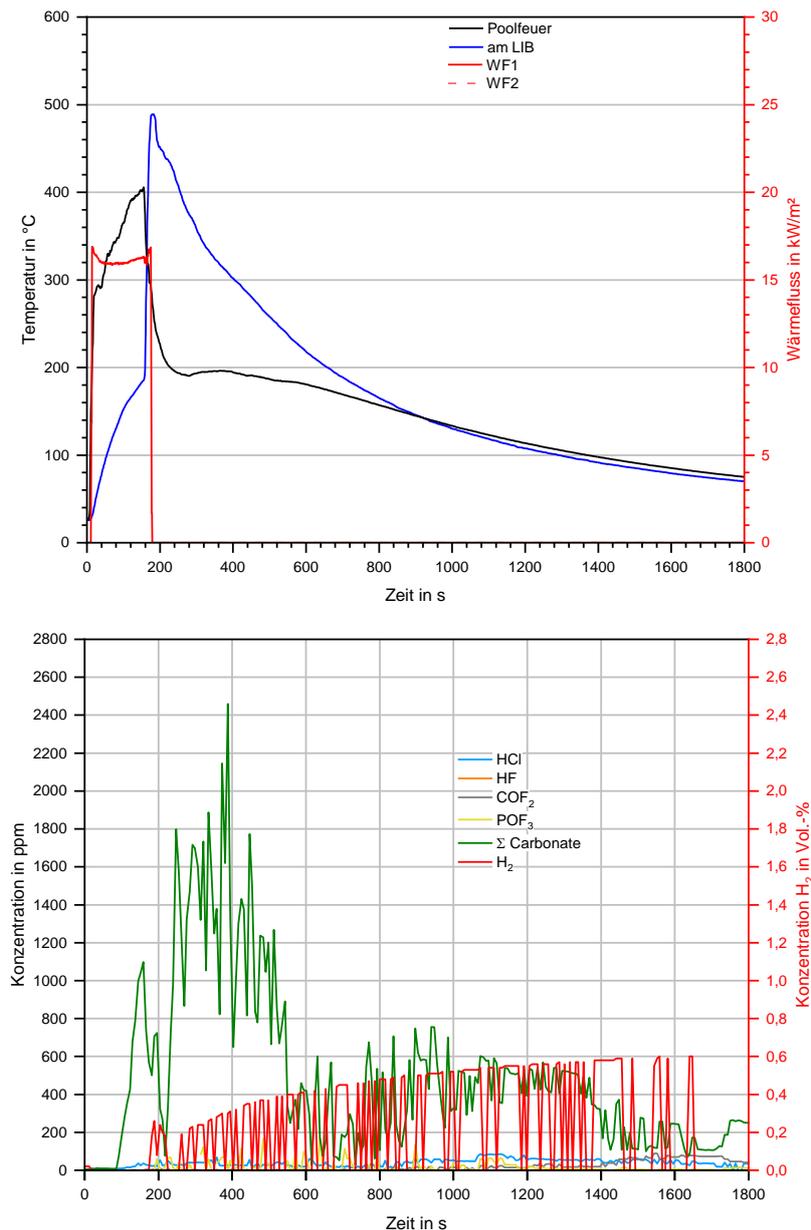


Abbildung 34: Beflammung eines LIB ohne Gehäuse (oben physikalische Messwerte T & WF; unten chemische Messwerte)

Bei der Beflammung der reinen LIB begann diese ab einen Zeitpunkt von 93 s zu reagieren, indem sich mindestens ein Überdruckventil öffnete und Elektrolyte freigesetzt wurden. Anhand der Temperaturkurve des Poolfeuers (schwarz) im oberen Diagramm und den zugehörigen Wärmeflusskurven (rot) ist die Abbrandzeit des Poolfeuers deutlich erkennbar. Im unteren Diagramm ist anhand der grünen Kurve ( $\Sigma$  Carbonate) die Elektrolytfreisetzung nach der Hälfte der Abbrandzeit erkennbar.

Danach steigt die Temperatur am Mantel der LIB (blau Kurve im oberen Diagramm) auf einen Temperaturwert von 490 °C. Dieser Zeitpunkt markiert die explosionsartige Freisetzung des Inhaltes der LIB. Zu diesem Zeitpunkt ist das Poolfeuer verloschen. Nachfolgende Reaktionen an der LIB werden nicht erfasst, weil sich das Thermoelement durch die Explosion löste.

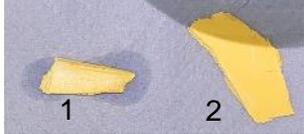
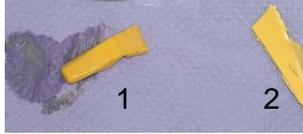
Die FTIR-Analyse weist nach dem Verlöschen des offenen Feuers geringfügig zunehmende Messwerte von Wasserstoff (rote Kurve im unteren Diagramm) und abnehmende Werte für die Summe der Carbonate auf, obgleich die primäre Reaktion der LIB abgeschlossen ist. Die Gesamtsumme der relevanten Stoffe wurden während der Umsetzung der LIB freigesetzt, strömt jedoch aufgrund der fehlenden Thermik in der Versuchskammer nur langsam an der Probennahme des FTIR vorbei.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Gasfreisetzung bei einem inneren Defekt bei beiden Lampentypen moderat ist. Bei direkter Beflammung der Lampen erreichen die freigesetzten Konzentrationen Werte wie bei einer Umsetzung des ungeschützten LIB.

### **5.2.5 Weitere Einflussfaktoren den bestimmungsmäßigen Betrieb von LIB betriebenen Lampen**

In den vorangestellten Experimenten wurden mögliche Randbedingungen getestet, die die LIB in dem Ausrüstungsgegenstand beeinflussen können. Dabei wurde auf eine aggressive Umgebung, hervorgerufen durch Rauchgasbestandteile wie Chlorwasserstoff/ Salzsäure, verzichtet. Eine Einflussnahme durch diese Bestandteile im Einsatz kann nicht ausgeschlossen werden. Das Gehäusematerial der Prüfkörper ist aus Acrylnitril/Butadien/Styrol (kurz: ABS) und besitzt eine Brandbeständigkeit V0 nach UL94 [57]. Grundsätzlich ist dieses Material gegen verschiedene Substanzen chemisch beständig. Aber Substanzen der Gruppen aromatische Kohlenwasserstoffe, starke Mineralsäuren und Aceton können das Material angreifen. Aus diesem Grunde wurden diese an Materialproben für beide Lampen mit Vertretern der jeweiligen Gruppe (aromatische Kohlenwasserstoffe: Toluol, starke Mineralsäuren: HCl und Aceton) getestet. Hierzu wurden die Materialproben erzeugt, indem die vorhandenen Gehäuse zerstört und in kleine Stücke zerteilt wurden. Diese Stücke wurden 30 min in der jeweiligen Substanz mit einem Volumen von 20 ml überschichtet und danach mit einer unbehandelten Materialprobe verglichen. In der Tabelle 7 sind die Ergebnisse gegenüber gestellt für beide Lampenarten und die drei Chemikalien.

Tabelle 7: Chemische Beständigkeit der Materialproben für beide Lampen

		Substanzen		
		Toluol	HCl	Aceton
Prüfkörper	Helm- lampe			
	Knickkopf- lampe			

Der Vergleich der behandelten Probe mit einer unbehandelten Probe ergab, dass die Substanzen Toluol und Aceton keine sichtbare Veränderung an den Proben verursachen (vgl. Tabelle 7). In der Substanz selbst wurden keine Rückstände wahrgenommen. Die Behandlung mit ca. 10 %-iger HCl-Säure löste die Oberfläche der untersuchten Probe an. Teilweise verblieben gelbe Schlieren des Kunststoffes in der Substanz. Die Oberfläche der Proben erweichten nach der Behandlung und hafteten an anderen Oberflächen bei Berührung an (s. Tabelle 7, Spalte HCl).

Dieses Ergebnis zeigt die Wichtigkeit der Reinigung von Ausrüstungsgegenständen nach einem Einsatz und verstärkt die Forderung nach Reinigung der Ausrüstungsgegenstände. In unterschiedlichen Brandbekämpfungsszenarien sind Kunststoffe als Brandlast beteiligt. Sie setzen beim Verbrennen als Brandgas u. a. HCl frei. Eine Reinigung nach den Einsätzen ist zur Verhinderung von Stabilitätsverlusten zwingend notwendig.

Weiterhin ist die Reinigung vor dem erneuten Ladevorgang der LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstände erforderlich, um mögliche Kondensate oder Ablagerungen zwischen den Ladekontakten zu entfernen. In der Abbildung 35 wurden Detailaufnahmen für die Ladekontakte an der Helmlampe und in der zugehörigen Ladeschale zusammengestellt. Im Anhang 7 befindet sich eine entsprechende Zusammenstellung für die Knickkopflampe.



Ladekontakte auf der Unterseite der Helmlampe



Ladekontakte an der Ladeschale



Höhenprofil an den Ladekontakten der Helmlampe



Helmlampe in Ladeschale

*Abbildung 35: Detailansichten zu den Ladekontakten an der Helmlampe und der zugehörigen Ladeschale*

Die konstruktiven Maßnahmen des Herstellers verhindern bei beiden Lampentypen, dass Kondenswasser sich an den Ladekontakten der Ladeschale sammelt und dadurch zu einem Kurzschluss führen kann (vgl. Abbildung 35, rechte Seite). Nichtsdestotrotz können sich zwischen den Ladekontakten an der Lampe (vgl. Abbildung 35, linke Seite) Kondensate unterschiedlicher Natur abscheiden und Ablagerungen anhaften, so dass eine elektrisch leitende Verbindung zwischen den beiden Ladekontakten entstehen kann. In diesem Fall könnte ein Kurzschluss beim Ladevorgang erfolgen und damit die LIB innerhalb der Lampe in den kritischen Zustand übergehen. Dies gilt ebenso für die Knickkopflampe.

Um einen solchen Kurzschluss zu vermeiden, sollten die Lampen unbedingt nach dem Einsatz gesäubert werden, bevor diese in die Ladeschale zurückgesteckt werden.

### 5.3 Fazit aus den Ergebnissen der simulierten Einsatzszenarien

Die durchgeführten Experimente zeigten, dass die Luftfeuchtigkeit trotz der effektiveren Wärmeübertragung keinen maßgeblichen Einfluss auf das Verhalten der LIB innerhalb der beiden Lampenmodelle besitzt. Der Einfluss der Umgebungstemperatur ist weit höher. Im Fall der Helmlampe wurde festgestellt, dass sich die Temperatur der LIB infolge der externem Wärmebeaufschlagung um 5 – 20 K erhöht. Im Fall der Knickkopflampe zeigte sich, dass diese ihr Licht selbsttätig deaktiviert, wenn die Temperatur in der Lampe einen Wert von  $(70,4 \pm 10,6) \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht. Im verwendeten Klimaschrank schaltete sich das Leuchtmittel somit nach  $(19 \pm 3) \text{ min}$  ab.

Die Knickkopflampe kann in der Brusttasche getragen werden. Da Einsatzkleidung eine vor Wärme schützende Funktion besitzt, wurde der Einfluss der isolierenden Kleidung auf das Lampenverhalten im Klimaschrank untersucht. Es wurde dabei ermittelt, dass die Verarbeitung der Einsatzbekleidung (Materialien, Schnitt) einen Einfluss auf die Schutzwirkung besitzt.

Durch die isolierenden Eigenschaften der Einsatzjacken erhöhte sich die Leuchtzeit der Lampe auf über 30 min.

Eine Untersuchung zu Temperatursprüngen in der Umgebung der LIB betriebenen Lampen, so wie sie im Einsatzgeschehen auftreten können, wurde durchgeführt. Beide Lampen änderten ihr Verhalten jedoch nicht.

Bei den praxisnahen Experimenten wurde der innere Defekt der LIB nachgestellt. Bei beiden Lampen kam es zu einem thermal runaway der LIB. Diese setzten verschiedene Gase frei und explodierten am Ende ihres thermischen Durchgehens. Durch das Gehäusematerial verlief die Reaktion nach außen sehr gedämpft ab. Die Lampen wurden zerstört, aber in geringem Maße. Die Experimente zur Beaufschlagung der Lampe mit Wärmestrahlung führten zu dem Schluss, dass beide Lampen der Wärmestrahlung ausgezeichnet widerstehen. Eine höhere Beaufschlagungszeit oder eine höhere Strahlungsintensität könnte dazu führen, dass sich das jeweilige Lampeninnere auf kritische Temperaturen für die LIB erhöht. Diese würden Extremsituationen, wie dem Flashover, entsprechen. Solche Bedingungen waren aber nicht das Ziel des Forschungsprojektes.

Eine direkte Beflammung beider Lampen führte die jeweilige LIB in den thermal runaway. Dabei wurden die Lampen komplett zerstört, weil das Gehäusematerial durch die Beflammung zerstört wurde. In beiden Fällen wurde neben den Elektrolyten, den Zwischenprodukten bei der Bildung zum HF auch Wasserstoff frei. Dieses Ergebnis zu den freigesetzten Gasen und deren Größenordnung wurde in einem Experiment mit direkter Beflammung eines ungeschützten LIB bestätigt. Bei der Knickkopflampe wurde zudem das Gas HF in einer Konzentration von 11 ppm nachgewiesen. Bei beiden Lampen wurde durch den Abbrand des Gehäuses HCl freigesetzt. Aus diesem Experiment wurde zusätzlich ermittelt, dass die Zusammensetzung der Elektrolyte in den beiden LIB ähnlich ist.

Abschließend wurde die Chemikalienbeständigkeit der Lampengehäuse überprüft, da diese hauptsächlich mit aggressiven Gasen der Rauchgasschicht in Kontakt treten können. Im Ergebnis waren beide Gehäuse gegenüber Salzsäure unbeständig. Nach einer Einwirkzeit von 30 min wurde festgestellt, dass die Oberfläche des Materials angelöst ist. Hieraus ergibt sich die Forderung nach sofortiger Reinigung der Ausrüstungsgegenstände nach einem Einsatz.

Diese Forderung wird unterstützt durch die Feststellung, dass mögliche Anhaftung von Kondensaten und Partikeln zwischen den beiden Ladepunkten zu einem Kurzschluss beim Ladevorgang führen können. Eine Säuberung würde dem entgegenwirken.

## 6 Handlungsempfehlungen für die Feuerwehren

Die Lithium-Ionen-Technologie wird zunehmend weiter in die Bereiche der Feuerwehr vordringen. Für einen verantwortungsbewussten Umgang mit solchen Ausrüstungsgegenständen und der Vermeidung von kritischen Situationen durch diese Technologie werden an die deutschen Feuerwehren nachfolgende Empfehlungen gegeben:

- Die Erstellung von Gefährdungsbeurteilungen und Handlungsanweisungen für LIB-Ausrüstungsgegenstände in den Feuerwehren ist notwendig.
- Die Verantwortlichkeit bei Wartung und der Prüfung von privat erworbene Ausrüstungsgegenständen mit Lithium-Ionen-Technologie (z. B. Helmlampen) im Einsatz bedarf einer Klärung.
- Die Einsatzkräfte sollten nachdrücklich aufgefordert werden, dass die Mitnahme von privaten LIB betriebenen Gegenständen aus Sicherheitsgründen zu unterlassen ist. Die Mitnahme ist verboten!
- Die Wartungs- und Prüfungsaufgabe der LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstände sollten an die Gerätewarte ggf. das zuständige FTZ der Feuerwehr zugewiesen werden.
- Die Unterweisung der Gerätewarte, Mannschaft und Einsatzkräfte mit dem Fokus auf die Strategie der Wartung und Prüfung von Ausrüstungsgegenständen mit LIB-Technologie sollte forciert werden.
- Hygieneregeln sind grundsätzlich einzuhalten. Dies gilt auch für LIB betriebene Ausrüstungsgegenstände, insbesondere sollte ein getrennter Transport bis zur Reinigung und Prüfung der Ausrüstungsgegenstände (abhängig von Einsatzart und Gerätebeanspruchung) realisiert werden.
- Die Einsatzkräfte sind hinsichtlich der Einhaltung und Umsetzung der Einsatzhygiene von Ausrüstungsgegenständen zu sensibilisieren.
- Eine Reinigung der LIB-Gegenstände von Anhaftungen und Kondensaten, insbesondere nach der Brandbekämpfung, sollte durchgeführt werden.
- Unmittelbar nach dem Kontakt mit Feuchtigkeit und Verschmutzung darf keine direkte Ladung von LIB-Gegenständen erfolgen (Kurzschlussgefahr der Ladekontakte möglich).
- Ein achtsamer Umgang mit Technik auf Basis der Lithium-Ionen-Technologie wird empfohlen.
- Den Hersteller-Forderungen und den Normen sollte Folge geleistet werden, u. a. durch:
  - Verwendung von originaler LIB in den Ausrüstungsgegenständen,
  - Gewährleistung der Sicherheit der Gegenstände durch einen fest definierten Personenkreis,
  - Einhaltung von vorgegebenen Lade- und Entladezyklen.

- Wünschenswert ist eine zusätzliche Prüfung durch die Mannschaft und den Nutzer selbst unmittelbar nach dem Einsatz und bevor die Ausrüstungsgegenstände wieder in die Ladeschalen verbracht werden.

## 7 Zusammenfassung

Ziel dieses Vorhabens war es, Empfehlungen für den sicheren Einsatz von LIB in Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehren zu erarbeiten. Die Aktualität für die Bearbeitung dieser Problematik resultiert aus der zunehmenden Verwendung entsprechender Ausrüstungsgegenstände bei den Feuerwehren.

Bedingt durch das vielschichtige Aufgabenspektrum der Feuerwehr wurden zwei wesentliche Einsatzszenarien - die Technische Hilfeleistung und die Brandbekämpfung – identifiziert, in denen vermehrt Geräte mit LIB im Einsatz genutzt werden. Jedoch steht speziell die Brandbekämpfung im Fokus dieses Projektes. Daher wurde sich auf die Simulation der rauen Umgebungsbedingungen bei der Brandbekämpfung konzentriert und die als kritisch für die Ausrüstungsgegenstände mit LIB-Technologie erachteten Konditionen betrachtet. Aus den rauen Umgebungsbedingungen wurden die Parameter für die experimentellen Untersuchungen abgeleitet.

Diese Parameter sind die relative Luftfeuchtigkeit, die Temperatur und die Wärmestrahlung in Höhe der Einsatzkraft und damit der mitgeführten LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstände sowie die Temperatur in unbeheizten Gerätehäusern. Des Weiteren wurde untersucht, welches Verhalten die LIB-Ausrüstungsgegenstände bei einem inneren Defekt der LIB besitzen und wie sie bei direkter Beflammung des Ausrüstungsgegenstandes, der direkten Beflammung des LIB infolge eines beschädigten Gehäuses verhalten und ob die chemische Beständigkeit des Gehäuses gegeben ist.

Vor den experimentellen Untersuchungen anhand der genannten Parameter wurde zu Vorkommnissen im Einsatz- und Übungsdienst und zu geltenden Gesetzlichkeiten recherchiert. Die Richtlinien, Normen, Vorschriften und Empfehlungen sind vielfältig. Sie berücksichtigen noch nicht vollumfänglich das Thema der LIB in Ausrüstungsgegenständen. Ursächlich hierfür ist die hohe Dynamik der Verbreitung der LIB und deren stetig fortschreitender Weiterentwicklung.

Die Anzahl der nachweislichen Vorkommnisse ist gering. Aus den Rückmeldungen der angefragten Behörden, Versicherungen und Organisationen oder deren Fehlanzeige hierzu lässt vermuten, dass keine Vorkommnisse mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen in den Feuerwehren auftraten. Diese Schlussfolgerung ist trügerisch, wie aus der durchgeführten Datenerhebung bei den Feuerwehren resultierte. Insbesondere bei Bränden mit involvierten Feuerwehrfahrzeugen (ggf. im Gerätehaus) und der ermittelten Brandursache „technischer Defekt“ besteht der Verdacht, dass LIB betriebene Gegenstände die Initialfeuer für die Brände geliefert haben könnten.

Die Datenerhebung, auch wenn sie nur als Stichprobe zu sehen ist, ergab umfangreiche Aufschlüsse über die Verbreitung, den Umgang und die Risikoeinschätzung bei den Feuerwehren. Die Akzeptanz dieser modernen Technik und den damit verbundenen Vorteilen

ist hoch. Abhängig vom finanziellen Budget und der Dringlichkeit sind in den Feuerwehren Ausrüstungsgegenstände mit LIB-Technologie vorhanden oder sollen zukünftig beschafft werden.

Defizite, die sich aus der Umfrage ergeben haben, bestehen bei der Schulung von Gerätewarten und den Einsatzkräften, der Umsetzung der Einsatzstellenhygiene sowie der Erstellung von Gefährdungsbeurteilungen und daraus abgeleiteten Handlungsanweisungen. Anhand der oben aufgeführten Parameter wurden mit zwei Prüfobjekten (Helmlampe und Knickkopflampe), die in der Datenerhebung häufig im Brandeinsatz angewendet werden, experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Danach halten die Prüfobjekte sehr gut den unterschiedlichen zeitlichen Belastungen bei einer Temperatur von 85 °C stand. Die LIB der Helmlampe produziert während des Leuchtens Eigenwärme, welche jedoch unkritisch für die LIB selbst und das Gerät ist. Eine Beeinflussung durch die in Versuchen erzeugte Luftfeuchtigkeit wurde nicht festgestellt. Auch ein sprunghafter Temperaturwechsel zwischen -5 °C und 85 °C verursachte kein kritisches Verhalten des LIB. An der Knickkopflampe wurde der Schutz vor Wärme durch Einsatzkleidung getestet und eine Abhängigkeit des Schutzes von dem Material und der Konfektionierung gezeigt.

Bei den praxisnahen Untersuchungen an beiden Prüfobjekten wurde gezeigt, dass die Einsatzkraft beim inneren Defekt der LIB ausreichend vor Explosion und Flammen der LIB geschützt ist. Die von der LIB freigesetzten Gase – Elektrolyte, Reaktionszwischen- und Endprodukte  $\text{COF}_2$  &  $\text{POF}_3$ , HF,  $\text{H}_2$  – sowie Rauchgase von den umgebenden Kunststoffen – HCl – sind für die Einsatzkraft, vorausgesetzt diese arbeitet unter Atemschutz, als moderat anzusehen. Weiterhin bewirkt ein Wärmefluss von 16,5 kW/m<sup>2</sup> keine Reaktion bei den Prüfobjekten. Eine direkte Beflammung der Lampen ist zu vermeiden. Je nach Dauer der Beflammung und dem Zustand des Lampengehäuses (Unversehrtheit erforderlich) kann die LIB in einen thermal runaway übergehen. Durch die Beflammung kann das Lampengehäuse derartig beschädigt werden, dass die aus dem thermal runaway resultierende Explosion/Selbstentzündung sowie die freigesetzten Gasbestandteile des LIB zum Schaden der Einsatzkraft führen. Insbesondere der nicht definierbare Zeitraum zwischen der ursächlichen Beflammung und dem Beginn des thermal runaway kann dazu führen, dass die Einsatzkraft keine persönliche Schutzkleidung mehr trägt.

Die mechanische Stabilität des Lampengehäuses wird durch Kontakt mit Rauchgasbestandteilen (vornehmlich HCl) beeinträchtigt. Zudem können Kondensate aus dem Brandrauch auf der Oberfläche zwischen den Ladekontakten zu einem Kurzschluss dieser führen. Daher sollten die Lampen nach dem Brandbekämpfungseinsatz schnellstmöglich gereinigt werden.

**Aus den Untersuchungen wird geschlossen, dass die untersuchten LIB betriebenen Ausrüstungsgegenstände den Anforderungen des Feuerwehreinsatzes, insbesondere der Brandbekämpfung, umfänglich genügen. Dabei sind die Herstellerangaben zu Umgang, Wartung und Prüfung zu befolgen. Beschädigte oder nicht bestimmungsmäßig funktionierende Ausrüstungsgegenstände sind aus dem Verkehr zu ziehen.**

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG (AFKzV): *Feuerwehr - Dienstvorschrift 1: Grundtätigkeiten - Lösch- und Hilfeleistungseinsatz* - (in Kraft getr. am September 2006) (September 2006) – Überprüfungsdatum 2021-07-16
- [2] AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG (AFKzV): *Feuerwehr - Dienstvorschrift 7: Atemschutz* (in Kraft getr. am Ausgabe 2002 mit Änderungen 2005) (Ausgabe 2002 mit Änderungen 2005) – Überprüfungsdatum 2021-07-16
- [3] AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG (AFKzV): *Feuerwehr - Dienstvorschrift 8: Tauchen* (2002) – Überprüfungsdatum 2021-07-16
- [4] AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG (AFKzV): *Feuerwehr - Dienstvorschrift 500: Einheiten im ABC – Einsatz* (2012) – Überprüfungsdatum 2021-07-16
- [5] OBERGÖKER, F.: *Fachthema 5 - PSA Feuerwehr : Benutzung von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) im Feuerwehrdienst*. PowerPoint-Präsentation. URL [https://www.dguv.de/medien/inhalt/praevention/fachbereiche\\_dguv/fb-fhb/veranstaltungen/dezember2016/obergoecker.pdf](https://www.dguv.de/medien/inhalt/praevention/fachbereiche_dguv/fb-fhb/veranstaltungen/dezember2016/obergoecker.pdf) – Überprüfungsdatum 2021-07-19
- [6] UKE UNDERWATER KINETICS EUROPE GMBH: *UK3AA CPO\_ATEX user manual*
- [7] ROBERT BOSCH GMBH: *Bosch GSR 9,6 V PROFESSIONAL Bedienungsanleitung* (2005). URL <https://www.manualslib.de/download/213738/Bosch-Gsr-9-6-V-Professional.html>
- [8] BULLARD: *Bullard TI Commander™ Thermal Imager User Manual*. URL [https://www.bullard.com/uploads/bullard\\_downloads/TI\\_TICOMMANDER\\_USERMANUAL\\_AM\\_EN\\_LOW\\_6050037062.pdf](https://www.bullard.com/uploads/bullard_downloads/TI_TICOMMANDER_USERMANUAL_AM_EN_LOW_6050037062.pdf)
- [9] KORTHAUER, R. (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013
- [10] RAHIMZEI, E., SANN, K., VOGEL, M.: *Kompendium: Li-Ionen-Batterien : Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen*. Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2015
- [11] KEUTEL, K., JAHN, E., VAN LIER, M.: Verhalten von Li-Ionen-Akkumulatoren bei verschiedenen Brandszenarien. In: *4. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag*.

- [12] ADARO TECNOLOGÍA S.A.: *SICHERHEITSBEDINGTE RÜCKRUFKATION VON AKKUS DER ADALIT LEUCHTEN L3000 UND L3000 POWER*. URL <https://recalladalit.com/RecallAdalit/>
- [13] HÜBNER, J.: *Lithium-Ionen-Akkus: Die unterschätzte Gefahr*. In: *Feuerwehr* (2018), Nr. 4, S. 30–31
- [14] GARCHE, J. (Hrsg.); BRANDT, K. (Hrsg.): *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications*. Li-Battery Safety. 1. Aufl. Amsterdam, Oxford, Cambridge: Elsevier B.V., 2019
- [15] SUN, YY., HSIEH, TY., DUH, YS., KAO, CS.: *Thermal behaviors of electrolytes in lithium-ion batteries determined by differential scanning calorimeter*. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 116 (2014), Nr. 3, S. 1175–1179
- [16] DGUV: *GESTIS-Stoffdatenbank*. URL <https://gestis.dguv.de/>
- [17] MINISTERIUM FÜR INNERES UND SPORT SACHSEN-ANHALT (Hrsg.): *Ereignisbericht der Feuerwehr für das Land Sachsen-Anhalt, die Landkreise und kreisfreien Städte: Jahresbericht 2018*. Heyrothsberge, 2018
- [18] DARMSTÄDTER, S.: *Statistik*. URL <https://www.feuerwehrverband.de/app/uploads/2020/05/Statistik.pdf> – Überprüfungsdatum 2021-07-29
- [19] KUNKELMANN, J.: *BRANDSCHUTZ-FORSCHUNG*. URL <https://www.ffb.kit.edu/download/IMK%20Ber.%20Nr.%20175%20Kunkelmann%20Lithium-Ionen-%20und%20Lithium-Metall-Batterien%20-%20Ueberarbeitung%20-%2003.02.2017%20-%2002.pdf> – Überprüfungsdatum 2021-07-29
- [20] MÜLLER, O.: *Brandschutz bei der Lagerung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren*. Masterarbeit (2020)
- [21] KEUTEL, K., JAHN, E., VAN LIER, M. (Hrsg.): *Verhalten von Li-Ionen-Akkumulatoren bei verschiedenen Brandszenarien*, 2015
- [22] *Lithium-Ionen-Batterien im Tiefkühleinsatz: Geht das?* URL <https://blog.toyota-forklifts.de/lithium-ionen-batterien-im-kuehlhaus>. – Aktualisierungsdatum: 2021-07-23 – Überprüfungsdatum 2021-07-30
- [23] *Digitaler Zwilling analysiert Alterungsverhalten von Li-Ionen-Batterien*. URL <https://www.all-electronics.de/automotive-transportation/digitaler-zwilling-analysiert-alterungsverhalten-von-li-ionen-batterien.html>. – Aktualisierungsdatum: 2021-07-30 – Überprüfungsdatum 2021-07-30

- [24] SIEMENS AG: *Brandschutz für Lithium-Ionen-Batterie-Energiespeicher*. White Paper (2020). URL <https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=A6V11922387> –  
Überprüfungsdatum 2021-07-30
- [25] LSA, M. I.: *Arbeitshinweise Risikoanalyse*. URL [https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik\\_und\\_Verwaltung/MI/IDF/IBK/Dokumente/Service/Downloads/Risikoanalyse/Arbeitshinweise\\_Risikoanalyse\\_Stand\\_Juni\\_2009.pdf](https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MI/IDF/IBK/Dokumente/Service/Downloads/Risikoanalyse/Arbeitshinweise_Risikoanalyse_Stand_Juni_2009.pdf) –  
Überprüfungsdatum 2021-09-30
- [26] NESKE, M.: *Experimentelle Untersuchungen und theoretische Modellierung zu den Auswirkungen von Wärmeexposition auf Pressluftatmer, Vollmasken und Lungenautomaten: Dissertation*, 2015
- [27] NESKE, M.: *Untersuchung der realen thermischen Belastung von persönlicher Schutzausrüstung bei der Brandbekämpfung in Gebäuden und anderen geschlossenen Räumen: IMK-Bericht 191*. Heyrothsberge, 2019
- [28] SCHUBERT, S., SAUPE, A., SCHMIDT, M., KEUTEL, K., KRAUSE, U.: *Realbrandversuchen zu Wohnungsbränden mit moderner Ausstattung*. In: *vfdb-Zeitschrift* 62. (2013), Nr. 3, S. 150–161
- [29] GRABSKI, R., KEUTEL, K.: *Studie Flashover - Früherkennung Teil 2: Untersuchungen zur Produktentwicklung*. Abschlussbericht 2009 (2009), Instituts-Bericht Nr. 453
- [30] CZECH, M. M.: *Verwendung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehr und sich daraus ergebene Gefährdungen*. Bachelorarbeit 2021
- [31] B.Z.: *Handy-Akku bei Brandenburger Feuerwehr explodiert!* In: *B.Z. Online* (2018-08-08)
- [32] IBK HAUSINTERNE MITTEILUNG ABTEILUNG E: *Erfahrungsbericht zum Einsatz von Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Funkgeräten der Feuerwehr* (2020)
- [33] REFERAT 24, MINISTERIUM FÜR INNERES UND SPORT DES LANDES SACHSEN-ANHALT, PERSÖNLICHE MITTEILUNG: *Vorfälle in Sachsen-Anhalt beim Laden von Lithium-Ionen-Akkumulatoren betriebenen Ausrüstungsgegenständen* (2021)
- [34] AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG (AFKzV): *Feuerwehr - Dienstvorschrift 810: Sprech- und Datenfunkverkehr* (in Kraft getr. am Ausgabe 2018 Stand:14. 9. 2018) (Ausgabe 2018 Stand:2018-09-14)
- [35] AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG (AFKzV): *Feuerwehrdienstvorschrift 800: Informations- und*

- Kommunikationstechnik im Einsatz* (in Kraft getr. am Ausgabe 2017 Stand: 6. 11. 2017) (Ausgabe 2017 Stand: 2017-11-06). URL [https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik\\_und\\_Verwaltung/MI/IDF/IBK/Dokumente/Service/Downloads\\_Rechtsvorschriften/Dienstvorschriften/FwDV\\_800\\_Stand\\_2017.pdf](https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MI/IDF/IBK/Dokumente/Service/Downloads_Rechtsvorschriften/Dienstvorschriften/FwDV_800_Stand_2017.pdf)
- [36] 2008-06. *Norm DIN EN 443:2008-06*
- [37] 2016-12. *DIN EN 13204:2016-12*
- [38] 2018-3. *DIN 14649:2018-03*
- [39] REDAKTION: *Lithium-Ionen-Akkus in Elektrogeräten*. In: *DGUV - Arbeit und Gesundheit* (2020-07-07)
- [40] DGVU - FACHBEREICH FEUERWEHREN HILFELEISTUNGEN BRANDSCHUTZ (Hrsg.): *Hinweise zum betrieblichen Brandschutz bei der Lagerung und Verwendung von Lithium-Ionen-Akkus*. Berlin: DGVU, 2020
- [41] BVFA (Hrsg.): *Sicherheitshinweise zum Löschen von Lithium-Ionen-Akkus*. Würzburg: bvfa - Bundesverband Technischer Brandschutz e. V., 2020
- [42] DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG: *DGUV Information 205-014 „Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) auf der Basis einer Gefährdungsbeurteilung für Einsätze bei deutschen Feuerwehren“*. URL <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/874> – Überprüfungsdatum 2021-09-08
- [43] VDS SCHADENVERHÜTUNG GMBH: *Lithium-Batterien* (2019). URL <https://shop.vds.de/download/vds-3103/686cb6bc-71d6-47bf-bd8f-560977ecd7b4> – Überprüfungsdatum 2021-09-08
- [44] TECHNISCH-WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT (TWB) DER VFDB: *Merkblatt Empfehlung für den Feuerwehreinsatz bei Gefahr durch Lithium-Zellen, - Batterien und -Akkumulatoren* (2020). URL [http://www.ref10.vfdb.de/fileadmin/download/merkblatt/MB10\\_17\\_Lithium\\_Batterien\\_Ref10\\_2020\\_09.pdf](http://www.ref10.vfdb.de/fileadmin/download/merkblatt/MB10_17_Lithium_Batterien_Ref10_2020_09.pdf) – Überprüfungsdatum 2021-09-08
- [45] LUKAS HYDRAULIK GMBH: *Bedienungsanleitung LUKAS SP 777 eWXT* (2021). URL [https://lukas.com/rescue/media/pdf/59/61/f9/171233085\\_eWXT\\_manual\\_mail\\_062021.pdf](https://lukas.com/rescue/media/pdf/59/61/f9/171233085_eWXT_manual_mail_062021.pdf) – Überprüfungsdatum 2021-09-08
- [46] SEPURA: *Battery Safety*. URL <https://www.sepura.com/battery-safety>. – Aktualisierungsdatum: 2021-09-08 – Überprüfungsdatum 2021-09-08

- [47] ADARO TECNOLOGIA, S. A.: *Bedienungsanleitung ADALIT L-3000 Power* (2019). URL [https://downloads.adalit.com/TODO/L3000\\_POWER/MANUALES\\_USUARIO/MU-L3000P.pdf](https://downloads.adalit.com/TODO/L3000_POWER/MANUALES_USUARIO/MU-L3000P.pdf) – Überprüfungsdatum 2021-09-08
- [48] 2019-11. *DIN 14530-5:2019-11*
- [49] *150870\_Prospekt\_ARGUS waermebildkamas\_DE.indd* – Überprüfungsdatum 2021-07-27
- [50] DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG: *DGUV Information 205-021 "Leitfaden zur Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung im Feuerwehrdienst"*. URL <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/870> – Überprüfungsdatum 2021-09-13
- [51] BERKEMEYER, K.: *Der Akku explodiert: Weltweiter Verkaufsstopp und Umtausch-Aktion für Samsung Galaxy Note 7*. URL [https://www.chip.de/news/Katastrophe-fuer-Samsung-Weltweiter-Galaxy-Note-7-Rueckruf-naht\\_99279719.html](https://www.chip.de/news/Katastrophe-fuer-Samsung-Weltweiter-Galaxy-Note-7-Rueckruf-naht_99279719.html). – Aktualisierungsdatum: 2021-07-28 – Überprüfungsdatum 2021-07-28
- [52] PRODUKTWARNUNGEN - PRODUKTRÜCKRUF UND VERBRAUCHERWARNUNGEN: *Rückruf: Brandgefahr – HP weitet weltweite Akku-Rückrufaktion für Notebooks erneut aus*. URL <https://www.produktwarnung.eu/2019/09/10/rueckruf-ueberhitzung-hp-startet-weltweite-akku-rueckrufaktion/12389>. – Aktualisierungsdatum: 2021-07-28 – Überprüfungsdatum 2021-07-28
- [53] PRODUKTWARNUNGEN - PRODUKTRÜCKRUF UND VERBRAUCHERWARNUNGEN: *Rückruf: Überhitzungsgefahr bei einer Charge der VARTA Power Bank 5200*. URL <https://www.produktwarnung.eu/2019/02/15/rueckruf-ueberhitzungsgefahr-bei-einer-charge-der-varta-power-bank-5200/12782>. – Aktualisierungsdatum: 2021-07-28 – Überprüfungsdatum 2021-07-28
- [54] ACCULUX WITTE + SUTOR GMBH: *Bedienungsanleitung KNICKKOPF-HANDLEUCHTE HL 35 EX HIGH POWER*. Murrhardt: 2017
- [55] SCHUPPE, F.: *IMK\_199*. URL [https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik\\_und\\_Verwaltung/MI/IDF/IBK/Dokumente/Forschung/Fo\\_Publikationen/imk\\_ber/IMK\\_199.pdf](https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MI/IDF/IBK/Dokumente/Forschung/Fo_Publikationen/imk_ber/IMK_199.pdf) – Überprüfungsdatum 2021-09-28
- [56] ADARO TECNOLOGIA, S. A.: *Gebrauchsanleitung ADALIT L-30 : EP-DF.-34.3*. Gijon: 2020
- [57] 2013-03-28. *UL 94:2013-03-28: Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances*

## Anhang

### Anhang 1: Aktuell verfügbare Ausrüstungsgegenstände mit LIB für die Feuerwehr [30]

Ausrüstungsgegenstand	Verwendungszweck
<b>Leuchtmittel</b>	
Einsatzleuchte/Handscheinwerfer (explosionsgeschützt)	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Powerflare	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Winkerkelle/Anhaltestab	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Transportable Beleuchtungseinheit	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Helmlampe/Stirnlampe	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
<b>Dokumentation und Kommunikation</b>	
Handsprechfunkgerät (TETRA/2m)	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Notebook	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Tablet-PC	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Drohne/Optocopter etc.	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Fernbedienungen für Drohnen/Optocopter etc.	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Kamera	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Druckmanometer Atemschutzgerät	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Megaphon	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Funkmeldeempfänger	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
<b>Gefahrgutausrüstung</b>	
Fass- und Behälterpumpe	Technische Hilfeleistung
Fernthermometer/Wärmebildkamera	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Explosionsgrenzen-/Gas-Mess- und Warngerät	Technische Hilfeleistung
Messsystem für den Nachweis von Chemikalien	Technische Hilfeleistung
<b>Schneiden und Spreizen</b>	
Rettungssatz (Rettungsschere/Spreizer)	Technische Hilfeleistung
Rettungszylinder	Technische Hilfeleistung
Motorsäge	Technische Hilfeleistung
Kettensäge	Technische Hilfeleistung
Rettungssäge	Technische Hilfeleistung
Trennschleifmaschine	Technische Hilfeleistung
Säbelsäge	Technische Hilfeleistung
Türöffnungsset (Türpresse)	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Glassäge	Technische Hilfeleistung
Hydraulikaggregat	Technische Hilfeleistung
<b>Medizinprodukte</b>	
Automatisierter externer Defibrillator	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Patientenmonitor/Defibrillator	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Absaugpumpe	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Beatmungsgerät	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Perfusor	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
<b>Sonstiges</b>	
Hochleistungslüfter	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Diverses Akkuwerkzeug	Technische Hilfeleistung
Funkfernbedienung (Auto/Motorrad/Boot/Tor etc.)	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Mobiles Prüf- und Testgerät für Atemschutzsysteme	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Bewegungslosmelder	Technische Hilfeleistung, Brandeinsatz
Gasmessgerät für Sauerstoffanteil	Technische Hilfeleistung

# Anhang 2: Online Umfragebogen für die deutschen Feuerwehren [30]

Druckansicht akkubfw2021 (akkubfw2021) 04.02.2021, 17:04

04.02.21, 17:04



akkubfw2021 -- akkubfw2021

04.02.2021, 17:04

Seite 01  
Einleitung

## Verwendung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehr

Sehr geehrte Teilnehmer\*innen,  
im Rahmen der Untersuchungen eines aktuellen Forschungsvorhabens des Instituts für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge (IBK) werden aktuelle Daten der Feuerwehren benötigt. Diese Daten umfassen Erfahrungen und Vorkommnisse in der Verwendung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Ausrüstungsgegenständen für den Feuerwehreinsatz.  
Im Zuge der Bearbeitung meiner Bachelorarbeit zum Thema „Verwendung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehr und sich daraus ergebende Gefährdungen“, als Teil dieses Forschungsvorhabens, möchte ich Sie bitten, den vorliegenden Fragebogen soweit wie möglich auszufüllen. Nicht vollständig beantwortete Fragen helfen ebenfalls bei der Auswertung des Fragebogens.  
Zum Zweck der besseren Lesbarkeit sind alle personenbezogenen Bezeichnungen geschlechtsneutral zu verstehen. Die von Ihnen angegebenen Daten werden selbstverständlich anonymisiert und nicht an Dritte weitergegeben.  
Weitere Hinweise zur Verarbeitung der Daten finden Sie auf der nachfolgenden Seite in den Datenschutzhinweisen gemäß DSGVO.



Druckansicht akkubfw2021 (akkubfw2021) 04.02.2021, 17:04

04.02.21, 17:04

Seite 02  
dsgvo

## Datenschutzhinweise gem. Art. 13 DSGVO zur Datenverarbeitung

Bitte beachten Sie folgende Hinweise:

A) Verantwortlicher und Datenschutzbeauftragter

Verantwortlicher für die Datenverarbeitung im Sinne der EU-Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) ist das IBK Heyrothsberge. Fragen in datenschutzrechtlichen Angelegenheiten können Sie an den Datenschutzbeauftragten / die Datenschutzbeauftragte des IBK Heyrothsberge richten. Die entsprechenden Kontaktdaten für das IBK Heyrothsberge sowie für den /die dortige(n) Datenschutzbeauftragten / Datenschutzbeauftragte lauten:

Postanschrift: Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge, Biederitzer Straße 5, 39175 Biederitz/OT Heyrothsberge E-Mail: [datschutz\\_ibk@sachsen-anhalt.de](mailto:datschutz_ibk@sachsen-anhalt.de)

B) Erhebung und Verarbeitung von personenbezogenen Daten

Bei der Übersendung von Daten per Post, E-Mail oder auf elektronischem Weg werden die folgenden für die Umfrage erforderlichen Daten elektronisch erfasst und gespeichert:  
- Datum der Bearbeitung.

C) Empfänger

Ihre Daten werden ausschließlich vom IBK Heyrothsberge verarbeitet und nicht an Dritte weitergegeben.

D) Dauer der Datenspeicherung

Die Daten werden zwei Monate nach Abschluss des konkreten Projektes gelöscht. Dies gilt nicht, sofern gesetzliche Bestimmungen einer Löschung entgegenstehen, die weitere Speicherung zum Zwecke der Beweisführung erforderlich ist oder Sie einer längeren Speicherung ausdrücklich zugestimmt haben.

E) Recht auf Auskunft, Widerruf und Löschung

Sie haben das Recht, jederzeit Auskunft zu verlangen über die zu Ihnen beim IBK Heyrothsberge gespeicherten Daten sowie deren Herkunft, Empfänger oder Kategorien von Empfängern, an die diese weitergegeben werden, und den Zweck der Speicherung. Sie können der Nutzung Ihrer Daten für die vorgenannten Zwecke jederzeit mit Wirkung für die Zukunft widersprechen sowie die Löschung Ihrer Daten verlangen.

Sind Sie mit den hier genannten Bedingungen einverstanden?

- Ja  
 Nein

**Seite 03**

Teilnehmerinfo

**1. Welcher Organisation gehören Sie an?**

- Berufsfeuerwehr
- Werkfeuerwehr

**2. Welchem Bundesland gehört Ihre Feuerwehr an?**

[Bitte auswählen]

**3. Sind Sie ein Gerätewart Ihrer Feuerwehr oder sind Sie für die Wartung und Pflege von akkubetriebenen Geräten verantwortlich?**

- Ja
- Nein

**Seite 04**

Ausrüstungsgegenstände

**4. Werden in Ihrer Einrichtung akkubetriebene Ausrüstungsgegenstände verwendet?**

- Ja
- Nein

**Seite 05**

Ausrüstungsgegenstände 2

**5. Welche akkubetriebenen (Lithium-Ionen-Technologie) Ausrüstungsgegenstände werden in Ihrer Einrichtung verwendet? (Achtung: Teilweise sind die Geräte sowohl batterie-, als auch akkubetrieben erhältlich.)**

- Rettungsgeräte (Schere/Spreizer/Rettungszyliner/Türpresse etc.)
- Rettungssäge
- Kettensäge
- Säbelsäge
- Glassäge
- Funkgeräte
- Funkmeldeempfänger
- Handlampen/Handscheinwerfer
- Helmlampen (auch Stirnlampen für Höhenrettung etc.)
- Powerflares
- Winkerkeller/Anhaltestab
- Sonstige Leuchtmittel (mobile Beleuchtungseinheit etc.)
- Gas-Warngeräte (CO-Warner etc.)
- Gasmessgeräte Sauerstoffanteil (Tauchequipment etc.)
- Mobile Prüf- und Testgeräte für Atemschutzsysteme
- ABC-Messtechnik
- Fass- und Behälterpumpen
- Hochleistungslüfter
- Wärmebildkamera
- Bewegungsmelder
- Restdruckanzeigen am Atemschutzgerät
- Mobiles Werkzeug (Akkuschrauber, Fräse etc.)
- Automatisierter externer Defibrillator
- Tablets (Atemschutzüberwachung etc.)
- Notebooks
- Kameras (Actionkameras, Firecam etc.)
- Drohnen/Optocopter etc.
- Fernbedienungen für Drohnen etc.
- Zündschlüssel für Auto/Boot/Motorrad (Funkfernbedienung etc.)
- Sonstiges:

**6. Warum wird auf akkubetriebene Ausrüstungsgegenstände zurückgegriffen?**

- Stand der Technik
- Empfehlung anderer Feuerwehren
- Förderung akkubetriebener Geräte
- Bessere Mobilität im Einsatzgeschehen
- Sonstiges:

**7. Welche Erfahrungen wurden bereits mit akkubetriebenen Geräten gemacht?**

- Hoher einsatztaktischer Wert
- Gute Akkulaufzeit
- Zu geringe Akkulaufzeit
- Keine Unterschiede zu konventionell betriebenen Geräten
- Defekte Geräte (Selbsterhitzungserscheinungen, durchgehender Akku etc.)
- Sonstiges:

**8. Wie sind die Akkumulatoren überwiegend verbaut?**

- Fest verbaut
- Auswechselbar

**9. Bestehen zu den vorhandenen, akkubetriebenen Ausrüstungsgegenständen Gefährdungsbeurteilungen mit daraus folgenden Handlungsanweisungen?**

- Ja
- Nein
- Weiß ich nicht

**10. Werden in allen akkubetriebenen Ausrüstungsgegenständen originale bzw. vom Hersteller empfohlene Akkumulatoren verwendet?**

- Ja
- Nein
- Weiß ich nicht

**Seite 07**

Verwendete Akkumulatoren 2

**11. Welche Alternativen werden verwendet?**

- Akkus von Drittanbieterherstellern
- Vorhandene Akkus aus aussortierten Geräten
- Sonstiges:

**12. Warum wird auf solche Alternativen zurückgegriffen?**

- Günstiger
- Bereits vorhanden auf der Wache
- Empfehlung anderer Feuerwehren
- Andere Gründe:

**13. Gibt es Handlungsanweisung offizieller Stellen (DGUV, Behörden, Versicherer, Hersteller etc.) zur Verwendung von nicht-originalen Akkumulatoren?**

- DGUV
- Feuerwehrunfallkassen
- Wehrführung
- Amtsleitung
- Hersteller
- Keine
- Weiß ich nicht
- Sonstige:

**Seite 08**

Ausblick Beschaffung

**14. Sollen in naher Zukunft akkubetriebene Ausrüstungsgegenstände beschafft werden?**

- Ja
- Nein
- Weiß ich nicht

**15. Werden Fahrzeuge mit Elektroantrieb verwendet oder bei Neubeschaffungen in Betracht gezogen?**

- Ja
- Nein

**Seite 09**

Ausblick Beschaffung 2

16. Welche Ausrüstungsgegenstände sollen akkubetrieben (Lithium-Ionen-Technologie) beschafft werden?  
(Achtung: Teilweise sind die Geräte sowohl batterie-, als auch akkubetrieben erhältlich.)

- Rettungsgeräte (Schere/Spreizer/Rettungszyliner/Türpresse etc.)
- Rettungssäge
- Kettensäge
- Säbelsäge
- Glassäge
- Funkgeräte
- Funkmeldeempfänger
- Handlampen/Handscheinwerfer
- Heimplampen (auch Stimlampen für Höhenrettung etc.)
- Powerflares
- Winkler/Anhaltestab
- Sonstige Leuchtmittel (mobile Beleuchtungseinheit etc.)
- Gas-Wärmeräte (CO-Warner etc.)
- Gasmessgeräte Sauerstoffanteil (Tauchequipment etc.)
- Mobile Prüf- und Testgeräte für Atemschutzsysteme
- ABC-Messtechnik
- Fass- und Behälterpumpen
- Hochleistungslüfter
- Wärmebildkamera
- Bewegungsmelder
- Restdruckanzeigen am Atemschutzgerät
- Akkubetriebenes Werkzeug (Akkuschrauber, Fräse etc.)
- Automatisierter externer Defibrillator
- Tablets (Atemschutzüberwachung)
- Notebooks
- Kameras (Actionkameras, Firecam etc.)
- Drohnen/Optocopter etc.
- Fernbedienungen für Drohnen etc.
- Zündschlüssel für Auto/Boot/Motorrad (Funkfernbedienung etc.)
- Sonstiges:

**Seite 10**

Privatbesitz

17. Haben Sie im Einsatzfall bereits private akkubetriebene Gegenstände mitgenommen?

- Ja
- Nein

**Seite 11**

Privatbesitz 2

18. Welche privaten akkubetriebenen Gegenstände haben Sie schon einmal im Einsatzfall mitgenommen?

- Mobiltelefon/Smartphone
- Smartwatch/Fitnessarmband etc.
- Kopfhörer
- Funkmeldeempfänger
- Powerbank
- E-Zigarette
- Zündschlüssel Auto/Boot/Motorrad (Funkfernbedienung etc.)
- Schlüsselanhänger („Find it“-Funktion etc.)
- Sonstiges:

**Seite 12**

Auffadung und Wertung

19. Wie werden die Geräte nach dem Einsatz behandelt?

- Die Geräte werden ohne Reinigung zurück in die Ladeschale gesteckt
- Die Geräte werden bis zur Reinigung auf der Wache getrennt transportiert
- Die Geräte werden an der Einsatzstelle von groben Schmutz befreit und wieder auf dem Fahrzeug verlastet
- Die Geräte werden auf Beschädigungen überprüft
- Sonstiges:

20. Wer ist für die Wartung und Überprüfung der Geräte verantwortlich?

- Feuerwehrtechnisches Zentrum (FTZ)
- Mannschaft
- Gerätewarte
- Wehrführung
- Nutzer selbst
- Weiß ich nicht
- Sonstige Personen:

21. Wie erfolgt das Aufladen der Geräte?

- Kontinuierlich (bspw. in einer Ladeschale oder über ein Kabel im Fahrzeug)
- Bis die Geräte vollständig aufgeladen sind
- Zu bestimmten Zeiten (bspw. an Dienstabenden/zu Dienstbeginn)
- Gemäß den Angaben des Herstellers
- Bei Bedarf
- Weiß ich nicht
- Sonstiges:

22. Sind die Gerätewarte bzw. die Mannschaft im Umgang mit Lithium-Ionen-Akkumulatoren geschult/unterwiesen?

- Gerätewarte
- Mannschaft
- Mannschaft und Gerätewarte
- Ausgewählte Gerätewarte
- Ausgewählte Kamerad\*innen
- Weder Gerätewarte noch die Mannschaft
- Weiß ich nicht

Seite 13  
Privaterworbene Ausrüstung

23. Nutzen Sie ausschließlich das zur Verfügung gestellte Material oder verwenden sie ebenfalls selbsterworbene Ausrüstungsgegenstände?

- Ausschließlich zur Verfügung gestelltes Material
- Auch selbsterworbene Ausrüstungsgegenstände

Seite 14  
Privaterworbene Ausrüstung 2

24. Welche selbsterworbenen Ausrüstungsgegenstände mit Lithium-Ionen-Technologie verwenden Sie?

- Handlampen
- Helmlampen (auch Stirnlampen für Höhenrettung etc.)
- Powerflares
- Sonstige Leuchtmittel (mobile Beleuchtungseinheit etc.)
- Gas-Warngeräte
- Bewegungsmelder
- Akkubetriebenes Werkzeug (Akkuschrauber, Fräse etc.)
- Drohnen/Optocopter etc.
- Kameras (Actionkameras, Firecam etc.)
- Wärmebildkamera
- Sonstiges:

Seite 15  
Ereignisse

25. Sind bereits Vorkommnisse mit akkubetriebenen Ausrüstungsgegenständen aufgetreten, welche den Einsatz behindert oder Personen gefährdet haben? (Hierunter fallen auch technische Defekte an akkubetriebenen Ausrüstungsgegenständen, welche bspw. einen Brand innerhalb eines Fahrzeuges bzw. innerhalb des Feuerwehrgerätehauses ausgelöst haben.)

- Ja
- Nein

26. Bitte beschreiben Sie das Ereignis kurz.

27. Sind bei dem Ereignis Personen zu Schaden gekommen?

- Ja  
 Nein

28. Wie hoch war der entstandene Sachschaden bei dem Ereignis?

- < 1.000€  
 < 10.000€  
 < 100.000€  
 < 500.000€  
 < 1.000.000€  
 > 1.000.000€

29. Was ist durch das Ereignis zu Schaden gekommen?

30. Wie hoch schätzen Sie das Risiko bei der Verwendung von mit Akkumulatoren betriebenen Ausrüstungsgegenständen ein?

- Gering  
 Normal (Keine Veränderung zur Verwendung konventionell betriebener Geräte)  
 Hoch  
 Sehr hoch (Verwendung nur, wenn zwingend erforderlich)

## Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Wir möchten uns ganz herzlich für Ihre Mithilfe bedanken.

Sollten Sie Interesse an den Ergebnissen des Forschungsprojekts haben, so werden Sie diese nach Beendigung auf der Homepage [ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de](http://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de) einsehen können. Bei Fragen stehen wir Ihnen, unter den unten angegebenen Kontaktdaten, selbstverständlich gerne zur Verfügung.

### Kontakt:

Karola Keutel  
Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge  
[karola.keutel@ibk.sachsen-anhalt.de](mailto:karola.keutel@ibk.sachsen-anhalt.de)  
Biederitzer Straße 5  
39175 Biederitz  
Telefon (039292) 61 - 631

Matthias Czech  
Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge  
[matthias.czech@st.ovgu.de](mailto:matthias.czech@st.ovgu.de)  
Biederitzer Straße 5  
39157 Biederitz

Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

[Matthias Czech](#), Bachelorstudent - Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg / Hochschule Magdeburg-Stendal  
[Karola Keutel](#), Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge, Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr

### **Anhang 3: Offene Nennung der Teilnehmenden zu den Erfahrungen mit LIB betriebenen Ausrüstungsgegenständen [30]**

In der Datenerhebung konnten über offene Nennungen Angaben zu bereits gemachten Erfahrungen mit Li-Ionen-Akkus in Ausrüstungsgegenständen getätigt werden. Nachfolgend werden diese Angaben dargestellt (Angaben der Teilnehmenden weitestgehend übernommen):

- Alte Geräte haben schwache Akkus. Akkus werden mit der Zeit schlechter.
- zu schnell defekte Akkus durch kontinuierliches Laden;
- bewusster Verzicht auf akkubetriebene Geräte für kritische Ausrüstung (bspw. Hilfeleistungssatz);
- wartungsarm, umweltschonend;
- abhängig vom Gerät;
- Manche Geräte sind schwerer als herkömmliche.
- bessere Mobilität im Einsatzgeschehen;
- hohe Kosten bei der Beschaffung von Ersatzakkumulatoren;
- Batteriegesundheit ist schwer festzustellen.
- teilweise geringere Leistung im Vergleich zu kabelgebundenen Geräten;
- Akkutechnik seit Li-Ion-Technologie brauchbar; NiMH oder NiCd sind schlicht schlecht.
- Es muss stets darauf geachtet werden, dass Akkus der Geräte geladen sind, sonst können sie im Einsatzfall leer sein oder müssen vorher getauscht werden.
- Notwendigkeit des Einbaus eines Spannungskonverters im Fahrzeug;
- Akkudefekte sind meist nicht vorhersehbar.
- schwierige Akkupflege, nur wenige Ladeschalen mit Pflegeprogrammen;
- Geräte sind leiser (patientenorientierte Rettung).
- Evtl. Probleme mit der Ladestation;
- begrenzte Lebensdauer der Akkus;
- sehr wartungsintensiv;
- flexibler und leichter;
- Probleme mit der Ladeinfrastruktur;
- kurze Akkulebensdauer durch hohe Stand- und Ladezeiten; ökologisch-ökonomisches Missverhältnis bei geringer Nutzungshäufigkeit;
- Ersatzakkumulatoren sind teurer und müssen häufiger beschafft werden, obwohl sie selten in Gebrauch sind.

- hoher logistischer Aufwand bezüglich der Akkupflege und des Austausches; Geräte mit erhöhtem Akkuwechsellaufwand haben sich nicht bewährt.
- je nach Akku mal sehr guter Nutzungsgrad, mal sehr schlechter; abhängig von Geräteart und Akkutypen sowie Ladetechnik;
- praktisch im Einsatz, aber ständige Wartung und Überwachung notwendig.

## Anhang 4: Einzeldiagramme für den mehrfachen Einsatz der Helmlampe

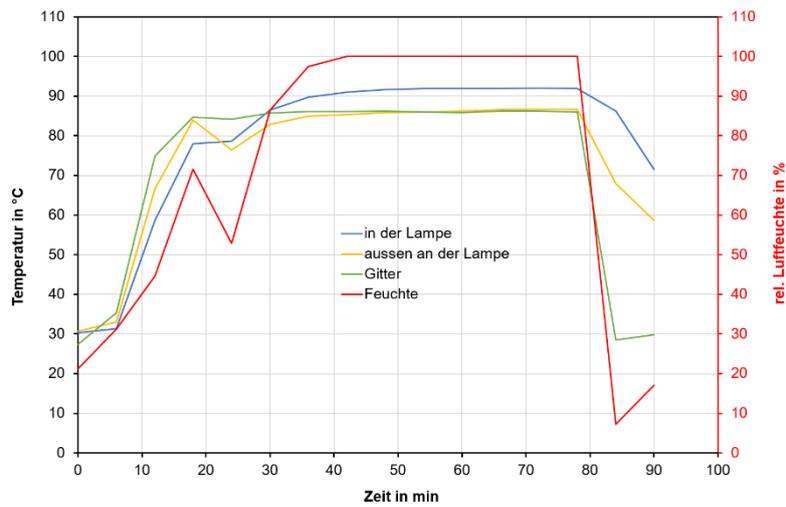


Abbildung 36: Helmlampe (1) bei  $T: 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $rF: 100\%$ , Versuch 1 von 3

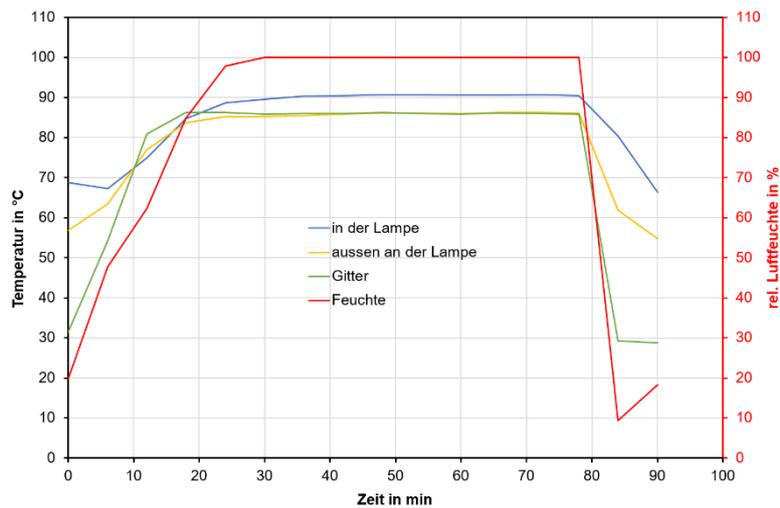


Abbildung 37: Helmlampe (1) bei  $T: 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $rF: 100\%$ , Versuch 2 von 3

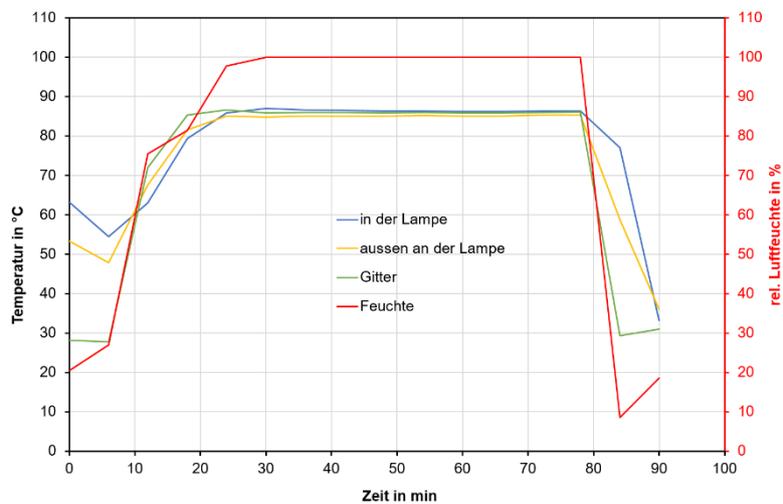


Abbildung 38: Helmlampe (1) bei  $T: 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $rF: 100\%$ , Versuch 3 von 3

## Anhang 5: Einzeldiagramme für den mehrfachen Einsatz der Knickkopflampe

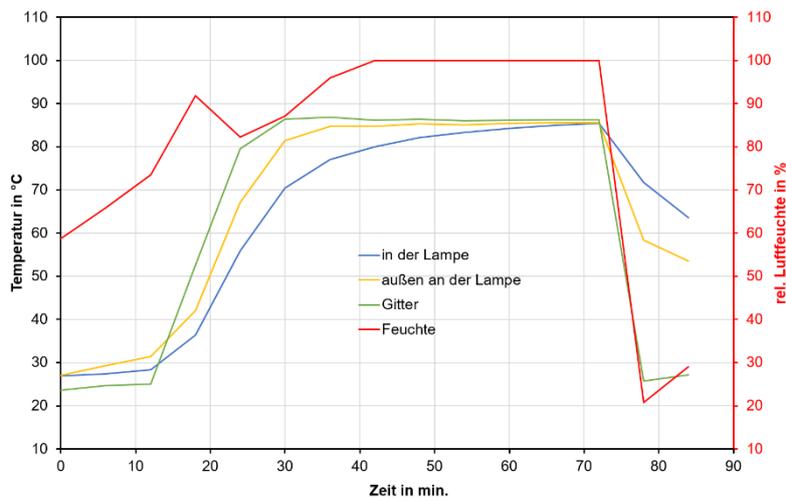


Abbildung 39: Knickkopflampe (1) bei  $T: 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $rF: 100\text{ }%$ , Versuch 1 von 3

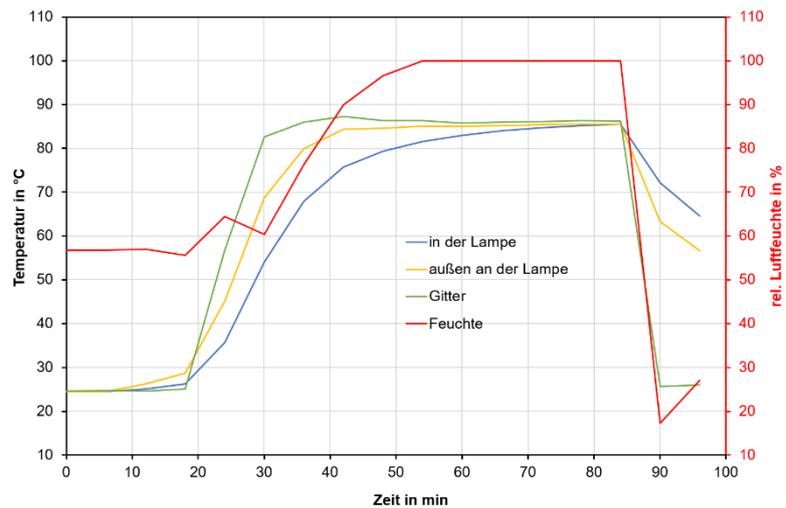


Abbildung 40: Knickkopflampe (1) bei  $T: 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $rF: 100\text{ }%$ , Versuch 2 von 3

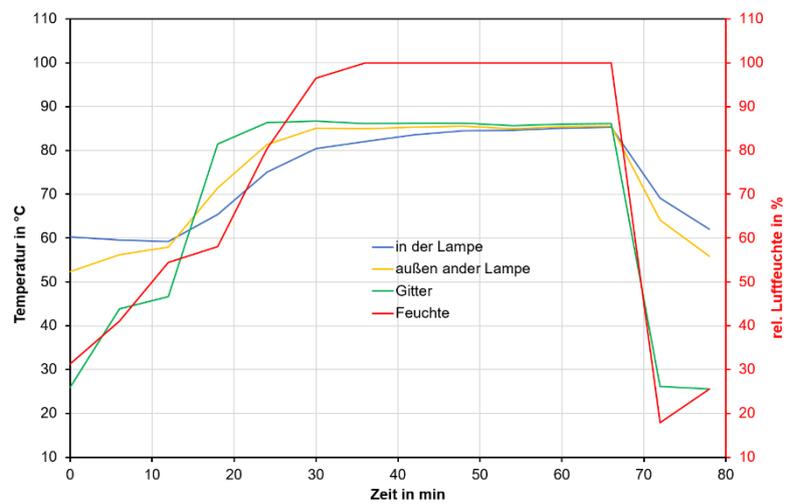


Abbildung 41: Knickkopflampe (1) bei  $T: 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $rF: 100\text{ }%$ , Versuch 3 von 3

## Anhang 6: Ergebnisse der Gasmessung bei der Wärmebestrahlung

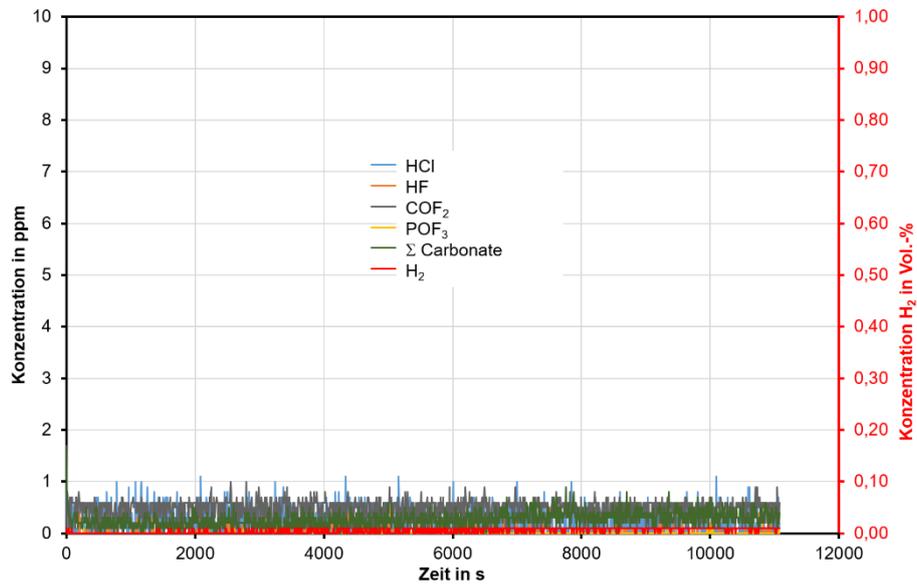


Abbildung 42: Verhalten der Knickkopflampe unter Wärmestrahlungsbeaufschlagung-chemische Messwerte

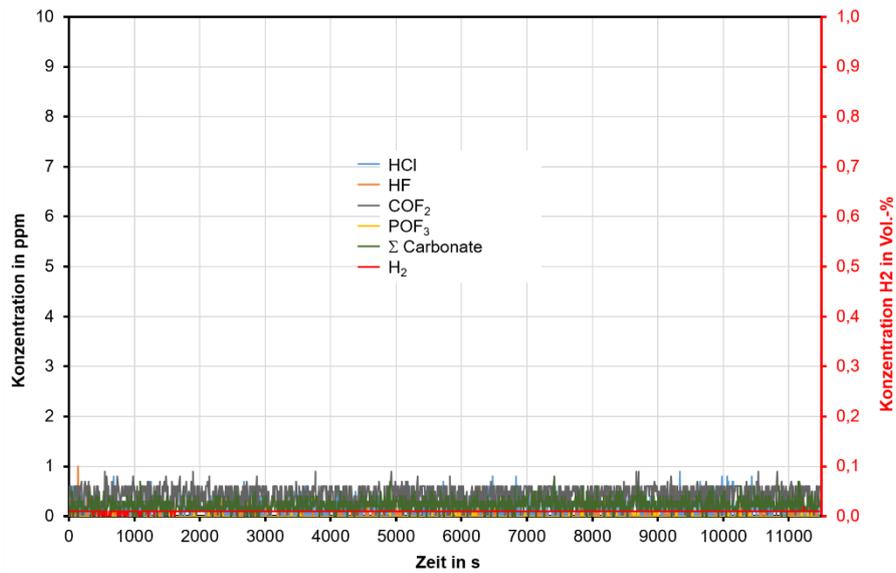


Abbildung 43: Verhalten der Helmlampe unter Wärmestrahlungsbeaufschlagung-chemische Messwerte

## Anhang 7: Details der Ladkontakte an der Knickkopflampe und in der zugehörigen Ladeschale



Ladkontakte an der Knickkopflampe



Ladkontakte an der Ladeschale



Höhenprofil an den Ladkontakten der Knickkopflampe



Knickkopflampe in Ladeschale

Abbildung 44: Detailansichten zu den Ladkontakten an der Knickkopflampe und der zugehörigen Ladeschale