

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

**Lithium-Ionen-Akku-Brände in elektronischen Kleinstfahrzeugen
Entwicklung von Einsatztaktiken für Feuerwehren**

—

Bachelorthesis

im Studiengang Hazard Control/ Gefahrenabwehr

Bachelor of Engineering

vorgelegt von

Felix Suarez Bergmann



Hamburg

am 26.06.2025

Erstgutachter: Prof. Dr. Carsten Frank

Zweitgutachter: Markus Wiedemann

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit widmet sich den zunehmenden neuen einsatztaktischen Herausforderungen für die Feuerwehr, die sich aus der Verbreitung elektronischer Kleinstfahrzeuge (eKF) ergeben. Der Fokus liegt dabei auf den Risiken von Bränden durch Lithium-Ionen-Batterien (LIB), die durch ihre hohe Energiedichte, schnelle Brandausbreitung und die Freisetzung toxischer Gase eine besondere Gefährdung darstellen. Ziel der Arbeit ist, die spezifischen Brandrisiken in eKF zu analysieren und darauf aufbauend praxisorientierte Handlungsempfehlungen für Feuerwehren zu entwickeln.

Die Methodik basiert auf einer Kombination aus Literaturrecherche, der Analyse einsatztaktischer Unterlagen deutscher Feuerwehrschulen sowie der Auswertung realer Einsatzberichte. Die Ergebnisse zeigen Defizite in der Ausbildung, uneinheitliche Vorgehensweisen im Einsatz sowie unterschiedliche Wirksamkeit bekannter Löschmethoden. Wasserbasierte Kühlung erwies sich als besonders effektiv, während andere Löschmittel teils erhebliche Einschränkungen aufwiesen.

Als zentrale Handlungsempfehlung wurde ein praxisorientiertes Feuerwehr-Dokument (PFD) entworfen, das Einsatzkräften eine strukturierte Entscheidungs- und Handlungsgrundlage bietet. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf regulatorische Maßnahmen und weiteren Forschungsbedarf zur Risikominimierung im Umgang mit LIB-Bränden in eKF.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
Glossar.....	VI
1. Einleitung	1
2. Methoden und Grundlagen	4
2.1. Theoretische Grundlagen	4
2.2. Methodik	29
3. Darstellung der Ergebnisse mit Diskussion	32
3.1 Analyse der Feuerwehrscheul-Praxis.....	32
3.2 Bewertung von Löschmethoden aus der Wissenschaft.....	34
3.3 Analyse realer Einsätze bei LIB-Bränden.....	36
4. Diskussion & PFD-Entwicklung.....	39
4.1 Entwicklung des Praxisorientierten Feuerwehr-Dokuments (PFD)	39
5. Fazit und Ausblick	41
5.1 Zentrale Erkenntnisse.....	41
5.2 Kritische Reflexion und Grenzen der Arbeit	41
5.3 Ausblick: Forschungsbedarf und mögliche Weiterentwicklungen.....	42
Quellenverzeichnis.....	VII
Eidesstattliche Erklärung.....	XI
Anhang: Taschenkarte	XII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle	6
Abbildung 2: Ent- und Ladezyklus einer Zelle	7
Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Batteriesystems	8
Abbildung 4: Branddreieck, bezogen auf eine LIB	12
Abbildung 5: Brand in einer Zelle und in einem Batteriepack	12
Abbildung 6: Einfluss von Temperatur auf eine LIB	13
Abbildung 7: Einfluss von unterschiedlichen Ursachen auf die Gefährdungen und deren Reaktionen	15
Abbildung 8: Zündinitialkurve	16
Abbildung 9: e-Bikes Bestand in Deutschland	23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lehrmethoden zu LIB-Bränden an Feuerweherschulen.....	33
Tabelle 2: Aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zu Löschmethoden bei LIB-Bränden.....	35
Tabelle 3: Zusammenfassung ausgewählter realer Einsätze mit LIB-Bränden	37
Tabelle 4: Schlüsselerkenntnisse der Auswertungstabellen	39

Abkürzungsverzeichnis

BMS	Batteriemanagementsystem
CO.....	Kohlenmonoxid
eKF.....	elektronische Kleinstfahrzeuge
eKFV	Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung
EPAC	Electrically Power Assisted Cycles
HF	Flusssäure
LIB.....	Lithium-Ionen-Batterien
NOx.....	Stickoxide
SO ₂	Schwefeldioxid
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TR	Thermal Runawa

Glossar

Elektrokleinstfahrzeug (eKF): Der Begriff Elektrokleinstfahrzeuge (eKF) umfasst in der Regel Fahrzeuge wie Pedelecs, E-Bikes und E-Tretroller (Varró, 2024).

E-Bike / Pedelec / Elektrofahrrad: Die Bezeichnungen Pedelec, E-Bike und Elektrofahrrad werden üblicherweise synonym verwendet und beziehen sich auf Fahrräder mit elektrischer Tretunterstützung bis maximal 25 km/h, bei denen der Antrieb nur bei aktivem Pedalieren wirksam wird (Varró, 2024; ZIV, 2023). Darüber hinaus existieren auch schnellere Varianten von Elektrofahrrädern, sogenannte S-Pedelecs, die aufgrund ihrer höheren Geschwindigkeit eine Typzulassung benötigen und gesondert zu betrachten sind (ZIV, 2025).

E-Tretroller / E-Scooter: E-Tretroller sind in der Regel kompakte, zweirädrige Fahrzeuge mit Elektroantrieb, die ohne körperliche Anstrengung betrieben werden können und sich durch ihr geringes Gewicht sowie ihre gute Transportfähigkeit auszeichnen (Varró, 2024). Konzipiert sind E-Tretroller überwiegend für den Transport einer einzelnen stehenden Person und verfügen über eine kompakte Steuereinheit zur Regulierung der Geschwindigkeit (Varró, 2024). Ähnlich wie bei E-Bikes erfolgt die Energieversorgung des Antriebs bei E-Tretrollern in der Regel über eine Lithium-Ionen-Batterie (Varró, 2024).

Thermal Runaway: Unter bestimmten Bedingungen wie starker Überladung, Tiefentladung oder anderen Fehlbelastungen kann sich eine Batterie beim Laden oder Entladen so stark erhitzen, dass sie sich durch die entstehende Eigenwärme selbst zerstört (Linden, Beard and Reddy, 2019).

1. Einleitung

Die fortschreitende Entwicklung und breite Verfügbarkeit von Elektromobilität verändert die Art und Weise, wie sich Menschen in urbanen und ländlichen Räumen fortbewegen nachhaltig. Insbesondere elektrisch betriebene Kleinstfahrzeuge (eKF) wie Pedelecs und E-Tretroller haben sich innerhalb weniger Jahre zu einem festen Bestandteil des Verkehrssystems entwickelt. Neben ihrer Funktion als umweltfreundliche Alternative zum motorisierten Individualverkehr eröffnen sie neue Mobilitätsoptionen für Personengruppen, die im traditionellen Verkehrssystem häufig benachteiligt sind (Lee and Sener, 2023).

Bedeutung von eKF für die Mobilität

Jugendlichen ohne Führerschein wird mit E-Tretrollern eine erweiterte Reichweite ermöglicht, was ihre selbstständige Mobilität im Alltag fördert (ADAC Stiftung, 2025; TÜV-Verband, 2025). Ältere Menschen profitieren von der elektrischen Unterstützung von Pedelecs, da sie auch längere Strecken mit geringerer körperlicher Anstrengung zurücklegen können, was ihre Selbstständigkeit und Lebensqualität im Alter verbessert (Gaster and Gehiert, 2022). Des Weiteren wird diskutiert, dass eKF insbesondere für FLINTA* in Situationen von Vorteil sein können, in denen ein erhöhtes Sicherheitsgefühl gewünscht ist, wie beispielsweise in den Abendstunden oder in städtischen Räumen mit geringerer sozialer Kontrolle, da sie Strecken schneller und flexibler zurücklegen können. Studien deuten auf einen engen Zusammenhang zwischen der Verkehrsmittelwahl und dem subjektiven Sicherheitsempfinden hin (Hahne, Hempel and Pelzer, 2020; Diehl, 2022). Katja Diehl (2022) betont in diesem Zusammenhang, dass sichere und zugängliche Verkehrsmittel entscheidend dafür sind, dass sich alle Menschen, insbesondere Frauen, frei im öffentlichen Raum bewegen können. Darüber hinaus wird Elektrokleinstfahrzeugen eine entlastende Wirkung auf den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) in städtischen Räumen zugeschrieben, insbesondere auf Kurzstrecken. Sie stellen eine flexible und individuelle Ergänzung für sogenannte "letzte Meile"-Wege dar und fördern inter- sowie multimodale Verkehrsketten.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betont die signifikante Rolle des eKF in der Entzerrung von angespannten Raumsituationen und betont damit die potenzielle Stärkung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) (DLR, 2019).

Sicherheitstechnische Herausforderungen durch eKF

Parallel zu dieser Entwicklung treten jedoch neue sicherheitstechnische Fragestellungen in den Vordergrund. Die in eKF eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien (LIB) gelten als zentrale Komponente für emissionsfreie Antriebe, bergen aber besondere Risiken bei unsachgemäßer Handhabung, technischen Defekten oder äußeren Einflüssen. LIB-Brände sind gekennzeichnet durch hohe Energiedichten, extreme Temperaturen, schnelle Brandausbreitung sowie die Freisetzung toxischer und korrosiver Gase. In engen oder geschlossenen Räumen, wie Fluren, Wohnungen oder Kellern, können diese Eigenschaften zu gefährlichen Einsatzsituationen für die Feuerwehr führen. Die Besonderheiten solcher Brandverläufe erfordern daher eine Überprüfung und Weiterentwicklung bestehender einsatztaktischer Konzepte (Leiter der Berufsfeuerwehren und des Deutschen Feuerwehrverbandes, 2018; Varró, 2024).

Zielsetzung und Forschungsfrage

Die vorliegende Arbeit widmet sich daher der Analyse dieser Brandgefahren und der Entwicklung von Einsatztaktiken für die Feuerwehren. Ziel der Untersuchung ist es, die spezifischen Brandrisiken von LIB in eKF (Pedelecs / E-Bikes / E-Tretroller / etc.) zu analysieren, die Auswirkungen dieser Risiken auf die aktuellen Einsatztaktiken der Feuerwehren zu bewerten und Empfehlungen für regulatorische Maßnahmen zur Risikominderung zu entwickeln.

Die Forschungsfrage lautet:

„Wie wirken sich die spezifischen Brandrisiken von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in elektronischen Kleinstfahrzeugen (eKF) auf die einsatztaktischen Strategien der Feuerwehren aus und welche einsatztaktischen Maßnahmen können zur Risikominderung beitragen?“

Ziel ist es, einen Beitrag zur Sicherheit im Umgang mit eKF zu leisten und die Einsatzkräfte bestmöglich auf die Bekämpfung von LIB-Bränden in diesem Bereich vorzubereiten. Dabei werden sowohl die technischen Aspekte der Brandentstehung und -ausbreitung als auch die taktischen Herausforderungen für die Feuerwehr beleuchtet.

Aufbau der Arbeit

Kapitel 2. Methoden und Grundlagen gibt eine umfassende Darstellung der theoretischen und technischen Grundlagen. Dieses Kapitel vermittelt das notwendige Verständnis über den Aufbau, die Funktionsweise und das Gefährdungspotenzial von LIB in eKF sowie über bestehende sicherheitstechnische Vorschriften und aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zur Brandbekämpfung.

Kapitel 3.

Darstellung der Ergebnisse mit Diskussion stellt das methodische Vorgehen der Untersuchung dar und präsentiert die Ergebnisse aus der Analyse von Ausbildungsunterlagen deutscher Feuerweherschulen, der Auswertung wissenschaftlicher Fachliteratur zu Löschmethoden und der Sichtung dokumentierter Einsatzberichte. Die gewonnenen Erkenntnisse werden systematisch diskutiert und wiederkehrende taktische Herausforderungen werden identifiziert und bewertet.

In Kapitel 4. Diskussion & PFD-Entwicklung werden auf Basis der vorangegangenen Ergebnisse praxisorientierte Handlungsempfehlungen für die Feuerwehren formuliert. Dazu gehört insbesondere der Entwurf eines einsatztaktischen Handlungspapiers (Anhang: Taschenkarte) zur Unterstützung bei Bränden von LIB in eKF.

Kapitel 5. Fazit und Ausblick fasst die zentralen Ergebnisse der Arbeit zusammen, reflektiert kritisch die Grenzen der Untersuchung und gibt einen Ausblick auf weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Um die spezifischen Risiken von LIB in eKF sowie die daraus resultierenden Herausforderungen für den Feuerwehreinsatz adäquat bewerten zu können, ist zunächst ein umfassendes Verständnis der technischen Grundlagen, der sicherheitsrelevanten Eigenschaften und der regulatorischen Rahmenbedingungen erforderlich. Das folgende Kapitel vermittelt daher die notwendigen fachlichen Grundlagen für die anschließende Analyse und Diskussion.

2. Methoden und Grundlagen

2.1. Theoretische Grundlagen

In elektrisch unterstützten Fahrzeugen wie Pedelecs, E-Bikes, E-Scootern, Light Electric Vehikels oder E-Surfboards kommen in der Regel Lithium-Ionen-Batterien mittlerer Leistungsklasse zum Einsatz. Diese wiederaufladbaren Energiespeicher, auch als Akkumulatoren (Akku) oder Sekundärbatterien bezeichnet, weisen typischerweise einen Energieinhalt von etwa 300 bis 600 Wh auf und haben ein Gewicht von rund 2 bis 3 kg. In Pedelecs und E-Bikes werden die Batterien mit einer Gleichspannung von 36 Volt betrieben. Das Gesamtgewicht dieser Fahrzeugtypen liegt im Mittel zwischen 20 und 30 kg (Kunkelmann, 2021).

Gegenwärtig existiert eine Vielzahl von Batterietypen für die unterschiedlichsten Anwendungen, die sich in verschiedene Bauelemente wie Kathode, Anode und Elektrolyt sowie in Bezug auf Form, Größe und Leistung unterscheiden (Hertel and Gernitz, 2025). Aufgrund der hohen Geschwindigkeit der technischen Weiterentwicklung ist es schwierig, die Beschreibung und Katalogisierung der einzelnen Komponenten auf dem aktuellen Stand zu halten. Ursprünglich bezeichnete der Begriff „Batterie“ die Zusammenschaltung mehrerer einzelner Zellen. Inzwischen hat sich der Begriff jedoch gewandelt, so dass er auch eine einzelne Zelle (einzellige Batterie) bezeichnen kann (Buser, 2016).

Primär- und Sekundär-Batterien

Batterien werden als elektrochemische Energiespeicher klassifiziert und in Primärbatterien und Sekundärbatterien unterteilt. Primärbatterien sind elektrochemische Stromquellen, in denen chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt wird. Dieser Vorgang ist irreversibel. Eine Wiederaufladung ist daher bei Primärbatterien nicht möglich (Dormann, 2021).

Da in eKF ausschließlich Sekundärbatterien zum Einsatz kommen, beschränkt sich diese Arbeit auf diesen Batterietyp. Sekundärbatterien stellen eine Kategorie von wiederaufladbaren elektrochemischen Energiespeichern dar. Ihr charakteristisches Merkmal ist die Reversibilität der ablaufenden chemischen Reaktion, die eine mehrfache Nutzung ermöglicht. Beim Ladevorgang wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt, beim Entladevorgang erfolgt die umgekehrte Reaktion. Ein zusammenhängender vollständiger Lade- und Entladevorgang wird als Zyklus bezeichnet. Die Lebensdauer einer Batterie hängt im Wesentlichen daher von der Anzahl der Zyklen ab. Bei wiederaufladbaren Batterien variiert die Lebensdauer je nach Typ, Anwendung und Handhabung (Dormann, 2021).

Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien

Um zu verstehen, wie man einen durch eine LIB verursachten Brand löschen kann, ist es unerlässlich, zunächst den Aufbau und die Reaktion einer solchen Zelle zu verstehen. Lithium ist das leichteste Metall im chemischen Periodensystem (Atommasse 6,941 g/mol; Dichte 0,53 g/cm³) und besitzt das niedrigste elektrochemische Potential aller Metalle (-3,04 V). Die daraus resultierende hohe Kapazität pro Gewicht und die in Kombination mit verschiedenen Kathodenmaterialien erreichbaren hohen Zellspannungen machen Lithium zum idealen Elektrodenmaterial für chemische Energiespeicher. Aus diesem Grund finden Lithiumbatterien zunehmend Anwendung in allen Bereichen des täglichen Lebens (Buser, 2016).

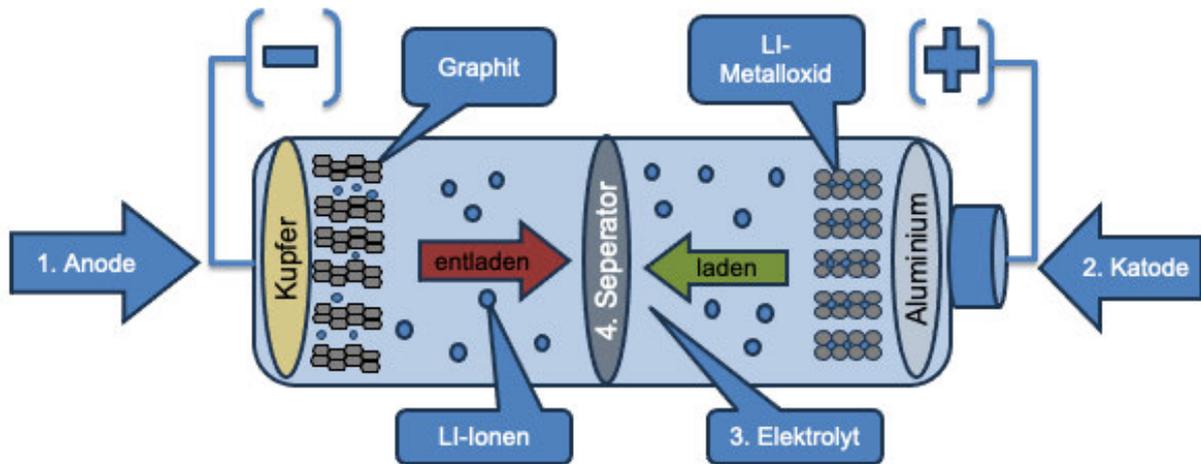


Abbildung 1: Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle. Eigene Darstellung in Anlehnung an (DGUV, 2024).

Der Aufbau einer LIB ist in Abbildung 1 dargestellt. Jede LIB besteht aus fünf Hauptkomponenten:

1. Die **Anode** (auch Minuspol genannt) besteht in der Regel aus Graphit, das manchmal auch Siliziumanteile enthalten kann. Ihre Aufgabe ist es, Lithium-Ionen während des Ladevorgangs zu speichern. Beim Entladen werden Elektronen abgegeben.
2. Die **Kathode** (auch Pluspol) besteht aus einem Lithium-Metalloxid. Beim Entladen der Batterie werden Lithium-Ionen freigesetzt.
3. Der **Elektrolyt**, eine flüssige oder gelartige Lösung von Lithiumsalzen in organischen Lösungsmitteln, dient als Transportmedium für die Lithium-Ionen zwischen Anode und Kathode. Es muss elektrisch isolierend sein, aber eine gute Leitfähigkeit für Lithiumionen aufweisen.
4. Der **Separator** verhindert einen Kurzschluss zwischen Anode und Kathode und ermöglicht gleichzeitig die Diffusion der Lithium-Ionen.

5. Das **Gehäuse** und der **Stromableiter** schützen die Zellchemie vor möglichen äußeren Einflüssen. Die Zusammensetzung des Gehäuses variiert je nach Zelltyp und umfasst Aluminium, Stahl oder Kunststoff. Die Funktion des Stromableiters an der Anode übernimmt eine Kupferfolie, an der Kathode eine Aluminiumfolie (Dormmann, 2021).

Abbildung 2 zeigt den Lade- und Entladevorgang. Beim Ladevorgang werden Lithium-Ionen (Li^+) durch das Elektrolyt von der Kathode zur Anode transportiert. Die Anode dient dabei als Speicher für die Lithium-Ionen, die sich zwischen den Graphitschichten befinden. Der elektrische Strom, der durch das externe Stromnetz (Ladegerät) fließt, führt zur Abgabe von Elektronen von der Kathode zur Anode.

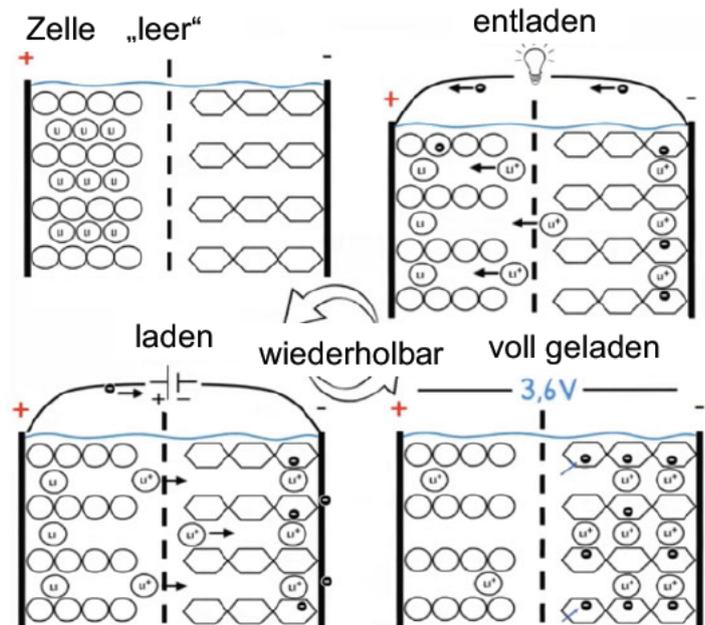


Abbildung 2: Entladevorgang und Ladezyklus einer Zelle (Sauter, 2022).

Beim Entladevorgang bewegen sich die Lithium-Ionen durch den Elektrolyten von der Anode zur Kathode. Über das externe Stromnetz fließen Elektronen von der Anode zur Kathode, wodurch z. B. ein Motor betrieben werden kann. Die Kathode dient als Speicher für die Lithium-Ionen, die in ihrer kristallinen Struktur festgehalten werden (Dormmann, 2021) (*Lithium-Ionen-Akku Aufbau und Funktion - Einfache Erklärung (Teil1)*, 2022) (Kunkelmann, 2015).

Typische Anwendungen in eKF

Die Batterien in eKF sind in der Regel als Batteriesysteme verbaut, die aus mehreren Batteriemodulen (siehe) bestehen, welche wiederum aus mehreren Zellen bestehen. Diese modulare Bauweise ermöglicht eine flexible Anpassung der Batteriekapazität und erleichtert den Austausch einzelner Module bei Beschädigungen. Zudem überwacht ein integriertes Batteriemanagementsystem (BMS) die einzelnen Module und Zellen, um die Sicherheit und Effizienz des Systems zu gewährleisten. Die Batterie ist zuständig, um das eKF mit Energie zu versorgen (Dormann, 2021).

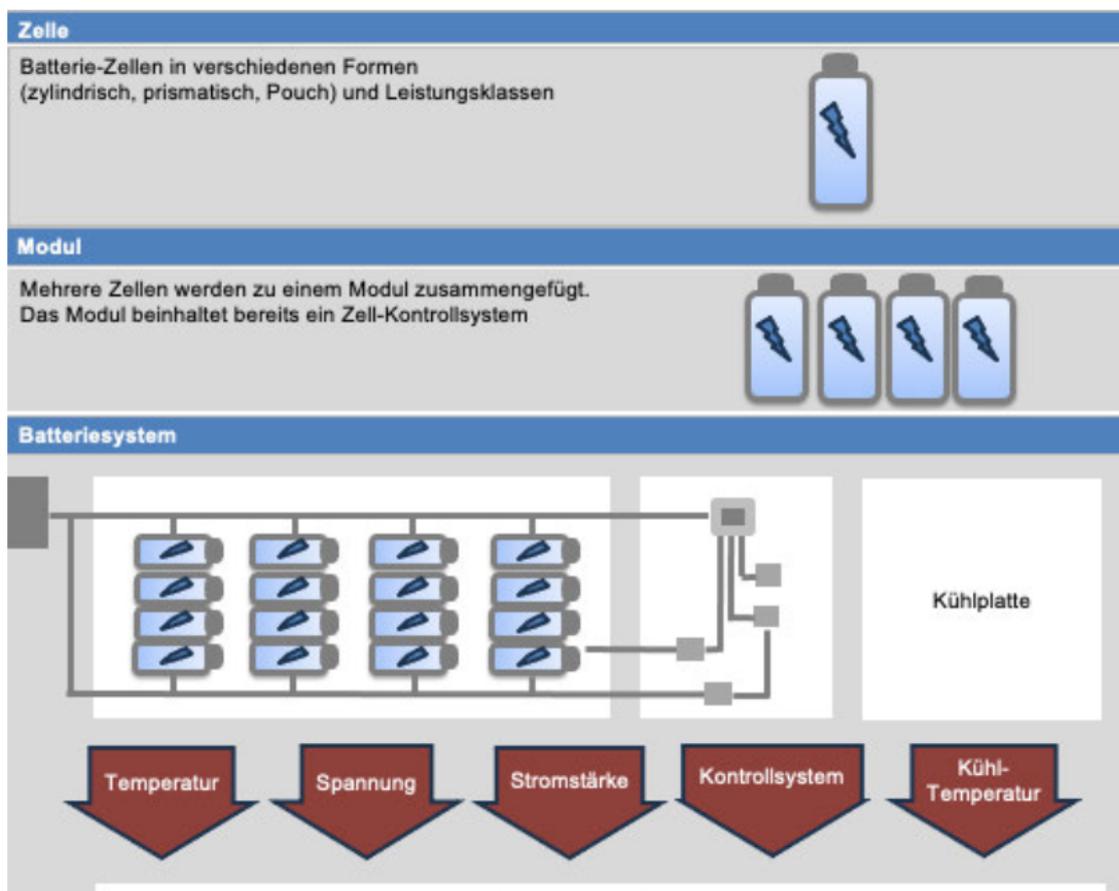


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Batteriesystems. Eigene Darstellung in Anlehnung an (Dormann, 2021).

Sicherheitstechnische Herausforderungen

In LIB werden Materialien mit hohem Energieinhalt und brennbare Elektrolyte kombiniert. Bei extremen äußeren Einflüssen wie Kurzschlüssen, hohen Temperaturen oder mechanischer Verformung können sicherheitskritische Situationen ausgelöst werden (Dorrmann, 2021). Durch die Verwendung bestimmter chemischer Verbindungen in Verbindung mit hohen Energiedichten und durch den bei Sekundärbatterien notwendigen Einsatz von Schaltelektronik (möglicher technischer Defekt) sind bei LIB spezifische Gefahrenpotentiale gegeben, die einer besonderen sicherheitstechnischen Betrachtung bedürfen (Buser, 2016). Aufgrund spektakulärer Brände und Explosionen wurde die mögliche Problematik von LIB in der Öffentlichkeit bekannt, was u. a. bei Notebooks und Smartphones in den letzten Jahren zu großen Rückrufaktionen führte (Buser, 2016).

Überblick über existierende Vorschriften und Regulierungen

Für die Beurteilung und das Management von Bränden, die durch LIB verursacht werden zunächst die bestehenden Vorschriften und Regelungen untersucht (Kunkelmann, 2017). Diese bieten erste Anhaltspunkte zur Orientierung und ermöglichen eine Abschätzung des vorhandenen Gefährdungspotenzials. Auch bilden sie die Basis für vorbeugende und einsatztaktische Maßnahmen. Im Zusammenhang mit elektrischen Anlagen und Betriebsmitteln wird Sicherheit häufig unter dem Aspekt der funktionalen Sicherheit betrachtet. Dabei wird Sicherheit als Abwesenheit eines inakzeptablen Risikos definiert. Risiko wiederum beschreibt die Kombination aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß, wobei der Schaden körperliche Verletzungen oder gesundheitliche Beeinträchtigungen von Personen, sowie Schäden an Sachgütern oder der Umwelt umfassen kann. Aus praktischer Sicht zeichnen sich sichere Zellen oder Batterien durch eine geringere Wahrscheinlichkeit aus, dass Fehler auftreten, die zu Schäden führen können. Es besteht die Möglichkeit, dass Batterien durch Erhitzung oder interne Gasentwicklung beschädigt werden. Die Folgen solcher Fehler können jedoch in Abhängigkeit von der Bauart und der Qualität des Produkts in unterschiedlicher Schwere auftreten (Kunkelmann, 2015).

Die Fehlerwahrscheinlichkeit hängt bei Zellen in erster Linie von der Fertigungsqualität (z.B. Reinheit der Materialien, Homogenität der Elektroden) ab, während sie bei Batterien maßgeblich durch den Aufbau und die technische Auslegung bestimmt wird (Dorrmann, 2021).

Um dies zu regulieren, gibt es In Deutschland verschiedene Regeln und Normen:

Mit dem zunehmenden Einsatz von eKF im privaten Bereich gewinnt auch die sicherheitstechnische Betrachtung der darin verbauten LIB für den Feuerwehreinsatz an Bedeutung (Kunkelmann, 2015). eKF werden häufig in privaten Kellern, Garagen, Wohnungen oder Fluren geparkt und geladen, da sie in der Regel mit höheren Anschaffungskosten verbunden sind und daher ungern auf der Straße abgestellt werden (Hochbahn, 2023).

Im Zusammenhang mit dem Betrieb und der technischen Ausstattung von eKF sind zunächst grundlegende Regelwerke zu berücksichtigen. Die Norm DIN EN 15194:2024-03 regelt die sicherheitstechnischen Anforderungen an Electrically Power Assisted Cycles (EPAC) wie Pedelecs und E-Bikes im Rahmen der Produktsicherheit. Für E-Tretroller und ähnliche Fahrzeuge enthält die Elektrokleinstfahrzeug-Verordnung (eKFV) verbindliche Mindestanforderungen u. a. an Geschwindigkeit, Bremsen und Beleuchtung, die ebenfalls für die Gefährdungsbeurteilung relevant sein können. Ergänzend greift § 63a der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) mit Anforderungen an die Energieversorgung der Beleuchtung (DIN, 2024a).

Für die im eKF eingesetzten LIB liefern verschiedene Normen sicherheitsrelevante Grundlagen. Die DIN EN 62133-2:2022-12 legt Anforderungen an wiederaufladbare Batterien mit alkalischen oder anderen nicht säurehaltigen Elektrolyten in tragbaren Geräten fest. Sie beinhaltet sicherheitstechnische Prüfungen hinsichtlich Überladung, interner Kurzschlüsse und thermischer Stabilität (DIN, 2022). Ergänzend stellt die internationale Normenreihe IEC 62660 (Teil 1-3) sicherheits- und leistungsbezogene Anforderungen speziell für LIB in Traktionsanwendungen (Einsatz von Batterien in Fahrzeugen) zur Verfügung. Für LIB kleinerer eKF wie E-Tretroller regelt DIN EN IEC 63281-2-1:2024-08 die sicherheitstechnischen Anforderungen, insbesondere im Hinblick auf das Brandverhalten und elektrische Fehlfunktionen (DIN, 2024b).

Weitere Hinweise gibt die DIN VDE V 0510-100:2023-04, die sich mit der Aufstellung von Batterien in baulichen Anlagen befasst. Sie enthält sicherheitstechnische Anforderungen an den Aufstellungsort, die Einhaltung von Schutzabständen sowie Anforderungen an die Zugänglichkeit für Wartung und Brandbekämpfung (DIN, 2023).

Die genannten Normen stellen einen signifikanten Faktor zur Risikoreduktion dar. Es erfolgt die Definition von Prüfverfahren, die darauf abzielen, das Verhalten von LIB unter definierten Bedingungen zu simulieren. Es kann somit die Hypothese aufgestellt werden, dass unter regulären Produktionsbedingungen eine spontane Entzündung von LIB nicht zu erwarten ist. Allerdings sind in der praktischen Anwendung Einschränkungen zu berücksichtigen.

Die Normprüfungen werden unter Laborbedingungen durchgeführt, wobei reale Einsatzszenarien wie beschädigte Akkus, nicht CE-zertifizierte Ladegeräte oder Überhitzung durch externe Brandlasten nicht vollständig abgedeckt sind.

Es ist festzustellen, dass zahlreiche Normen lediglich für spezifische Gerätetypen oder bestimmte Nutzungskontexte Gültigkeit besitzen. Für den häuslichen Gebrauch, beispielsweise das Laden von E-Bikes im Hausflur, existieren kaum verbindliche Vorschriften. Im privaten Bereich ist die Normenkenntnis der Nutzer:innen oft begrenzt. Fehlverhalten, wie das Überladen oder der Einsatz ungeeigneter Ladegeräte, erhöht das Risiko erheblich.

Die vorliegende Untersuchung kommt zu dem Schluss, dass sich die Feuerwehr bei der Lageeinschätzung nicht allein auf die Einhaltung von Normen verlassen kann. Vielmehr sind weitere Faktoren wie sichtbare Schäden am Akku, Rauchentwicklung, mögliche Rückzündungsgefahren oder Hitzestau zu berücksichtigen. Für die genannte Thematik stellen Normen lediglich eine Ausgangsbasis dar.

Obwohl in Deutschland umfangreiche Normen zur Sicherheit von LIB existieren, lässt sich ein völlig risikofreier Betrieb nicht gewährleisten. Die Befolgung technischer Vorschriften trägt signifikant zur Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Bränden bei. Allerdings kann ihre vollständige Einhaltung nicht gewährleistet werden, was die Möglichkeit eines Brandereignisses nicht gänzlich ausschließt.

Für die Feuerwehr bedeutet das: Ein umfassendes Gefahrenmanagement erfordert neben normativem Wissen auch einsatztaktische Erfahrung, Risikokompetenz und angepasste Strategien, insbesondere in Wohngebäuden, wo eKF häufig gelagert und geladen werden.

Wie aus dem Gutachten der Hochbahn Hamburg hervorgeht, stellen fehlerfrei hergestellte und sachgerecht gehandhabte LIB ein äußerst geringes Risiko dar. Expert:innen schätzen, dass nur etwa eine von zehn Millionen Batterien im Laufe ihrer Lebensdauer in Brand gerät (Hochbahn, 2023). Diese Zahlen vermitteln ein grundsätzlich geringes Gefährdungspotenzial.

Durch unsachgemäßen Umgang wie falsches Laden, technische Defekte oder äußere Einwirkungen kann es trotz umfangreicher Sicherheitsstandards zu Bränden kommen. Dies wird im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

Ursachen und Entstehung von Akkubränden

Für die Entwicklung einsatztaktischer Maßnahmen bei Bränden von LIB ist ein grundlegendes Verständnis der zugrunde liegenden Brandursachen erforderlich. Nach der DGUV Information 205-041 entsteht ein Brand durch das Zusammentreffen von brennbarem Material, Sauerstoff und einer Zündquelle, die alle in der Zelle vorhanden sind (vgl. Abbildung 4) (DGUV, 2024).

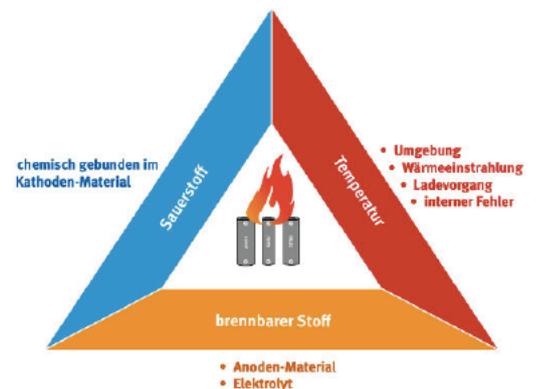


Abbildung 4: Branddreieck, bezogen auf eine LIB (DGUV, 2024).

Wie aus der DGUV Information 205-041 hervorgeht, kann ein LIB-Brand sowohl durch interne Vorgänge als auch durch äußere Einwirkungen ausgelöst werden. Abbildung 5 stellt die Gefahr der Brandausbreitung von Zelle zu Zelle innerhalb eines Batteriepacks dar („thermische Propagation“) (DGUV, 2024).

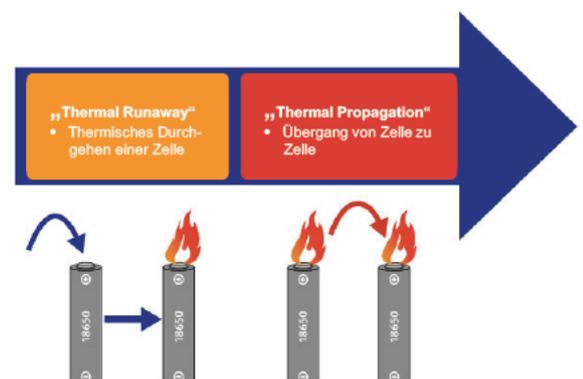


Abbildung 5: Brand in einer Zelle und in einem Batteriepack (DGUV, 2024).

Ein wesentlicher Risikofaktor ist die Überhitzung. Thermische Zersetzungsprozesse beginnen laut DGUV (2024) ab einer Temperatur von etwa 80 °C und können zu einem sogenannten Thermal Runaway (TR) führen (vgl. Abbildung 5), einem sich selbst verstärkenden chemischen Prozess. Wird dieser auf benachbarte Zellen übertragen, können Temperaturen von bis zu 1400 °C erreicht werden (vgl. Abbildung 6)(DGUV, 2024).

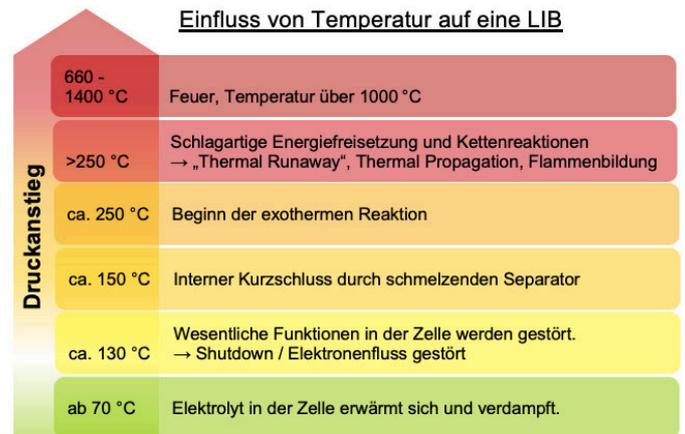


Abbildung 6: Einfluss von Temperatur auf eine LIB. Eigene Darstellung in Anlehnung an (DGUV, 2024).

Mit steigender Temperatur steigt auch der Druck in der Zelle (vgl. Abbildung 6). Wird dieser zu groß, entweichen brennbare Elektrolytdämpfe über Sicherheitsventile oder durch Zellbruch und es entsteht eine explosionsfähige Atmosphäre. Diese Dämpfe enthalten giftige, ätzende und gesundheitsschädliche Substanzen wie Lithiumhexafluorophosphat, das mit Feuchtigkeit zu Flusssäure (HF) und Phosphorsäure reagiert (Buser, 2016).

Weitere freigesetzte Substanzen umfassen unter anderem Graphit, Ethylencarbonat, Dimethylcarbonat, Schwermetalle (z. B. Kobalt, Nickel, Mangan) sowie toxische und korrosive Gase wie HF und Phosphorverbindungen (Buser, 2016). Dabei gelten insbesondere Nickelverbindungen als kanzerogen, während Cobalt bereits in geringen Dosen schwere Organschäden verursachen kann.

Die Gefährdung besteht nicht nur durch Gase. Buser (2016) hebt auch die Gefahr durch leitfähigen Graphitstaub hervor, der Kurzschlüsse verursachen kann, sowie durch mögliche Splitterwirkung explodierender Zellen.

HF wird als besonders kritisch beschrieben. Bereits kleinste Mengen können schwere Schäden an Atemwegen, Haut und Organen verursachen. Flusssäure, die bei Kontakt mit Wasser entsteht, ist ein starkes Kontaktgift, das tief ins Gewebe eindringt und schwer behandelbare Verletzungen verursacht. Laut DGUV (2024) kann bereits ein handelsüblicher Laptop-Akku mehr als 5000 m³ Raumluft in gesundheitsgefährdender Weise mit HF belasten.

Yuan *et al.* (2021) erläutern den Ablauf eines LIB-Brandes als mehrstufigen Prozess: Meist geht ein Kurzschluss voraus, der intern (z. B. durch Beschädigung des Separators oder der Lithium-Dendriten) oder extern (z. B. durch mechanische Einwirkungen oder unsachgemäßen Gebrauch) verursacht wird. Als Folge des Kurzschlusses steigt die Zelltemperatur schnell an. Die dabei ablaufenden exothermen Reaktionen führen zur Freisetzung brennbarer Gase, zum Schmelzen des Separators und schließlich zur Entzündung des Batterieinhalts. Der Brand kann sich dann schnell auf benachbarte Zellen ausbreiten und in eine stabile Verbrennungsphase übergehen (Yuan *et al.*, 2021).

Die DGUV (2020) betont, dass LIB während ihres gesamten Lebenszyklus, von der Herstellung über den Transport bis hin zur Nutzung und Entsorgung, brandgefährdet sein können.

Insbesondere die folgenden Ursachen spielen dabei eine zentrale Rolle (DGUV, 2020):

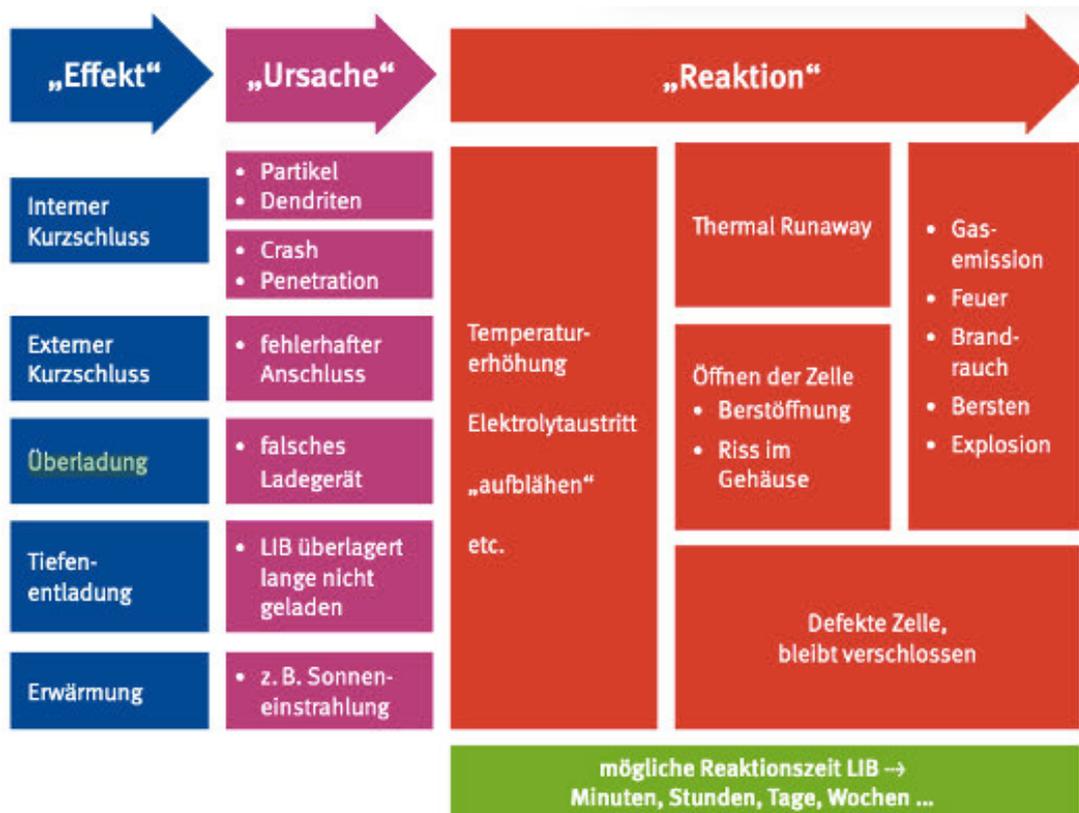


Abbildung 7: Einfluss von unterschiedlichen Ursachen auf die Gefährdungen und deren Reaktionen (DGUV, 2020).

Brände von LIB in eKF entstehen meist durch mechanische Beschädigung, Überladung, Alterung oder thermische Einflüsse. In vielen Fällen führen interne oder externe Kurzschlüsse zu einem schnellen Temperaturanstieg, der einen Thermal Runaway auslöst, ein sich selbst verstärkender Prozess, der zur Entzündung des Elektrolyten und im schlimmsten Fall zu einem Zellbrand mit möglichen Kettenreaktionen führt.

Folgende Faktoren sind für die Feuerwehr besonders relevant:

Überladung (z. B. durch falsche Ladegeräte oder fehlende Schutztechnik): Erhöht die Brandgefahr massiv, insbesondere bei gleichzeitig hohen Temperaturen.

Mechanische Beschädigungen (z. B. durch Unfälle oder Stürze): Können interne Kurzschlüsse auslösen. Bereits kleine Beschädigungen erhöhen das Brandrisiko.

Alterungsbedingte Veränderungen (z. B. Lithium-Plating, Dendritenbildung): Können auch ohne äußere Einwirkung zu Kurzschlüssen und Selbstentzündungen führen.

Thermische Einflüsse (z. B. Hitze, direkte Sonneneinstrahlung): Können zur Instabilität der Zellchemie führen und somit zu einer Selbstentzündung.

Zusätzlich stellt die **thermische Ausbreitung** in Akkumodulen eine erhebliche Gefahr dar, insbesondere bei größeren Batteriepacks in eKF. Im Brandfall setzen LIB toxische, korrosive und brennbare Gase frei, was die taktischen Anforderungen an die Feuerwehr erheblich erhöht. Wie Kunkelmann (2015) betont, erfordert der Umgang mit solchen Gefahrstoffen in Einsatzsituationen eine besondere Beurteilung der Lage, angepasste Schutzmaßnahmen und eine kontinuierliche Risikoabwägung durch die Einsatzkräfte.

Vergleich von Brandverläufen

Ein Gutachten der Hamburger Hochbahn zeigt anhand zweier Beispiele deutlich, wie stark sich die Brandverläufe je nach Zündinitial unterscheiden können. In Abbildung 8 sind die sogenannten Zündinitialkurven einer brennenden Reisetasche und eines Pedelecs dargestellt (Hochbahn, 2023):

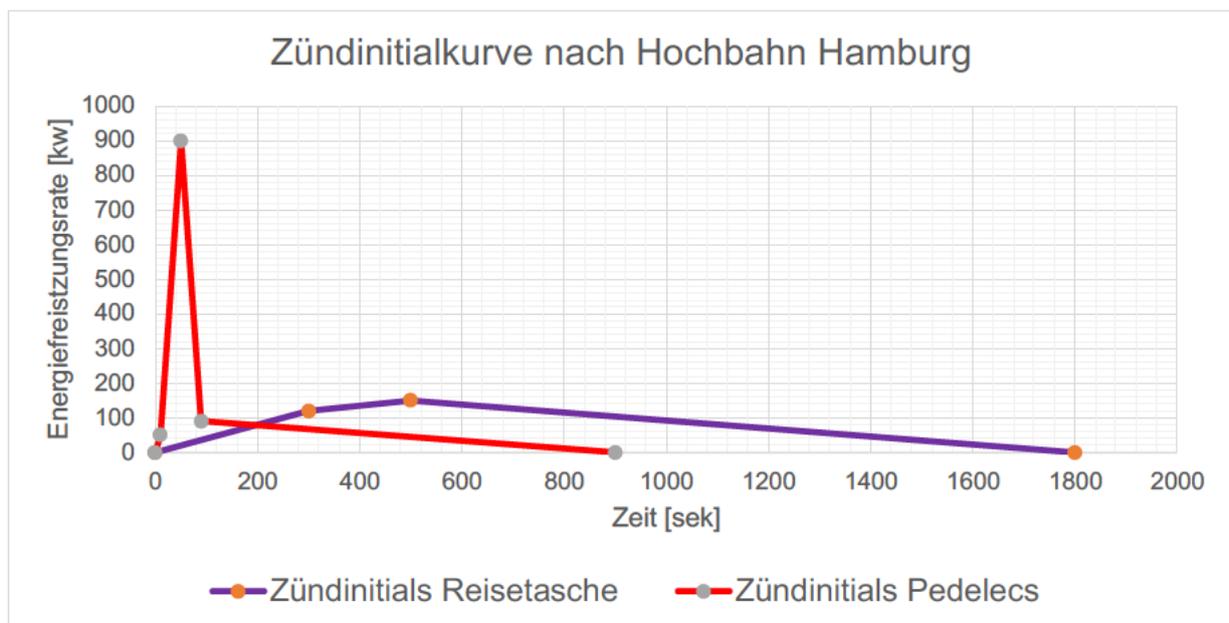


Abbildung 8: Zündinitialkurve. Eigene Darstellung in Anlehnung an (Hochbahn, 2023).

Bei der Reisetasche steigt die Energiefreisetzungsrates über einen längeren Zeitraum gleichmäßig an: Sie erreicht nach ca. 300 Sekunden ca. 120 kW und nach ca. 500 Sekunden ihr Maximum von 150 kW. Danach fällt die Kurve allmählich ab und erreicht nach ca. 1800 Sekunden den Nullpunkt (Hochbahn, 2023).

Im Gegensatz dazu zeigt das Pedelec einen deutlich aggressiveren Brandverlauf: Die Kurve erreicht bereits nach 50 Sekunden ein Maximum von 900 kW und fällt dann innerhalb kürzester Zeit ab. Bereits nach 90 Sekunden werden nur noch 90 kW freigesetzt, bevor sie bis zur 900. Sekunde vollständig abklingt (Hochbahn, 2023).

Diese stark unterschiedlichen Verläufe verdeutlichen die Herausforderung für die Feuerwehr. Während einige Brände träge verlaufen und längere Reaktionszeiten ermöglichen, können Akkubrände, wie beim Pedelec, explosionsartig verlaufen und extrem hohe Energiemengen in sehr kurzer Zeit freisetzen (Yuan *et al.*, 2021). Daraus ergeben sich wesentliche taktische Konsequenzen, insbesondere im Hinblick auf schnelle Ersterkennung und Einschätzung des Brandpotenzials, sofortige Rückzugs- und Abschirmmaßnahmen bei hoher Energieentwicklung und die Notwendigkeit robuster Schutzausrüstung wegen kurzfristig auftretender toxischer und thermischer Belastung (Zhang *et al.*, 2024). Um adäquate einsatztaktische Strategien entwickeln zu können ist es daher entscheidend, die Wirksamkeit und Grenzen verschiedener Löschmethoden zu kennen. Im folgenden Abschnitt werden wissenschaftlich untersuchte Verfahren zur Brandbekämpfung von LIB vorgestellt und im Kapitel 3.3 in Hinblick auf ihre Praxistauglichkeit bewertet.

Vorstellung der Löschmethoden aus der Wissenschaft

Die Brandbekämpfung von LIB stellt die Einsatzkräfte vor besondere Herausforderungen. Extreme Temperaturen, toxische Emissionen, thermische Ausbreitung und die Gefahr der Wiederentzündung erfordern spezielle Löschrategien. Zahlreiche wissenschaftliche Studien und Fachgutachten haben sich daher in den letzten Jahren mit der Frage beschäftigt, welche Löschmittel und Methoden bei LIB-Bränden besonders effektiv sind. Im Zentrum dieser Untersuchungen stehen dabei die besonderen physikalisch-chemischen Eigenschaften von LIB-Bränden, die maßgeblich die Auswahl geeigneter Löschrategien beeinflussen.

In wissenschaftlichen Studien zur Brandbekämpfung von LIB wurden verschiedene Löschmittel und -techniken untersucht. Ein zentrales Ergebnis vieler Studien ist, dass Wasser aufgrund seiner hohen Kühlwirkung als primäres Löschmittel geeignet ist. Die Kühlung mit Wasser kann die Auswirkungen eines thermischen Durchgehens („Thermal Runaway“) abmildern und eine Ausbreitung auf andere Zellen und Module verhindern. Versuche haben gezeigt, dass selbst bei frei zugänglichen Lithium-Ionen-Traktionsbatterien der Brand durch Wasser auf einen Radius von ca. 2 m begrenzt werden kann. Darüber hinaus kann das Löschwasser nach Laboruntersuchungen unter bestimmten Bedingungen direkt in die Kläranlage eingeleitet werden (Kunkelmann, 2017). Um die Wirksamkeit einzelner Löschmittel besser zu verstehen ist es hilfreich, die typischen Brandeigenschaften von LIB näher zu betrachten.

LIB-Brände zeichnen sich durch eine hohe Wärmefreisetzungsrates, einen schnellen Temperaturanstieg und eine langanhaltende Phase erhöhter Temperaturen aus. Gleichzeitig droht ein TR auf benachbarte Zellen. Hinzu kommt die Freisetzung toxischer Gase wie Kohlenmonoxid (CO), Fluorwasserstoff (HF), Stickoxide (NO_x) und Schwefeldioxid (SO₂). Besonders kritisch ist, dass es auch nach dem Löschen der offenen Flammen ohne kontinuierliche Kühlung zu Wiederentzündungen kommen kann. Aufgrund der komplexen Zusammensetzung von LIB, bestehend aus brennbaren festen Materialien (z. B. Graphitanode), flüssigen Elektrolyten (organische Lösungsmittel), brennbaren Gasen (z. B. H₂, CH₄, C₂H₄) sowie potenziell reaktiven Metallen (Lithium), sind differenzierte Löschansätze erforderlich. Im Folgenden werden die verschiedenen Arten von Löschmitteln systematisch vorgestellt, beginnend mit den wasserbasierten Mitteln, die sich als besonders wirksam erwiesen haben.

1. Wasserbasierte Löschmittel

Wasserbasierte Systeme bieten die besten Kühlwirkungen und sind in der Lage, eine thermische Kettenreaktion zu unterbrechen. Gleichzeitig bestehen Risiken durch elektrische Leitfähigkeit und potenzielle Korrosion.

Wasser (Fluten/Eintauchen): Sehr effektiv zur Unterbrechung von TR durch drastische Kühlung. Herausforderungen bestehen in der sicheren Anwendung bei Hochspannungssystemen sowie in der Nachbehandlung kontaminierter Löschwässer (Xu *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2024).

Wassernebel: Effektiv gegen Flammenausbreitung, abhängig von Druck, Partikelgröße und Sprühintensität. Zusätze wie Tenside, Kaliumhydrogencarbonat oder Harnstoff verbessern die Leistung und reduzieren die HF-Freisetzung (Liu *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2024).

Schaum (AFFFs): Deckt die Brandoberfläche ab, isoliert Sauerstoffzufuhr. Jedoch geringe Kühlwirkung und Risiko der Wiederentzündung durch Kathoden-Zersetzung. Umweltauswirkungen und Korrosionsgefahr schränken den Einsatz ein (Liu *et al.*, 2020; Luo and Chen, 2021).

Fazit: Wasserbasierte Löschmittel sind derzeit die effektivsten Mittel zur Beherrschung von LIB-Bränden, erfordern jedoch besondere Schutzmaßnahmen bei Hochspannungssystemen.

2. Gasförmige Löschmittel

Gasförmige Löschmittel kommen insbesondere bei stationären Batteriespeichersystemen (ESS) oder in geschlossenen Räumen zur Anwendung, da sie dort ihre Wirkung entfalten können, ohne empfindliche elektronische Systeme zu beschädigen. Sie zeichnen sich durch gute Verteilungseigenschaften und elektrische Nichtleitfähigkeit aus, haben jedoch meist eine begrenzte Kühlwirkung:

Halon 1211: Durch chemische Kettenreaktionsunterbrechung und kann LIB-Brände löschen, jedoch ohne nachhaltige Kühlung – Wiederentzündungen sind häufig. Wegen seiner stark ozonschädigenden Wirkung ist Halon 1211 in vielen Ländern, darunter Deutschland und die EU, seit 2004 weitgehend verboten. Nur wenige Ausnahmen, etwa in der Luftfahrt, sind zulässig (Europäische Kommission, 2009).

HFC-227ea (FM-200): Löscht offene Flammen schnell, jedoch ist die Kühlwirkung unzureichend. Der während des TR freigesetzte Sauerstoff schwächt zudem die erstickende Wirkung. Studien zeigen unterschiedliche Ergebnisse je nach Zelltyp, Kapazität und Aufbau. Wiederentzündungen sind häufig dokumentiert (Wang *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2024).

Kohlenstoffdioxid (CO₂): Aufgrund der durch TR freigesetzten Sauerstoffmengen ist CO₂ in der Regel nicht wirksam. Die Kühlleistung ist gering, Eisbildung kann Löschleitungen verstopfen. Wiederentzündungen sind sehr wahrscheinlich (Yuan *et al.*, 2021).

Novec 1230 (C₆F₁₂O): Ein modernes, elektrisch nichtleitendes Löschmittel mit besserer Umweltbilanz. Es kann LIB-Brände kontrollieren, jedoch ist eine kontinuierliche Anwendung notwendig. Die Kombination mit Wassernebel verbessert die Löschwirkung erheblich (Yang *et al.*, 2018; Yuan *et al.*, 2021).

Flüssigstickstoff (LN₂): Wirkt über exzellente Kühlung. Studien zeigen, dass LN₂ TR verzögern oder unterdrücken kann. Der logistische Aufwand für Lagerung und Handhabung ist jedoch hoch (Zhang *et al.*, 2024; Bai *et al.*, 2025).

Fazit: Gasförmige Löschmittel eignen sich primär zur Flammenunterdrückung, sind jedoch aufgrund ihrer begrenzten Kühlleistung für die nachhaltige Bekämpfung von LIB-Bränden nur eingeschränkt geeignet.

3. Feste Löschmittel (Trockenpulver)

ABC-Pulver: Kann die Deflagration und die Flammenausbreitung verzögern. Jedoch ist die Wärmekapazität begrenzt, und Rückstände können bei Feuchtigkeit leitfähig werden, was das Risiko für elektrische Kurzschlüsse erhöht. Wiederentzündungen sind häufig (Cheng, Chiang and Zhang, 2013; Zhang *et al.*, 2021).

Fazit: Aufgrund der schlechten Wärmeabfuhr und elektrischen Risiken sind Trockenpulver bei LIB-Bränden nur bedingt geeignet.

4. Aerosole

Aerosole zeigen in geschlossenen Räumen initial gute Löschwirkung. Die Kühlleistung ist jedoch gering, und Rückstände können korrosiv und leitfähig sein. Die Gefahr der Wiederentzündung bleibt bestehen (Yang *et al.*, 2018; Yuan *et al.*, 2021).

5. Innovative Löschrategien

Feuerdetektionsrohr-Technologie: Diese Technologie ermöglicht eine frühzeitige Branddetektion in unmittelbarer Nähe potenzieller Zündquellen und leitet im selben Moment eine gezielte Löschmittelabgabe ein. Die Funktionsweise beruht auf einem Druck beaufschlagten Kunststoffrohr, das sowohl als Detektor als auch als Löschmittelleitung dient. Im Brandfall kommt es zum Bersten des Rohrs an der Stelle mit der höchsten thermischen Belastung, wodurch das Löschmittel unmittelbar an dieser Stelle freigesetzt wird. Das System erweist sich insbesondere als geeignet für den Einsatz in modularen Batteriesystemen oder kompakten Einhausungen, bei denen eine vollständige Umhüllung der Zellen technisch realisierbar ist. Die Effektivität ist dabei abhängig von der lückenlosen Abdeckung aller relevanten Zellbereiche (Zhang *et al.*, 2024).

Kollaborative Methoden: Die Kombination unterschiedlicher Löschmitteltypen, wie gasförmiger und wasserbasierter Komponenten, ermöglicht die Nutzung komplementärer Wirkmechanismen. Es konnte festgestellt werden, dass gasförmige Mittel, wie fluorierte Ketone (z. B. $C_6F_{12}O$), eine schnelle thermische Unterbrechung der Reaktion erzielen. Hingegen wurde beobachtet, dass feine Wassernebel eine langanhaltende Kühlung bewirken und schädliche Partikel in der Luft binden. Aus den ersten Laborversuchen und großmaßstäblichen Tests geht hervor, dass sich die Löschwirkung signifikant verbessert hat. Zugleich ist die Rückzündungsgefahr im Vergleich zur Monostrategie geringer (Yuan *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2024; Bai *et al.*, 2025).

Intermittierendes Sprühen: Diese Methode nutzt zyklisch eingesetzte Wassersprühstöße, um die aktive Löschrzeit zu verlängern und den Wasserverbrauch gezielt zu reduzieren. Insbesondere bei modular aufgebauten Batteriesystemen oder in komplexen baulichen Strukturen erlaubt das intermittierende Vorgehen eine gezielte Kühlung einzelner Brandsegmente, ohne angrenzende Zellen thermisch zu destabilisieren. Dies reduziert das Risiko einer Rückzündung und minimiert gleichzeitig die Gefahr eines Wasserschadens. Empirische Evidenz hat gezeigt, dass sich die Technik insbesondere in experimentellen Szenarien mit Lithium-Ionen-Akkus als effizient und taktisch flexibel erwiesen hat (Meng *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2024).

Zusammenfassend zeigt die wissenschaftliche Literatur, dass es kein universelles Löschmittel für alle Brandereignisse mit Lithium-Ionen-Batterien gibt. Die Wahl der geeigneten Löschrategie muss immer im Kontext der jeweiligen Einsatzsituation erfolgen, beeinflusst durch Faktoren wie Zellchemie, Modulbauweise und Energiedichte. Insbesondere wasserbasierte Löschrverfahren, idealerweise in Kombination mit innovativen Techniken wie der intermittierenden Besprühung, bieten derzeit das größte Potenzial für eine effektive Brandbekämpfung.

In Kapitel 3.2 werden die verschiedenen Löschransätze weiter vertieft. Dort erfolgt eine systematische Analyse der eingesetzten Verfahren anhand einer vergleichenden Bewertungstabelle mit dem Ziel, deren Eignung im Feuerwehreinsatz praxisnah zu beurteilen.

Bevor jedoch diese Analyse durchgeführt wird, soll im folgenden Abschnitt zunächst ein Überblick über die aktuelle Vorgehensweise deutscher Feuerwehren bei Bränden von Lithium-Ionen-Batterien in Elektrokleinstfahrzeugen gegeben werden. Dabei werden sowohl statistische Entwicklungen als auch Erfahrungen aus realen Einsatzberichten betrachtet, um das praktische Einsatzgeschehen einordnen zu können.

Aktuelle Vorgehensweisen der Feuerwehr bei Akkubränden

Laut dem statistischen Bundesamt (Destatis) gibt es mit Stand September 2021 über 7 Millionen Elektrofahrräder in deutschen Haushalten (Statistisches Bundesamt, 2021).

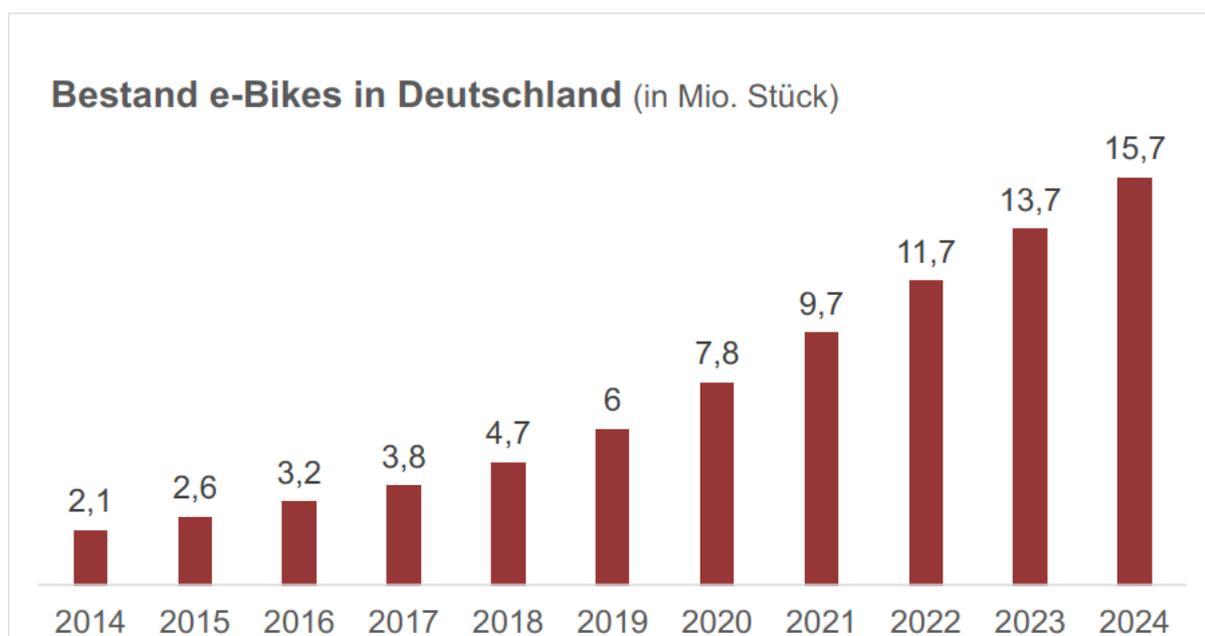


Abbildung 9: e-Bikes Bestand in Deutschland. Eigene Darstellung in Anlehnung an (ZIV-Zweirad-Industrie-Verband, 2025). (ZIV, 2025)

Rund 990.000 E-Scooter waren laut Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) 2023 auf Deutschlands Straßen unterwegs. Das sind fast 30 Prozent mehr als im Vorjahr. Zugenommen hat vor allem die Anzahl privater Scooter.

Während die Anzahl an Leih-Scootern um lediglich 9 Prozent (Plus 17.000 Stück auf rund 210.000 Stück) wuchs, stieg die Anzahl privater Scooter um ganze 37 Prozent (Plus rund 200.000 Stück auf 780.000 Stück). Gemäß der Einschätzung der stellvertretenden GDV-Hauptgeschäftsführerin erfahren E-Scooter eine zunehmende Wahrnehmung als etabliertes Verkehrsmittel und ersetzen in zahlreichen Fällen traditionelle Fortbewegungsarten wie das Automobil, das Fahrrad oder das Gehen (Jarosch, 2025).

Die zunehmende Nutzung von E-Tretrollern, E-Bikes und Pedelecs geht mit einer Häufung von Brandereignissen einher, deren Ursache in Defekten oder Fehlfunktionen von Lithium-Ionen-Batterien zu liegen scheint. Diese Ereignisse treten insbesondere während des Ladevorgangs auf, aber auch infolge mechanischer Einwirkungen wie Stürzen oder unsachgemäßer Lagerung (K+W Sicherheitstechnik GmbH, 2025).

Erfahrungen aus realen Einsatzberichten:

Die durchgeführten Recherchen zu Bränden von eKF in Deutschland ergaben, dass es in der Vergangenheit zu verschiedenen Bränden von Pedelecs und E-Bikes kam, die sich insbesondere beim Aufladevorgang im privaten Umfeld ereigneten. Die nachfolgende Auflistung von Brandereignissen erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie soll jedoch einen Überblick über die Thematik geben. Zu den ausgewählten Bränden wurden an den Fundstellen folgende Angaben gemacht:

1. Am 22. Mai 2024 ist in Berlin-Lichtenberg eine Wohnung in einem Studierendenwohnheim ausgebrannt, weil ein defekter E-Bike-Akku in der Wohnung geladen wurde. Das Feuer brach im 13. Stock der Alfred-Jung-Straße aus, breitete sich schnell aus, konnte aber von der Feuerwehr mit 62 Einsatzkräften rasch gelöscht werden. Verletzt wurde niemand, da die Mieter und Nachbarn rechtzeitig fliehen konnten (Spiegel Panorama, 2024).
2. Am 7. April 2024 fiel in Traunstein ein E-Bike-Akku aus dem vierten Stock eines Mehrfamilienhauses und entzündete sich im Erdgeschoss. Das Feuer breitete sich rasch aus, doch dank des schnellen Eingreifens der Feuerwehr mit Drehleitern und der Rettung von sieben Personen konnte Schlimmeres verhindert werden. Fünf Personen wurden leicht verletzt, und der Sachschaden wurde auf etwa 5.000 Euro geschätzt. Die betroffenen Bewohner:innen mussten das Gebäude evakuieren (Traunsteiner Tagesblatt, 2024).
3. Am 27. September 2023 entzündete sich in Gevelsberg ein E-Bike-Akku während des Ladevorgangs im Erdgeschoss einer Doppelhaushälfte. Der Brand verursachte eine starke Rauchentwicklung und Rußablagerungen, konnte aber schnell von 54 Feuerwehrkräften gelöscht werden, bevor er auf das Gebäude übergriff. Die betroffene Wohnung wurde vorerst unbewohnbar, doch glücklicherweise wurde niemand verletzt. Der Vorfall ereignete sich nachts, als der Akku an eine Steckdose in der Nähe eines Wohnraumes angeschlossen war (Gang, 2023).

4. Am 31. Mai 2024 brach in Uelzen ein Brand aus, als ein E-Bike-Akku auf einer Terrasse einer Erdgeschosswohnung Feuer fing. Aufgrund der starken Rauchentwicklung und der Hitze, die durch das Feuer erzeugt wurden, musste die Feuerwehr mit einem Kleinlöschgerät eingreifen. Der Akku wurde sicher in einem Wasserbad abgelöscht, und die betroffenen Räume wurden belüftet. Trotz der Schäden an der Wohnung und dem Keller gab es keine Verletzten. Der Brand konnte dank der schnellen Reaktion der Feuerwehr effektiv bekämpft werden (Höpfner, 2024).
5. Am 20. Februar 2025 wurde in einer Wohnung im Essener Stadtteil Borbeck ein Brand durch einen defekten Lithium-Ionen-Akku verursacht. In der Folge kam es zu einer starken Rauchentwicklung im Treppenhaus des Mehrfamilienhauses, sodass ein älteres Ehepaar im ersten Stock durch die Feuerwehr unter Einsatz einer Leiter gerettet werden musste. Der Bewohner der betroffenen Wohnung konnte sich selbst in Sicherheit bringen, wurde jedoch zur weiteren medizinischen Versorgung in ein Krankenhaus gebracht. Die Löscharbeiten wurden von zwei Löschzügen durchgeführt, deren Anfahrt durch parkende Autos erschwert wurde (Radio Essen, 2025).
6. Am 4. September 2024 brach in einem Wohnhaus in Goldbach ein Kellerbrand aus, verursacht durch zehn brennende Lithium-Ionen-Akkus. Dichter Rauch erschwerte den Einsatz, doch 39 Feuerwehrkräfte konnten das Feuer nach 45 Minuten löschen. Ein Anwohner blieb unverletzt. Der Brandrauch verursachte in Aschaffenburg eine Geruchsbelästigung, die weitere Feuerwehreinsätze nötig machte (Kreisfeuerwehrverband Aschaffenburg e.V., 2024).
7. In der Nacht zum 28. März 2022 löste ein an einem Ladegerät hängender Akku eines E-Scooters einen Brand in einer Wohngemeinschaft in Hamburg aus. Das Feuer schlug schnell aus dem Fenster und dichter Qualm breitete sich rasch aus, was die Fluchtwege versperrte. Mehr als 17 Personen mussten teils mit Dreh- und Steckleitern aus dem stark verrauchten Gebäude gerettet werden. Über 50 Einsatzkräfte waren vor Ort. Zwei Personen wurden mit Verdacht auf Rauchgasinhalation ins Krankenhaus gebracht. Eine spezifische Bewertung oder Nachbereitung des Vorfalls wurde nicht genannt (trinasco GmbH, 2022).

8. Am 22. Februar 2025 verursachte ein Akku eines Haushaltsgeräts in einem Keller in Abstatt einen Brand. Der Bewohner löschte das Feuer selbst, erlitt jedoch Rauchvergiftungen und wurde ins Krankenhaus gebracht. Die Feuerwehr führte Nachlöscharbeiten unter Atemschutz durch, entfernte die Akkus und belüftete den Keller. Ein Fachberater für Elektromobilität kümmerte sich um die fachgerechte Entsorgung der Akkus. Die Bewohnerin wurde über die sicheren Reinigungsmaßnahmen informiert (Ehmer, 2025).
9. Am 10. September 2024 brach in Karlstein am Main auf dem Lagerplatz eines Batterieherstellers ein Brand aus, bei dem mehrere Paletten mit Lithium-Akkus in Flammen standen. Hohe Rauchsäulen waren sichtbar, und es kam wiederholt zu Selbstentzündungen. Das Feuer konnte schnell unter Kontrolle gebracht werden, jedoch erforderte die Brandbekämpfung ca. sechs Stunden. Ein Feuerwehrmann wurde leicht verletzt. Der Sachschaden wird im niedrigen fünfstelligen Bereich geschätzt. Ermittlungen laufen, die Polizei geht von Selbstentzündung der Akkus aus (Polizeipräsidium Unterfranken, 2024).
10. Am 11. Mai 2024 explodierte ein Akku im Ladegerät im Keller eines Wohnhauses in Aalen Aspach, was zu einem Brand führte und größere Schäden verursachte. Die Feuerwehr führte die Löscharbeiten durch, wobei starke Rußbildung auftrat. Der Sachschaden belief sich auf etwa 100.000 Euro, und das Wohnhaus war vorerst unbewohnbar. Ein Feuerwehrmann erlitt leichte Brandverletzungen. Eine spezifische Nachbereitung oder Bewertung wurde nicht genannt (Polizeipräsidium Aalen, 2024).

Internationale Vergleiche: Lösungen anderer Länder

In verschiedenen Ländern mehren sich die Vorfälle von Bränden, die durch Lithium-Ionen-Akkus in eKF verursacht werden. Besonders Städte mit hoher eKF-Nutzung, wie **London**, **New York City** oder Regionen in **Australien**, reagieren mit Aufklärungskampagnen, technischen Innovationen und regulatorischen Überlegungen.

London

Im Jahr 2024 registrierte die Londoner Feuerwehr 160 Brände, die durch E-Bikes und E-Scooter verursacht wurden – durchschnittlich ein Vorfall alle zwei Tage. Dies ist ein deutlicher Anstieg im Vergleich zu den Vorjahren. Die Feuerwehr betont, dass E-Bikes eines der am schnellsten wachsenden Brandrisiken in der Stadt sind (Loxxer, 2024).

New York

Im Jahr 2024 gab es in New York City 277 Brände, die durch Lithium-Ionen-Batterien verursacht wurden, ein leichter Anstieg gegenüber den 268 Vorfällen im Jahr 2023 (Loxxer, 2024).

Australien

Im Jahr 2024 reagierte *Fire and Rescue NSW*, die Berufsfeuerwehr des australischen Bundesstaates New South Wales, auf 272 Brände im Zusammenhang mit Lithium-Ionen-Batterien, was mehr als fünf Vorfälle pro Woche bedeutet. Feuerwehren in Victoria und Queensland berichteten fast täglich über solche Brände. Behörden nennen die unsachgemäße Nutzung von Drittanbieter-Ladegeräten, beschädigte Akkus und Eigenmodifikationen als Hauptursachen dieser Vorfälle (Loxxer, 2024).

Die NYCHA (New York City Housing Authority) diskutiert ein Verbot entsprechender Elektrofahrzeuge in Privathäusern. Das Problem sind nicht E-Bikes, sondern nicht zertifizierte, nicht passende, beschädigte oder manipulierte Lithium-Ionen-Akkus. Leider gibt es in New York keine Zertifizierungspflicht für die Akkus bezüglich Sicherheit und Herkunft. Die wenigen zertifizierten Akkus auf dem Markt seien teuer und oftmals für die Zielgruppe der Lieferfahrer:innen nicht bezahlbar. Es wird daher im Stadtrat diskutiert, den Lieferant:innen nach einer entsprechenden Schulung einen finanziellen Zuschuss für den Kauf von teuren, aber lizenzierten Akkus anzubieten. Andere Regulierungsideen beinhalten eine Pflichtlizenzierung der Batterien mit entsprechenden Kontrollen. Auch will die Stadt New York vereinzelt öffentliche Ladestationen einrichten (Hochbahn, 2023).

Taylor *et al.* (2024) analysieren Elektrobrände in Wohngebäuden in der Grafschaft Merseyside (England) für den Zeitraum 2011 bis 2022 mit besonderem Augenmerk auf Brände, die durch Lithium-Ionen-Batterien (LIB) verursacht wurden. LIB-Brände stellen eine neue Art von Bränden dar, die insbesondere durch Batterien von E-Bikes und E-Scootern ausgelöst werden und sich durch spezifische Brandeigenschaften auszeichnen. So bergen diese Brände das Risiko eines thermischen Durchgehens, einer Kettenreaktion, die zu explosionsartigen Ereignissen führen kann und setzen giftige Gase frei, oft ohne Vorwarnung (Taylor, Fielding and O'Boyle, 2024).

Im Jahr 2023 wurden in London 143 Brände mit E-Bikes und 36 Brände mit E-Scootern registriert. In Merseyside wurden von 90 untersuchten elektrischen Bränden zehn auf batteriebetriebene Geräte und Generatoren zurückgeführt. Die räumliche Analyse zeigt, dass von 28 Bränden in Schlafzimmern drei und von 18 Bränden in Wohnzimmern vier auf elektrische Geräte (einschließlich Batterien) zurückzuführen waren (Taylor, Fielding and O'Boyle, 2024).

Die zunehmende Verbreitung von Elektrofahrrädern und Elektrorollern, die typischerweise mit LIB betrieben und zu Hause aufgeladen werden, erhöht die Relevanz dieser Art von Bränden. Aus diesem Grund empfehlen Taylor *et al.* (2024), sich strikt an die Anweisungen des Herstellers zu halten, die Batterien an kühlen Orten zu lagern, nur Original-Ladegeräte zu verwenden und Überladung, Laden über Nacht und bei Abwesenheit zu vermeiden.

Das UK National Fire Chiefs Council warnt vor Brandgefahren durch minderwertige oder modifizierte Akkus und fordert eine verpflichtende Sicherheitszertifizierung durch anerkannte Stellen. Allerdings werden LIB-Brände im englischen Brandereigniserfassungssystem derzeit nicht gesondert erfasst (Taylor, Fielding and O'Boyle, 2024).

In der Altersgruppe der über 75-Jährigen dominieren bei elektrischen Brandverletzungen andere Ursachen wie Verkabelung, Beleuchtung und Haushaltsgeräte; Batterien spielen in diesem Zusammenhang keine wesentliche Rolle (Taylor, Fielding and O'Boyle, 2024).

Diese Erkenntnisse aus der Analyse von Taylor *et al.* (2024) unterstreichen die Relevanz einer systematischen Untersuchung von Bränden von Lithium-Ionen-Batterien im häuslichen Umfeld. Um die Einsatztaktik der Feuerwehr bei solchen Bränden fundiert beurteilen zu können, ist eine gezielte Methodik zur Datenerhebung und -auswertung erforderlich. Im folgenden Abschnitt wird daher die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit hinsichtlich der verwendeten Methoden beschrieben.

2.2. Methodik

Die vorliegende Arbeit verfolgt einen qualitativen, theoriegeleiteten Ansatz. Die Methodik stützt sich auf drei sich ergänzende Ergebnistabellen:

I. Analyse einsatztaktischer Unterlagen von Feuerweherschulen

Ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchung war die Analyse von Ausbildungsunterlagen, Leitfäden und internen Richtlinien deutscher Feuerweherschulen.

Hierfür wurden alle 16 Landesfeuerweherschulen in Deutschland per E-Mail kontaktiert. Ziel war es, Informationen zu erhalten über:

- bestehende Ausbildungskonzepte
- einsatztaktische Empfehlungen
- speziell entwickelte Handlungsanweisungen im Bereich LIB-Brände

Insgesamt reagierten acht Schulen auf die Anfrage und stellten verschiedene Unterlagen, Präsentationen und Ausbildungsinhalte zur Verfügung. Die erhaltenen Dokumente wurden im Rahmen der Tabelle 1 ausgewertet. Diese Tabelle umfasste folgende Reiter:

- Feuerweherschule (Name und Standort)
- Themen / Materialien zu LIB-Bränden (mit Fokus auf allgemeine LIB-Brände und spezifisch auf eKF bezogene Inhalte)
- Besondere Inhalte / Schwerpunkte (z.B. spezifische Taktiken, besondere Hinweise zu Gefahren)

- Quelle (Art der Dokumente, z.B. Skripte, Präsentationen)

Durch diese strukturierte Analyse konnten regionale Unterschiede, bestehende Defizite sowie innovative Ansätze im Bereich der LIB-Brandausbildung identifiziert werden. Die Ergebnisse dieser Auswertung wurden im weiteren Verlauf genutzt, um gezielte Verbesserungsvorschläge für die Entwicklung des Feuerwehr-Dokuments (Anhang: Taschenkarte) abzuleiten.

II. Literaturrecherche

Die Erstellung der zweiten Tabelle erfolgte durch eine Recherche nach relevanter Fachliteratur. Systematisch über etablierte wissenschaftliche Datenbanken wie Google Scholar, Nautos, ScienceDirect und Semantic Scholar. Hierbei lag der Fokus auf Publikationen zu Sicherheitsrisiken von Lithium-Ionen-Batterien und Studien zu Löschmethoden von Lithium-Ionen-Batterien (Lee and Sener, 2023).

Zur Identifikation weiterer relevanter Arbeiten wurde ergänzend die Schneeballmethode angewendet, bei der aus den Literaturverzeichnissen der relevanten Quellen weitere Arbeiten abgeleitet wurden (Naderifar, Goli and Ghaljaie, 2017). Ebenso wurde das Recherchetool Connected Papers genutzt, um weitere Quellen zu finden. Die Auswahl der Literatur orientierte sich an den Kriterien Aktualität, fachliche Relevanz und Autorität der jeweiligen Quelle.

Die aus den Quellen gewonnenen Informationen wurden in Tabellenform extrahiert und gegenübergestellt. Die Tabelle 2 umfasst folgende Reiter:

- Löschmittel/-methode
- Wirkungsweise
- Vorteile
- Nachteile
- Relevante Studie

Durch diese strukturierte Analyse konnten Unterschiede, bestehende Defizite sowie innovative Ansätze im Bereich der Brandbekämpfung von LIB-Bränden identifiziert werden. Analog zur ersten Tabelle wurden auch hier gezielte Verbesserungsvorschläge für die Entwicklung des Feuerwehr-Dokuments (Anhang: Taschenkarte) abgeleitet.

III. Auswertung dokumentierter Einsatzberichte

Zur fundierten Analyse der Einsatztaktik bei Bränden von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in Elektrokleinstfahrzeugen (eKF) wurde eine systematische Auswertung von dokumentierten realen Einsatzberichten durchgeführt. Dazu wurden gezielt zehn reale Einsätze ausgewählt, die unterschiedliche Szenarien, Fahrzeugtypen und Einsatzbedingungen abdecken.

Die Auswahl der Einsätze erfolgte auf Basis folgender Kriterien:

- Relevanz für das Thema LIB-Brände bei eKF
- Dokumentierte taktische Maßnahmen und Herausforderungen
- Unterschiedliche Einsatzumgebungen (z. B. Treppenhaus, Keller, Wohnung)

Zur strukturierten Auswertung wurde die Analyse-Tabelle 3 erstellt, in der jeder Einsatz anhand folgender Reiter systematisch untersucht wurde:

- **Datum & Ort:** Zeitliche und räumliche Einordnung des Einsatzes.
- **Brandverlauf:** Beschreibung des Ablaufs, inklusive Art der Brandentwicklung und Ausbreitung.
- **Einsatztaktik:** Darstellung der eingesetzten taktischen Maßnahmen (z. B. Löschmittelwahl, Räumung, Absicherung).
- **Besondere Herausforderungen:** Erfassung außergewöhnlicher Einsatzbedingungen (z. B. Explosionsgefahr, eingeschränkter Zugang).
- **Auswirkungen:** Ermittlung von Personen-, Sachschäden sowie besonderen Folgen für Einsatzkräfte oder Umfeld.

- **Bewertung / Nachbereitung:** Einschätzung des Einsatzerfolgs und gegebenenfalls durchgeführte Nachsorge- oder Verbesserungsmaßnahmen.
- **Quellen:** Dokumentation der verwendeten Berichte oder Pressemitteilungen.
- **Warum ausgewählt:** Kurze Begründung, warum der jeweilige Einsatz für die Untersuchung relevant ist.

Durch diese strukturierte Auswertung konnten wiederkehrende Muster, erfolgreiche Taktiken sowie bestehende Defizite identifiziert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse bildeten eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung der Handlungsempfehlungen im Rahmen des Feuerwehr-Dokuments (Anhang: Taschenkarte).

3. Darstellung der Ergebnisse mit Diskussion

Auf Grundlage der beschriebenen Methoden werden im Folgenden die Ergebnisse der Analyse präsentiert und diskutiert.

3.1 Analyse der Feuerweherschul-Praxis

Die Verbesserung der Einsatztaktik setzt eine fundierte Ausbildung der Einsatzkräfte voraus. Die in Tabelle 1 präsentierte Übersicht gibt Aufschluss über die gegenwärtigen Lehrmethoden und Ausbildungsinhalte an diversen Feuerweherschulen in Deutschland hinsichtlich Bränden von LIB.

Tabelle 1: Lehrmethoden zu LIB-Bränden an Feuerwehrsulen

Feuerwehrsule	Themen / Materialien zu LIB-Bränden (allgemein & eKF)	Besondere Inhalte / Schwerpunkte	Quelle
SFS Bayern	Brandbekämpfung bei Lithium-Ionen-Akkus, Temperaturmessprotokoll Lithium-Ionen-Akkus, Einsatz an stationären Lithium-Solarstromspeichern, Hybrid- und Elektroantrieb	LIB in eKF, E-Bikes, Geräten; Thermisches Durchgehen; Einsatzgrundsätze; Batteriebrand-Container	Antwort auf Mail, mit Verweis auf Lehrunterlagen über Webseite
LFS Baden-Württemberg	Brandbekämpfung bei Lithium-Ionen-Akkus in Fahrzeugen, Forschungsbericht zur Löschmitteleinbringung in Hochvoltpeicher, Technische – medizinische Rettung nach Verkehrsunfällen	Sicherheitshinweise zu Einsätzen in Verbindung mit LIB, Fokus auf e-Fahrzeuge und Unfällen im Straßenverkehr, grundlegenden Gefahren eines LIB-Brandes (thermischer Durchgang, Freisetzung toxischer Gase, Brandrisiko)	Antwort auf Mail, Zusammenstellung von Lehrunterlagen als PDF
LFS Hessen	Handreichungen zum Thema e-Mobilität, Lehrunterlage "Einsatzhinweise E-Fahrzeuge"	Fokus auf e-Fahrzeuge, Kurzhinweise zu verschiedenen Fahrzeugtypen (auch eKF)	Antwort auf Mail, Zusammenstellung von Lehrunterlagen als PDF, Verweis auf externe Firma und Infos der DGUV
LFS Nordrhein-Westfalen	Materialien zu Bränden von Akkus in Heimspeichern, eKF und Werkzeugen	Kurz vor dem Brand: Gefahr durch freigesetzte Gase (H ₂ , CO) Explosionsgefahr in geschlossenen Räumen, nach Brandausbruch entzünden sich Gase sofort	Antwort auf Mail
LFS Sachsen	Ausbildung E Mobilität die bundesweit abgestimmte Lehrunterlage „Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Lös- und Rettungsarbeiten an Kraftfahrzeugen mit Hochvoltpeicher“	derzeit keine weiterführenden Unterlagen	Antwort auf Mail
LFS Rheinland-Pfalz	LIB werden ganz herkömmlich mit Wasser gelöscht (gekühlt), somit keine Besonderheit für die Feuerwehr	Fokus auf LIB im Rettungseinsatz, Gefahrenerkennung	Antwort auf Mail
LFS Thüringen	Fokus auf ePKW	33.000 Ehrenamtliche, 1.000 Hauptamtliche Zeitverzug durch Alarmierungsablauf LIB-Brände entwickeln schnell hohe Intensität, Akkubrände oft erst als Zimmerbrand erkannt, Fokus bei Ankunft meist auf Zimmerbrand, nicht Akku	Antwort auf Mail
LFS Saarland	verfügt weder über Lehrunterlagen noch über Fachempfehlungen zum einsatztaktischen Vorgehen von Lithium-Ionen-Akku-Bränden von elektronischen Kleinstfahrzeugen in privaten Wohngebäuden		Antwort auf Mail

Aus der Analyse der Ausbildungsinhalte lassen sich folgende zentrale Erkenntnisse ableiten:

Uneinheitlichkeit der Ausbildungsinhalte: Einige Feuerwehrschulen, wie die SFS Bayern oder die LFS Baden-Württemberg, verfügen über spezifische Ausbildungsinhalte zu LIB-Bränden und E-Kleinstfahrzeugen. In anderen Bundesländern hingegen existieren keine systematischen Lehransätze.

Fokus auf Fahrzeugbrände: Viele Ausbildungen beziehen sich vorrangig auf den Brand von Elektrofahrzeugen (PKW) und weniger auf eKF oder Brände in privaten Wohngebäuden.

Fehlende einsatznahe Szenarien: In der vorliegenden Untersuchung wurde festgestellt, dass realistische, an LIB-Brände angepasste Einsatzszenarien lediglich in vereinzelt Fällen behandelt werden. Aspekte wie die toxische Gasfreisetzung, Explosionsgefahren und die hohe Wiederentzündungsgefahr sind jedoch nicht flächendeckend integriert.

Mangelnde Spezialisierung: Teilweise wird die Lithium-Ionen-Technologie noch nicht als besondere Herausforderung dargestellt (z. B. Rheinland-Pfalz), was zu einer Unterschätzung des Gefahrenpotenzials führen könnte.

Das Fazit, das aus den vorliegenden Erkenntnissen gezogen werden kann, besagt, dass die gegenwärtige Ausbildung eine erste Grundlage bildet, jedoch signifikante Lücken aufweist. In Bezug auf LIB-Brände in eKF und in privaten Wohngebäuden ist festzustellen, dass eine einsatzspezifische, praxisnahe Vorbereitung häufig nicht gegeben ist.

3.2 Bewertung von Löschmethoden aus der Wissenschaft

Neben der Ausbildung der Feuerwehkräfte ist das Wissen über geeignete Löschmethoden von entscheidender Bedeutung. In der vorliegenden Arbeit werden die in der Wissenschaft derzeit diskutierten Löschmittel und -methoden sowie deren jeweilige Vor- und Nachteile in tabellarischer Form gegenübergestellt (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zu Löschmethoden bei LIB-Bränden

Löschmittel/-methode	Wirkungsweise	Vorteile	Nachteile
Gasförmige Löschmittel	Unterbrechen chemischer Reaktionen, Reduktion von Sauerstoff	Keine Rückstände, geeignet für empfindliche Elektronik	Geringe Kühlwirkung, Gefahr der Wiederentzündung
Feste Löschmittel (Trockenpulver)	Ersticken und chemische Inhibition durch Radikalfänger Kühlung nur teils belegt	Schnelle Anwendung Nicht leitfähig (nicht belegt) Erschwinglich, breit verfügbar (nicht bestätigt)	Geringe Kühlleistung Wiederentzündung möglich Rückstände (impliziert leitfähig) Verunreinigung des Schutzbereichs
Wasserbasierte Löschmittel	Kühlung und Isolation bestätigt Additive reduzieren TR-Gase	Hohe Kühlleistung Additive reduzieren toxische Gase Umweltfreundlich, kostengünstig (implizit)	Elektrische Leitfähigkeit (nicht explizit) HF-Erhöhung bei Zusätzen Wiederanstieg der Temperatur nach Verdampfung
Aerosole	Chemische Inhibition durch Reaktion mit Flammenradikalen	Schnelle Verteilung Für geschlossene Räume geeignet Geringe Toxizität, Umweltwirkung, Rückstände (nicht durchgehend belegt)	Geringe Kühlung Korrosive Rückstände (nicht belegt) Mögliche Wiederentzündung (nicht hervorgehoben)
Innovative Strategien (z.B. Mikrokapseln, intermittierendes Sprühen)	Frühzeitige Brandunterdrückung Gezielte Kühlung nicht detailliert belegt	Potenzial für Prävention Gezielte Effizienz (nicht direkt belegt)	Noch in Entwicklung Einfluss auf Batterieleistung und komplexe Steuerung nicht behandelt

Die Analyse der Löschmethoden ergibt:

Gasförmige Löschmittel vermögen chemische Reaktionen zu unterbrechen, weisen jedoch eine nur geringe Kühlleistung auf und bergen das Risiko der Wiederentzündung.

Feste Löschmittel, wie etwa Trockenpulver, stellen eine effektive Erstmaßnahme dar, jedoch ist ihre Kühlwirkung begrenzt und es können Rückstände zurückbleiben, die potenziell problematisch für elektronische Komponenten sein können.

Wasserbasierte Löschmittel werden derzeit als effektivste Methode zur Kühlung und Eindämmung des TR angesehen. Allerdings besteht in diesem Zusammenhang potenzielle die Gefahr der elektrischen Leitfähigkeit.

Aerosole und innovative Ansätze, wie beispielsweise Mikrokapseln, könnten ein interessantes Potenzial bieten. Allerdings mangelt es an ausreichender Praxisbewährung und Untersuchung dieser Ansätze.

Bewertung

Die wissenschaftliche Literatur zeigt, dass es nicht das eine ideale Löschmittel für alle LIB-Brandszenarien gibt. Die Auswahl muss stets im Kontext der spezifischen Einsatzumgebung, Zellchemie, Modulbauweise und Energiedichte getroffen werden. Wasserbasierte Systeme bieten derzeit das größte Potenzial zur nachhaltigen Bekämpfung von LIB-Bränden, insbesondere wenn sie mit anderen Mitteln kombiniert oder durch innovative Technologien unterstützt werden.

3.3 Analyse realer Einsätze bei LIB-Bränden

Die Entwicklung robuster Taktiken erfordert eine systematische Auswertung realer Einsatzerfahrungen. In Kapitel 2.1 wurden verschiedene Einsatzberichte zu LIB-Bränden ausgeführt. Die in Tabelle 3 dargestellte Analyse bildet eine Grundlage für die Ableitung einsatztaktischer Maßnahmen.

Tabelle 3: Zusammenfassung ausgewählter realer Einsätze mit LIB-Bränden

Nr.	Datum & Ort	Brandverlauf	Einsatztaktik	Besondere Herausforderungen	Auswirkungen	Bewertung / Nachbereitung
1	21.05.2024, Berlin-Lichtenberg	Defekter E-Bike-Akku entzündet sich in einer Wohnung, breitet sich schnell aus	Schnelle Evakuierung, Feuerwehr mit 66 Kräften bringt Brand unter Kontrolle	Schnelle Evakuierung, Brand verbreitete sich rasch, keine Verletzten	Wohnung unbewohnbar	Brandursache geklärt, schnelle Reaktion der Feuerwehr
2	07.04.2024, Traunstein, (Wohnhaus)	E-Bike-Akku fällt aus dem 4. Stock und entzündet sich im Erdgeschoss	Einsatz von Drehleitern, Rettung von 7 Personen, Gebäudeevakuierung	Starke Rauchentwicklung im Treppenhaus,	Fünf Verletzte, Sachschaden ca. 5.000 €	Brandursache noch unklar, schnelle Rettung erfolgreich
3	27.09.2023, Gevelsberg, (Wohnhaus)	E-Bike-Akku entzündet sich während des Ladevorgangs, Brandursache unklar	Brandbekämpfung durch 54 Feuerwehrkräfte	Starke Rauchentwicklung und Rußablagerungen	Wohnung unbewohnbar, Sachschaden ca. 5.000 €	Bewohner wurden zur Kontrolle ins Krankenhaus gebracht, keine Verletzten
4	31.05.2024, Uelzen (Wohnhaus)	E-Bike-Akku entzündet sich auf Terrasse einer Erdgeschosswohnung	Brandbekämpfung mit Kleinlöschgerät, Akku in Wasserbad gelöscht	Starke Rauchentwicklung, Keine Verletzten	Schäden an Wohnung und Keller, keine Verletzten	Schnelle Reaktion der Feuerwehr, Brandursache nicht angegeben
5	20.02.2025, Essen	Defekter Lithium-Ionen-Akku verursacht Brand und starke Rauchentwicklung	Einsatz von 2 Löschzügen zur Bekämpfung des Feuers, Rettung eines Ehepaars	Starke Rauchentwicklung im Treppenhaus, Rettung durch Leiter	Schaden durch Rauch, ein Ehepaar gerettet, keine weiteren Verletzten	Brandursache noch unklar, Feuerwehr gab Entwarnung
6	04.09.2024, Aschaffenburg / Goldbach, (Kellerbrand)	10 Lithium-Ionen-Akkus entzündeten sich in einem Keller	39 Feuerwehrkräfte bringen das Feuer nach 45 Minuten unter Kontrolle	Dichter Rauch, verzögerte Löscharbeiten wegen schwerer Rauchbelastung	Kein verletzter Anwohner, Sachschaden durch Rauch	Brandursache untersucht, keine Verletzten
7	Nacht zum 28.03.2022, Hamburg, Bürgerweide	Akku eines E-Scooters am Ladegerät löst Brand aus Brand in Erdgeschoss-Wohngemeinschaft Feuer schlug schnell aus dem Fenster, rasche Ausbreitung von dichtem Qualm, Fluchtwege wurden versperrt	Rettung von ca. 17 Personen, teils mit Dreh- und Steckleitern Mehr als 50 Einsatzkräfte beteiligt	Schnelle Rauchausbreitung und versperrte Fluchtwege	Zwei Personen mit Verdacht auf Rauchgasinhalation in ein Krankenhaus gebracht	Keine spezifische Bewertung oder Nachbereitung in der Quelle genannt
8	22. Februar 2025, Abstatt, Birkenweg	Akkus brannten im Ladegerät im Keller, Bewohner löschte Brand vor Eintreffen der Feuerwehr, Bewohner hustete und war voller Ruß, starke Verrauchung im Keller, keine Glutnester mehr sichtbar mit Wärmebildkamera	Kontrolle und Nachlöscharbeiten unter Atemschutz mit Kübelspritze und Wärmebildkamera, Entfernung der Akkus samt Ladegerät mit einer Schuttmulde, ausgiebige Belüftungsmaßnahmen, Versorgung und Untersuchung des Patienten vor Ort und durch Feuerwehr, Übergabe an Regelrettungsdienst und Transport ins Krankenhaus Anforderung eines Fachberaters Elektromobilität	Massive Verrauchung im Keller, fachgerechte Lagerung der Akkus erforderlich, weiteres Vorgehen muss abgeklärt werden, Minimierung des Kontakts der Bewohner mit Brandrückständen	Bewohner hustete und war verußt, wurde ins Krankenhaus gebracht Akkus und Ladegerät zerstört Regalbreiter demontiert	Akkus fachgerecht in speziellem Transportbehälter durch Fachberater gelagert, Müllentsorgung in Müllsäcken. Bewohnerin über weiteres Vorgehen und Entsorgung der Akkus informiert, Akkus in Leingarten entsorgt, Transportbox zurückgegeben, Hinweise zur sicheren Reinigung der Brandrückstände gegeben Kontaminierte Einsatzkleidung abgelegt
9	10.09.2024, Karlstain am Main, Zeche Gustav	Brand mehrerer Paletten mit LIB auf Lagerplatz eines Batterieherstellers. Hohe Rauchsäulen zu Beginn sichtbar, wiederkehrende Selbstentzündung der Akkus	Offenes Feuer schnell unter Kontrolle, intensive Löscharbeiten ca. sechs Stunden, Einsatz eines großen, mit Wasser gefüllten Containers zur endgültigen Brandbekämpfung und Abkühlung der glimmenden Batterien	Immer wiederkehrende Selbstentzündung der Akkus erforderte lange Löscharbeiten. Einsatz großer Mengen Wasser notwendig.	Ein Feuerwehrmann erlitt leichte Verletzungen und wurde ins Krankenhaus gebracht. Sachschaden im niedrigen fünfstelligen Bereich	Polizei Alzenau hat den Brandfall aufgenommen. Polizei geht von einer Selbstentzündung der Akkus aus, Ursache wird ermittelt.
10	11.05.2024, Aalen Aspach, Wüsten Bacher Weg	Explosion eines Akkus im Ladegerät im Keller eines Wohnhauses. Feuer verursachte größere Brandschäden im Kellerraum	Löscharbeiten durch die Feuerwehr.	Starke Rußbildung	Sachschaden etwa 100.000 €, Wohnhaus derzeit unbewohnbar. Ein Feuerwehrmann erlitt leichte Brandverletzungen	Keine spezifische Bewertung oder Nachbereitung in der Quelle genannt.

Die Auswertung der Einsätze ergibt folgende wiederkehrende Probleme und Herausforderungen:

Dynamik des Brandverlaufs: Die Analyse zeigt, dass der Übergang vom thermischen Durchgehen zum Vollbrand oft sehr schnell erfolgt. Dies lässt nur wenig Zeit für eine Brandbekämpfung im Entstehungsstadium.

Freisetzung toxischer und explosiver Gase: Insbesondere in geschlossenen Räumen kann sich eine explosionsfähige Atmosphäre entwickeln.

Erhöhte Wiederentzündungsgefahr: Auch nach scheinbarer Ablöschung bleibt über Stunden bis Tage ein Risiko der Wiederzündung bestehen.

Schwierigkeiten bei der Lokalisierung des Brandherdes: Akkus können sich in schwer zugänglichen Bereichen befinden, was eine gezielte Brandbekämpfung erschwert.

Einsatztaktische Empfehlungen aus den Einsatzberichten:

Frühe Temperaturüberwachung (z. B. mit Wärmebildkamera) zur frühzeitigen Erkennung von kritischen Entwicklungen.

Vorrangige Kühlung beachten verdächtiger Akku-Bereiche zur Verzögerung oder Verhinderung des thermischen Durchgehens.

Kontrolliertes Ablöschen und intensive Nachkontrolle auch nach erster Brandbekämpfung, um Wiederentzündungen zu verhindern.

Abschirmung und Sicherung des Einsatzortes, insbesondere bei drohender Explosion.

Bereitstellung spezieller Containment-Systeme (z. B. Batteriebrand-Container) zur Isolation beschädigter Akkus.

Zusammenfassung und Ausblick

Die simultane Analyse der Lehrmethoden, der wissenschaftlichen Löschmethoden und der realen Einsatzerfahrungen zeigt eindeutig, dass die bestehenden Ausbildungsansätze und Löschrstrategien nicht ausreichend sind, um die zunehmenden Anforderungen bei LIB-Bränden in eKF vollständig zu erfüllen. Es besteht dringender Bedarf nach einer systematisch entwickelten, einsatznahen und wissenschaftlich fundierten Einsatztaktik.

Im nächsten Kapitel erfolgt daher auf Basis dieser Erkenntnisse die Entwicklung eines Praxisorientierten Feuerwehr-Dokuments (Anhang: Taschenkarte) mit konkreten Empfehlungen zur Einsatztaktik bei LIB-Bränden bei eKF.

4. Diskussion & PFD-Entwicklung

4.1 Entwicklung des Praxisorientierten Feuerwehr-Dokuments (PFD)

Basierend auf den in Kapitel 3 dargestellten Analysen zu bestehenden Lehrmethoden, wissenschaftlichen Löschanätzen und Erfahrungen aus realen Einsatzsituationen wurde ein praxisorientiertes Feuerwehr-Dokument (PFD) entwickelt. Ziel dieses Dokuments ist es, den Einsatzkräften eine strukturierte, wissenschaftlich fundierte Handlungshilfe zur Verfügung zu stellen, die eine effiziente und sichere Anwendung bei Bränden von LIB in eKF ermöglicht.

Tabelle 4: Schlüsselerkenntnisse der Auswertungstabellen

Erkenntnisquelle	Zentrale Ableitungen für das PFD
Lehrunterlagen der LFS	Starke Fokussierung auf Fahrzeugbrände, kaum Fokus auf eKF; große regionale Unterschiede; Notwendigkeit einer gezielten Ergänzung um eKF-spezifische Taktiken
Wissenschaftliche Studien	Wasserbasierte Löschmittel bleiben Mittel der Wahl; andere Löschmittel ergänzend nur bei spezifischem Vorteil
Realereignisse / Einsätze	Hohe Bedeutung von frühzeitiger Kühlung und großzügiger Gefahrenabspernung; Risiko von Wiederentzündungen erfordert lang andauernde Überwachung.

Das PFD berücksichtigt alle relevanten Einsatzphasen, von der Lageerkundung und Gefahreinschätzung bis hin zur Nachsorge und dem Schutz der Einsatzkräfte. Es integriert aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse und bewährte Löschmethoden, wobei der Fokus auf praxisnahen Handlungsschritten liegt. Ein besonderer Schwerpunkt wurde auf die frühe Identifikation von LIB-Bränden, die effektive Gefahrenabsicherung und die nachhaltige Kühlung nach dem Brand gelegt. Darüber hinaus werden häufige Herausforderungen und Risiken, wie die Gefahr von Wiederentzündungen und toxischer Gasfreisetzung, thematisiert.

Das vollständige Praxisdokument ist in Anlage 1 dieser Arbeit enthalten. Es stellt eine kompakte und praxisorientierte Leitlinie dar, die auf die speziellen Anforderungen bei Bränden von eKF mit LIB-Batterien abgestimmt ist.

5. Fazit und Ausblick

5.1 Zentrale Erkenntnisse

Im Verlauf der Untersuchung wurde deutlich, dass die Feuerwehr-Ausbildung und die bestehenden Löschrategien bei Bränden von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in elektronischen Kleinstfahrzeugen (eKF) noch nicht ausreichend auf die spezifischen Herausforderungen dieser Brände ausgerichtet sind. Die Analyse der aktuellen Lehrmethoden, wissenschaftlicher Studien und realer Einsatzerfahrungen zeigte, dass die herkömmlichen Ansätze zu Fahrzeugbränden nur bedingt auf die Besonderheiten von eKF-Bränden übertragbar sind.

5.2 Kritische Reflexion und Grenzen der Arbeit

Diese Arbeit hat sich mit den Auswirkungen von LIB-Bränden in eKF auf die Feuerwehr-Einsatztaktik auseinandergesetzt und praktische Empfehlungen zur Verbesserung der Ausbildung und Einsatzstrategien gegeben. Jedoch gibt es einige Einschränkungen:

- **Begrenzte Datenlage:** Viele der Untersuchungen und Erfahrungen, die in dieser Arbeit verwendet wurden, beruhen auf bestehenden Literaturquellen und dokumentierten Einsätzen. Eine breitere Datenbasis aus zukünftigen Einsatzberichten der Feuerwehren und praxisorientierten Studien wäre wünschenswert, um die Taktiken noch gezielter zu verfeinern. Auch eine Vollständige Rückmeldung der Feuerwehren mit den entsprechenden Lehrunterlagen würde helfen, ein umfangreicheres Bild zu erhalten.
- **Forschungslücke bei innovativen Löschmethoden:** Obwohl aktuelle wissenschaftliche Studien wichtige Informationen zu Löschmethoden bieten, wird kontinuierlich in dem Bereich weiter geforscht, das für dieses Thema mit steigender Anzahl an eKF immer wichtiger wird. Es bleibt abzuwarten, inwiefern Technologien wie Aerosole oder andere nicht-wasserbasierte Löschmittel in der Praxis anwendbar sind.

- **Begrenzte Erfahrungswerte:** Die in der vorliegenden Arbeit dargestellten realen Einsatzfälle sind hinsichtlich ihrer Dokumentation begrenzt. Die Generierung weiterer empirischer Evidenz aus spezifischen deutschen Städten oder Regionen könnte zu einer Präzisierung und Optimierung der Taktiken beitragen. Des Weiteren ist eine bundesweite Erfassung der Einsätze erforderlich.

5.3 Ausblick: Forschungsbedarf und mögliche Weiterentwicklungen

Die Forschung zu LIB-Bränden in eKF steht noch am Anfang, und es gibt weiterhin zahlreiche offene Fragen. Insbesondere im Bereich der praktischen Testung von Löschmethoden und -techniken sowie der Ausbildungskonzepte für Feuerwehrkräfte besteht ein erheblicher Bedarf. Zukünftige Forschung könnte sich auf folgende Bereiche konzentrieren:

1. **Langfristige Studien zu Löschmethoden:** Es fehlen umfassende Untersuchungen zu den Langzeitwirkungen von verschiedenen Löschmethoden, insbesondere in Bezug auf Wiederentzündungen und die Risiken durch toxische Gasfreisetzungen. Hier könnten Tests mit realen Fahrzeugbränden in kontrollierten Umfeldern wertvolle Erkenntnisse liefern.
2. **Integration innovativer Technologien:** Die Entwicklung und Erprobung neuer Löschtechnologien, wie etwa Aerosole oder Gase, die speziell auf LIB-Brände zugeschnitten sind, sollte vorangetrieben werden. Diese Technologien könnten in bestimmten Einsatzszenarien eine wertvolle Ergänzung zu herkömmlichen Löschmethoden darstellen.
3. **Erweiterte Ausbildungsprogramme:** Die Feuerwehr-Ausbildung muss auf die spezifischen Herausforderungen von eKF-Bränden eingehen. Hierzu gehört eine verstärkte Einbindung von praktischen Übungen, die auf die Brandbekämpfung von eKF ausgelegt sind, sowie eine tiefere Schulung zur sicheren Handhabung von LIB.

4. **Interdisziplinäre Zusammenarbeit:** Um eine umfassende Lösung für die Herausforderungen von eKF-Bränden zu entwickeln, ist eine engere Zusammenarbeit zwischen Feuerwehr, Wissenschaft und Industrie notwendig. Dies könnte zu innovativen Lösungsansätzen führen, die sowohl die Sicherheit der Einsatzkräfte als auch die Effizienz der Brandbekämpfung verbessern. Ebenso könnte über eine regelmäßige TÜV-Prüfung von eKF nachgedacht werden um defekte LIB frühzeitig zu erkennen und es gar nicht erst zu einem Brand kommen zu lassen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Thema LIB-Brände in eKF eine zunehmende Relevanz für die Feuerwehrpraxis hat und weitere Forschung und Anpassung der Einsatzstrategien notwendig sind, um den Herausforderungen dieser Brandart erfolgreich zu begegnen. Die Entwicklung eines praxisorientierten Feuerwehr-Dokuments (**Anhang: Taschenkarte**), wie in dieser Arbeit beschrieben, stellt einen ersten Schritt in diese Richtung dar und kann als Grundlage für künftige Schulungen und Einsätze dienen.

Quellenverzeichnis

- ADAC Stiftung (2025) 'E-Roller Jugendliche', *ADAC Stiftung*, 8 January. Available at: <https://stiftung.adac.de/e-roller-jugendliche/> (Accessed: 11 May 2025).
- Bai, Z. *et al.* (2025) 'Overview of anti-fire technology for suppressing thermal runaway of lithium battery: Material, performance, and applications', *Journal of Power Sources*, 640, p. 236767. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236767>.
- Buser, D.M. (2016) 'LITHIUMBATTERIEN BRANDGEFAHREN UND SICHERHEITSRISIKEN'.
- Cheng, W., Chiang, J.C.H. and Zhang, D. (2013) 'Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) in CMIP5 Models: RCP and Historical Simulations', *Journal of Climate*, 26(18), pp. 7187–7197. Available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00496.1>.
- DGUV (2020) 'FBFHB-018: Hinweise zum betrieblichen Brandschutz bei der Lagerung und Verwendung von Lithium-Ionen-Akkus'. DGUV.
- DGUV (2024) *Brandschutz beim Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien*. DGUV Information 205-041. Berlin: DGUV. Available at: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/4668>.
- Diehl, K. (2022) *Mehr Gleichberechtigung für die Mobilität der Zukunft*, <https://www.aktion-mensch.de/>. Available at: <https://www.aktion-mensch.de/inklusion/studien/inklusionsbarometer-mobilitaet/katja-diehl-zu-gleichberechtigter-mobilitaet> (Accessed: 12 May 2025).
- DIN (2022) 'DIN EN 62133-2:2022-12 - Sekundärzellen und -batterien mit alkalischen oder anderen nicht-säurehaltigen Elektrolyten - Sicherheitsanforderungen für tragbare gasdichte Sekundärzellen und daraus hergestellte Batterien für die Verwendung in tragbaren Geräten - Teil 2: Lithium-Systeme (IEC 62133-2:2017 + AMD1:2021); Deutsche Fassung EN 62133-2:2017 + A1:2021'.
- DIN (2023) 'DIN VDE V 0510-100:2023-04 - Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien aus dem Fahrzeugbereich für den Einsatz in ortsfesten Anwendungen'.
- DIN (2024a) 'DIN EN 15194:2024-03 - Fahrräder – Elektromotorisch unterstützte Räder – EPAC; Deutsche Fassung EN 15194:2023+A1:2023'.
- DIN (2024b) 'DIN EN IEC 63281-2-1:2024-08 - Elektrokleinstfahrzeuge - Teil 2-1: Sicherheitsanforderungen und Prüfverfahren für Personen-Elektrokleinstfahrzeuge (IEC 63281-2-1:2024); Deutsche Fassung EN IEC 63281-2-1:2024'.
- DLR (2019) *DLR - DLR informiert über Elektro-Tretroller*. Available at: https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2019/02/20190510_dlr-informiert-ueber-elektro-tretroller (Accessed: 16 June 2025).
- Dorrmann, L. (2021) 'Kompendium: Li-Ionen-Batterien'.
- Ehmer, D. (2025) *Akkubrand - Gelöschter Brand / Nachschau*. Available at: <https://www.kfv-heilbronn.de/einsaetze/akkubrand-geloeschter-brand-nachschau> (Accessed: 28 April 2025).
- Europäische Kommission (2009) 'Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. September 2009 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen'.

- Gang, M. (2023) 'Brennender Akku von E-Bike sorgt für Großeinsatz der Feuerwehr', 28 September. Available at: <https://www.wa.de/nordrhein-westfalen/brennender-akku-bike-grosseinsatz-feuerwehr-gevelsberg-nrw-feuer-brand-rettungsdienst-92546894.html> (Accessed: 16 April 2025).
- Gaster, K. and Gehiert, T. (2022) 'Unfallrisiko von Pedelec Fahrer:innen'. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. Unfallforschung der Versicherer. Available at: <https://www.udv.de/udv/themen/unfallrisiko-pedelec-85682> (Accessed: 11 May 2025).
- Hahne, M., Hempel, L. and Pelzer, R. (2020) '(Un-)Sicherheitsgefühle und subjektive Sicherheit im urbanen Raum'. Landeskommision Berlin gegen Gewalt.
- Hertel, P. and Gernitz, T. (2025) *Die Rätsel unserer Vergangenheit: Eine Weltreise auf den Spuren unserer klugen Vorfahren*. BoD – Books on Demand.
- Hochbahn, H. (2023) 'elektrischen Kleinstfahrzeugen in U-Bahn-Fahrzeugen'.
- Höpfner, M. (2024) 'E-Bike-Akku brennt in Uelzen: Einsatz unter schwerem Atemschutz', 31 May. Available at: <https://www.az-online.de/uelzen/stadt-uelzen/bike-akku-brennt-in-uelzen-einsatz-unter-schwerem-atemschutz-93102875.html> (Accessed: 16 April 2025).
- Jarosch, K. (2025) *E-Scooter setzen sich auf Deutschlands Straßen durch*. Available at: <https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/e-scooter-setzen-sich-auf-deutschlands-strassen-durch-185626> (Accessed: 25 March 2025).
- K+W Sicherheitstechnik GmbH (2025) 'Brandgefahr E-Bike-Akku'. Available at: <https://www.kw.de/brandgefahr-e-bike-akku/> (Accessed: 13 March 2025).
- Kreisfeuerwehrverband Aschaffenburg e.V. (2024) 'Goldbach: Kellerbrand durch brennende Lithium-Ionen-Akkus', 4 September. Available at: <https://kfv-ab.de/index.php/news/nachrichten/nachrichten/goldbach-kellerbrand-durch-brennende-lithium-ionen-akkus> (Accessed: 26 March 2025).
- Kunkelmann, J. (2015) 'BRANDSCHUTZ-FORSCHUNG', *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*, Forschungsbericht Nr. 175.
- Kunkelmann, J. (2017) 'BRANDSCHUTZ-FORSCHUNG', *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*, Forschungsbericht Nr. 192.
- Kunkelmann, J. (2021) 'Brandschutztechnische Betrachtungen bei Lithium-Ionen-Batterien u. Lithium-Metall-Batterien', 4 February. Available at: <https://fahrzeugtechnik.fh-joanneum.at/veranstaltungen/2020-2021/2021-03-03.pdf>.
- Lee, K. and Sener, I.N. (2023) 'E-bikes Toward Inclusive Mobility: A Literature Review of Perceptions, Concerns, and Barriers', *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 22, p. 100940. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100940>.
- Leiter der Berufsfeuerwehren und des Deutschen Feuerwehrverbandes (2018) 'Risikoeinschätzung Lithium-Ionen Speichermedien'. DFV. Available at: https://www.feuerwehrverband.de/app/uploads/2020/05/2018-01_Fachempfehlung_Risikoeinschaetzung-Lithium-Ionen-Speichermedien.pdf.
- Linden, D., Beard, K.W. and Reddy, T.B. (eds) (2019) *Linden's handbook of batteries*. Fifth edition. New York: McGraw-Hill.
- Linden's Handbook of Batteries, Fifth Edition von Kirby W. Beard | ISBN 978-1-260-11592-5 | Fachbuch online kaufen - Lehmanns.de* (no date). Available at: <https://www.lehmanns.de/shop/technik/39927207-9781260115925-linden-s-handbook-of-batteries-fifth-edition> (Accessed: 18 March 2025).

- Lithium-Ionen-Akku| Aufbau und Funktion - Einfache Erklärung (Teil1)* (2022). Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=itQfbDKh3IE> (Accessed: 7 May 2025).
- Liu, W. *et al.* (2020) 'Climate impacts of a weakened Atlantic Meridional Overturning Circulation in a warming climate', *Science Advances*, 6(26), p. eaaz4876. Available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz4876>.
- Loxxer (2024) *Loxxer - Lithium-Ionen-Batteriebrände 2024: Die Zahlen Lügen Nicht!*, loxxer. Available at: <https://www.loxxer.com/de/nieuws/lithium-ionen-batteriebrände-2024-die-zahlen-lügen-nicht> (Accessed: 4 April 2025).
- Luo, L. and Chen, G. (2021) 'Research on SOC Estimation of Lithium Battery for Electric Vehicle Based on EKF Algorithm', in *2021 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*. *2021 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pp. 820–823. Available at: <https://doi.org/10.1109/POWERCON53785.2021.9697601>.
- Meng, X. *et al.* (2022) 'Experimental study of intermittent spray cooling on suppression for lithium iron phosphate battery fires', *eTransportation*, 11, p. 100142. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2021.100142>.
- Naderifar, M., Goli, H. and Ghaljaie, F. (2017) 'Snowball Sampling: A Purposeful Method of Sampling in Qualitative Research', *Strides in Development of Medical Education*, 14(3). Available at: <https://doi.org/10.5812/sdme.67670>.
- Polizeipräsidium Aalen (2024) *Explosion eines Akkus: Kellerbrand*, <http://www.feuerwehr.de>. Available at: <http://www.feuerwehr.de/einsatz/berichte/einsatz.php?n=77100> (Accessed: 28 April 2025).
- Polizeipräsidium Unterfranken (2024) *Lithium-Akkus in Brand geraten - Feuerwehr mit Großaufgebot im Einsatz - Ein Feuerwehrmann leicht verletzt*, www.polizei.bayern.de. Available at: <https://www.polizei.bayern.de/aktuelles/pressemitteilungen/072633/index.html> (Accessed: 28 April 2025).
- Radio Essen (2025) 'Kaputter Akku in Essen löst Wohnungsbrand aus', *Radio Essen*, 20 February. Available at: <https://www.radioessen.de/artikel/kaputter-akku-in-essen-loest-wohnungsbrand-aus-2248630.html> (Accessed: 28 April 2025).
- Spiegel Panorama (2024) 'Berlin-Lichtenberg: Wohnung brennt wegen eines kaputten E-Bike-Akkus aus', *Der Spiegel*, 22 May. Available at: <https://www.spiegel.de/panorama/berlin-lichtenberg-wohnung-brennt-wegen-eines-kaputten-e-bike-akkus-aus-a-fa2de0b5-b7f9-448a-85ba-9ba0883224a8> (Accessed: 26 March 2025).
- Statistisches Bundesamt (2021) *Zahl der E-Bikes in Privathaushalten 2021 um 1,2 Millionen gestiegen*, Statistisches Bundesamt. Available at: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2021/PD21_38_p002.html (Accessed: 13 March 2025).
- Taylor, M.J., Fielding, J. and O'Boyle, J. (2024) 'Electrical Home Fire Injuries Analysis', *Fire*, 7(12), p. 471. Available at: <https://doi.org/10.3390/fire7120471>.
- Traunsteiner Tagesblatt (2024) 'Großeinsatz in Traunstein: Akku von E-Bike brannte – Update der Polizei', 7 April. Available at: https://www.traunsteiner-tagblatt.de/region/landkreis-traunstein/traunstein_artikel,-grosseinsatz-in-traunstein-akku-von-ebike-brannte-update-der-polizei-_arid,862741.html (Accessed: 16 April 2025).
- trinasco GmbH (2022) 'Brand in Hamburg durch explodierten E-Scooter-Akku kein Einzelfall » trinasco GmbH', 16 May. Available at: <https://produkt-compliance.de/magazin/brand-in-hamburg-durch-explodierten-e-scooter-akku-kein-einzelfall/> (Accessed: 28 April 2025).

- TÜV-Verband (2025) *Mobilitätsbildung an Schulen: Mehrheit für „E-Scooter-Führerschein“*, VdTÜV. Available at: <https://www.tuev-verband.de/pressemitteilungen/mobilitaetsbildung-an-schulen-mehrheit-fuer-e-scooter-fuehrerschein> (Accessed: 12 May 2025).
- Varró, T. (2024) 'The Effects of Storing Electric Scooters and Bicycles in Office Buildings on Fire Safety', *Hadmérnök*, 19(3), pp. 225–239. Available at: <https://doi.org/10.32567/hm.2024.3.14>.
- Wang, C. *et al.* (2014) 'A global perspective on CMIP5 climate model biases', *Nature Climate Change*, 4(3), pp. 201–205. Available at: <https://doi.org/10.1038/nclimate2118>.
- Xu, R. *et al.* (2020) *Wildfires, Global Climate Change, and Human Health* | 10.1056/NEJMSr2028985. Available at: <https://sci-hub.53yu.com/10.1056/NEJMSr2028985> (Accessed: 28 May 2024).
- Yang, H. *et al.* (2018) *A common antimicrobial additive increases colonic inflammation and colitis-associated colon tumorigenesis in mice* | *Science Translational Medicine*. Available at: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/scitranslmed.aan4116> (Accessed: 25 July 2023).
- Yuan, S. *et al.* (2021) 'A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire', *Journal of Energy Chemistry*, 62, pp. 262–280. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.03.031>.
- Zhang, L. *et al.* (2024) 'A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire', *Fire Technology*, 60(2), pp. 817–858. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01278-3>.
- Zhang, W. *et al.* (2021) 'Fabrication of a microcapsule extinguishing agent with a core–shell structure for lithium-ion battery fire safety', *Materials Advances*, 2(14), pp. 4634–4642. Available at: <https://doi.org/10.1039/D1MA00343G>.
- ZIV (2023) *ZIV-Marktdaten Fahrräder und E-Bikes 2023: Die Zahlen im Detail*. Available at: <https://www.ziv-zweirad.de/ziv-marktdaten-fahrraeder-und-e-bikes-2023-die-zahlen-im-detail/> (Accessed: 12 March 2025).
- ZIV (2025) *Marktdaten Fahrräder und E-Bikes 2024: Zahlen, Analysen und Prognosen*. Berlin: ZIV – Zweirad-Industrie-Verband. Available at: <https://www.ziv-zweirad.de/wp-content/uploads/2025/03/ZIV-Marktdatenpraesentation-2025-fuer-GJ-2024.pdf> (Accessed: 12 March 2025).

2. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Felix Suarez Bergmann, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit zum Thema „Lithium-Ionen-Akku-Brände in elektronischen Kleinstfahrzeugen Entwicklung von Einsatztaktiken für Feuerwehren“ ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt haben. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angaben der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den 26. Juni 2025

Felix Suarez Bergmann

3. Anhang: Taschenkarte

Einsatztaktik bei LIB-Bränden von eKF



Gefahren

- Hohe Energie → Intensive Brände
- Thermisches Durchgehen → Brandausbreitung, Explosionen
- Toxische Gase → Lebensgefahr (HF, CO etc.)
- Wiederentflammen → Stunden später möglich!



Schutzausrüstung

- Persönliche Schutzausrüstung (PSA)
- Umluft unabhängigem Atemschutz



Erkundung

- Fahrzeugtyp: E-Roller, Pedelec, E-Bike, Hoverboard?
- Brandort: Wohnung, Keller, Garage?
- Sichtbare Rauch-/Flammenentwicklung?
- Gefahrenbereich großzügig absperren!



Brandbekämpfung

Löschmittel:

- Wasser (große Menge!) → Kühlen
- Schaum! → Geringe Kühlwirkung, Rückzündungsgefahr
- Kein Trockenpulver! → Geringe Kühlwirkung, Rückzündungsgefahr

Taktik:

- Sicherheitsabstand beachten
- Akku gezielt und dauerhaft kühlen
- Umgebung mitkühlen
- Bereitstellung spezieller Containment-Systeme (z.B. Batteriebrand-Container)
- Bei Thermal Runaway → Rückzug, Schutz der Umgebung
- Wiederausbrände einkalkulieren

Einsatztaktik bei LIB-Bränden von eKF



Bergung

- Nur nach Abkühlung und ohne sichtbare Reaktion
- Lagerung in Wasserbad oder spezieller Quarantänebox



Entrauchung

- Rauch enthält hochtoxische Substanzen (z. B. HF)
- Effektive Belüftung nur nach Gefährdungsbeurteilung
- Überdruckbelüftung mit Bedacht



Besondere Hinweise

- Brände oft beim Laden
- Hohe Gefährdung in geschlossenen Räumen
- Vorsicht bei beschädigten oder manipulierten Akkus!



Normen

- eKFV (Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung)
- DIN EN 15194 (EXPACs)
- DIN EN IEC 63281 (LIB in eKF)
- FwDV 1/3, GAMS-Regel

Ziel: Einsatzkräfte sicher, schnell und effektiv bei LIB-Bränden von eKF schützen und Brände effizient bekämpfen.

Hinweis: Diese Kurzanleitung ersetzt keine Ausbildung! Regelmäßige Übung, Gefahreinschätzung und taktische Schulung sind essenziell.