



Elektromobilität und Tunnelsicherheit – Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände

La mobilité électrique et la sécurité des tunnels routiers – dangers dus aux incendies de véhicules électriques

Electric mobility and road tunnel safety – hazards of electric vehicle fires

Amstein + Walthert Progress AG
Lars Derek Mellert
Urs Welte

Versuchsstollen Hagerbach AG
Michael Hermann
Dr. Michael Kompatscher

Centre d'études des tunnels (CETU)
Dr. Xavier Ponticq
Marc Tesson

Acontec AG
Jürgen Beckbissinger

Forschungsprojekt VSS 2016/221 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Elektromobilität und Tunnelsicherheit – Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände

La mobilité électrique et la sécurité des tunnels routiers – dangers dus aux incendies de véhicules électriques

Electric mobility and road tunnel safety – hazards of electric vehicle fires

Amstein + Walthert Progress AG
Lars Derek Mellert
Urs Welte

Versuchsstollen Hagerbach AG
Michael Hermann
Dr. Michael Kompatscher

Centre d'études des tunnels (CETU)
Dr. Xavier Ponticq
Marc Tesson

Acontec AG
Jürgen Beckbissinger

Forschungsprojekt VSS 2016/221 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Juni 2018

1630

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Lars Derek Mellert (Amstein + Walthert Progress AG)

Mitglieder

Urs Welte (Amstein + Walthert Progress AG)
Dr. Michael Kompatscher (Versuchsstollen Hagerbach AG)
Michael Hermann (Versuchsstollen Hagerbach AG)
Dr. Xavier Ponticq (Centre d'études des tunnels)
Marc Tesson (Centre d'études des tunnels)
Jürgen Beckbissinger (Acontec AG)

Federführende Fachkommission

Fachkommission 2: Projektierung

Begleitkommission

Präsident

Dr. Arnd Rogner (Securiton)

Mitglieder

Christoph Lehmann (HDZ)
Benoît Stempfeli (Lombardi)
Kurt Bopp (Schutz & Rettung Zürich)
Michael Derungs (Schutz & Rettung Zürich)
Markus Eisenlohr (ASTRA)
Dr. Andrea Vezzini (Berner Fachhochschule)
Urs Steinemann (US + FZ Beratende Ingenieure)

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung	13
1.1 Elektromobilität in der Schweiz: heute und morgen.....	13
1.2 Ziele und Hypothese des Projekts	14
1.3 Aufbau des Berichts	17
2 Grundlagen	19
2.1 Elektrofahrzeuge	19
2.1.1 Energiespeicherung	19
2.1.2 Potentielle Brandgefährdungen.....	23
2.2 Tunnelsicherheit.....	26
2.2.1 Richtlinien und Normen.....	26
2.2.2 Massnahmen bei Elektrofahrzeugbränden	26
3 Methodik	29
3.1 Versuchsmaterial	30
3.2 Messkonzept	31
3.3 Versuchsszenarien.....	34
3.3.1 Mechanische Beschädigung	34
3.3.2 Thermische Beschädigung.....	36
3.4 Versuchsaufbau	37
3.4.1 Versuchsraum	37
3.4.2 Sicherheit und Umwelt	39
4 Resultate	41
4.1 Keilförmige Penetration.....	44
4.2 Stumpfer Schlag.....	46
4.3 Zentraler Durchschuss	48
4.4 Thermische Beanspruchung	51
5 Diskussion	55
5.1 Veränderung der Gefährdungssituation	55
5.2 Auswirkungen auf den Tunnelbetrieb	60
5.3 Auswirkungen auf die Ereignisbewältigung	61
6 Ausblick	65
6.1 Weiterer Forschungsbedarf.....	65
6.2 Mögliche Sofortmassnahmen.....	68
Anhänge	69
Glossar	89
Literaturverzeichnis	91
Projektabschluss	97
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	101

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie belegt, dass starke mechanische und thermische Beschädigungen von Elektrofahrzeugbatterien augenblicklich zu unkontrollierbaren Bränden mit hoher Energieentfaltung, starker Rauchentwicklung sowie neuen Schadstoffemissionen führen können. Insgesamt betrachtet, wird die zunehmende Elektromobilität nicht zu einer Verschlechterung der Tunnelsicherheit führen; in bestimmten Aspekten wird sie aber die Gefährdungssituation in Strassentunneln verändern und insbesondere Auswirkungen auf die Ereignisbewältigung haben.

Die Erkenntnisse wurden experimentell mit einer systematischen und auf wissenschaftlichen Grundsätzen basierenden Vorgehensweise hergeleitet. Das Experiment wurde in den unterirdischen Anlagen der VersuchsStollen Hagerbach AG durchgeführt, die eine reale Umgebung für Brandversuche mit einem Bezug zu Strassentunneln bieten. Da die Gefährdungen eines Elektrofahrzeugbrandes massgeblich durch die chemische Energiespeicherung beeinflusst werden, wurde der Fokus ausschliesslich auf die Batterie gerichtet: Das Experiment konzentrierte sich auf die maximale Beschädigung einer Lithium-Ionen-Batterie, die in einem rein elektrisch betriebenen und für den Verkehr zugelassenen Fahrzeug verwendet wird (Stand 2017). Es wurden weder Brand- oder Crashtests mit vollständigen Elektrofahrzeugen durchgeführt noch wurden Analysen zur Eintretenswahrscheinlichkeit unternommen.

Mögliche Ursachen für Elektrofahrzeugbrände in Strassentunneln sind mechanische (Bsp. Crash) und thermische (Bsp. Brand) Beschädigungen ihrer Batterien, die in der Folge zu einem thermischen Durchgehen führen können. Es wurden daher vier verschiedene Versuchsszenarien mit gleichzeitiger Beschädigung aller Zellen realisiert: (1) keilförmige Penetration; (2) stumpfer Schlag; (3) zentraler Durchschuss; (4) thermische Beanspruchung. Neben der Erfassung von thermischen und visuellen Parametern konzentrierten sich die Analysen in erster Linie auf Schadstoffemissionen.

Die Hypothese, dass sich die Brandgefährdung in Strassentunneln aufgrund von hochkapazitiven Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen generell erhöhen wird, kann aufgrund der Resultate nicht bestätigt werden. Die Studie kommt zum Schluss, dass die thermischen Brandgefährdungen von Elektrofahrzeugen mit jenen von konventionellen Fahrzeugen vergleichbar sind. In unmittelbarer Nähe und bei ungünstigen Lüftungssituationen führen Elektrofahrzeugbrände hingegen zu neuen und potentiell stärkeren chemischen Gefährdungen. Die Schadstoffanalysen deuten auf kritische Konzentrationen der beiden Schwermetalle Kobalt und Mangan sowie Lithium in Form von Aerosolen hin. Diese Schadstoffe treten bei konventionellen Fahrzeugbränden nicht in solch erhöhten Mengen auf und sind sowohl für Menschen als auch für die Umwelt toxisch. Es wird aber angenommen, dass die bestehenden Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen in Strassentunneln für die Bewältigung dieser neuen Gefährdungen ausreichend sind; es werden deshalb keine technischen Anpassungen empfohlen. Diese Aussage betrifft ausschliesslich Strassentunnel und kann nicht auf andere unterirdische Infrastrukturen (Bsp. Parkhäuser) übertragen werden, die in den zunehmenden Einflussbereich der Elektromobilität gelangen.

Mit den Analysen wurden neue Fragestellungen insbesondere zu den Auswirkungen der veränderten chemischen Gefährdungen aufgeworfen, die in weiteren Schritten vertiefter untersucht werden sollten. In diesem Zusammenhang erscheint die Problematik potentieller Schadstoffkontaminationen durch Schwermetalle und Fluorwasserstoff besonders relevant. Weil diesbezüglich im vorliegenden Experiment keine spezifischen Messungen durchgeführt wurden, sind weitergehende Untersuchungen zur Einschätzung der potentiellen Gefährdungslage empfehlenswert.

Im Kontext der sich verändernden Mobilität unterstützen die vorliegenden Erkenntnisse einerseits Einsatzkräfte in der zukünftigen Ereignisbewältigung; sie vermögen aber auch Betreiber von weiteren unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen (Bsp. Parkhäuser) auf die Veränderung der Gefährdungssituation zu sensibilisieren.

Résumé

Cette étude prouve que de graves dommages mécaniques et thermiques aux batteries des véhicules électriques peuvent conduire immédiatement à des incendies incontrôlables avec un développement énergétique élevé, un fort dégagement de fumée et de nouvelles émissions polluantes. Dans l'ensemble, l'augmentation de l'électromobilité n'entraînera pas une détérioration de la sécurité dans les tunnels; toutefois, sous certains aspects, elle modifiera la situation de danger dans les tunnels routiers et aura un impact sur la gestion des incidents en particulier.

Les résultats ont été obtenus expérimentalement avec une approche systématique basée sur des principes scientifiques. L'expérience a été réalisée dans les installations souterraines de VersuchsStollen Hagerbach AG, qui offrent un environnement réel pour les essais d'incendie avec une référence aux tunnels routiers. Comme les risques d'incendie d'un véhicule électrique sont fortement influencés par le stockage d'énergie chimique, l'accent a été mis exclusivement sur la batterie: L'expérience s'est concentrée sur l'endommagement maximal d'une batterie au lithium-ion utilisée dans un véhicule tout électrique immatriculé pour la circulation (état 2017). Aucun essai d'incendie ou d'impact n'a été effectué sur des véhicules entièrement électriques, et aucune analyse de la probabilité d'occurrence n'a été effectuée.

Les causes possibles des incendies de véhicules électriques dans les tunnels routiers sont des dommages mécaniques (par exemple, un accident) et thermiques (par exemple, un incendie) à leurs batteries, ce qui peut entraîner une panne thermique. Par conséquent, quatre scénarios de test différents ont été réalisés avec des dommages simultanés de toutes les cellules: (1) pénétration en forme de coin; (2) choc é moussé; (3) pénétration centrale; (4) contrainte thermique. En plus de l'enregistrement des paramètres thermiques et visuels, les analyses ont porté principalement sur les émissions polluantes.

L'hypothèse selon laquelle le risque d'incendie dans les tunnels routiers augmentera généralement en raison de la forte capacité des batteries de traction dans les véhicules électriques ne peut être confirmée sur la base des résultats. L'étude conclut que les risques d'incendie thermique des véhicules électriques sont comparables à ceux des véhicules conventionnels. Cependant, dans le voisinage immédiat et dans des situations de ventilation défavorables, les incendies de véhicules électriques entraînent de nouveaux risques chimiques potentiellement plus graves. Les analyses des polluants indiquent les concentrations critiques des métaux lourds cobalt et manganèse ainsi que du lithium sous forme d'aérosols. Ces polluants ne sont pas présents en si grande quantité dans les incendies de véhicules conventionnels et sont toxiques pour l'homme et l'environnement. Toutefois, on suppose que l'équipement d'exploitation et de sécurité existant dans les tunnels routiers est suffisant pour faire face à ces nouveaux dangers; par conséquent, aucun ajustement technique n'est recommandé. Cette déclaration s'applique exclusivement aux tunnels routiers et ne peut pas s'appliquer à d'autres infrastructures souterraines (par exemple les parkings) qui subissent l'influence croissante de l'électromobilité.

Les analyses ont soulevé de nouvelles questions, en particulier sur les effets des dangers chimiques modifiés, qui devraient faire l'objet d'un examen plus détaillé dans les étapes suivantes. Dans ce contexte, le problème de la contamination potentielle des polluants par les métaux lourds et le fluorure d'hydrogène semble particulièrement pertinent. Étant donné qu'aucune mesure spécifique n'a été effectuée à cet égard dans le cadre de la présente expérience, il est recommandé de poursuivre les investigations pour évaluer la situation de danger potentiel.

Dans le contexte de l'évolution de la mobilité, les résultats disponibles, d'une part, soutiennent les forces d'urgence dans la gestion des événements futurs; ils sont également capables de sensibiliser les exploitants d'autres infrastructures de transport souterrain (par exemple, les parkings à plusieurs étages) à l'évolution de la situation dangereuse.

Summary

The present study shows that severe mechanical and thermal damage to electric vehicle batteries can immediately lead to uncontrollable fires with high-energy release, strong smoke generation and new pollutant emissions. Overall, increasing electric mobility will not lead to a reduction of tunnel safety, but in certain aspects, it will change the hazard situation in road tunnels and ultimately will have an impact on incident management in particular.

The findings were derived experimentally using a systematic approach based on scientific principles. The experiment was carried out in the underground facilities of VersuchsStollen Hagerbach AG, which provide a real environment for fire tests with reference to road tunnels. Since the chemical energy storage system decisively determines the hazards of an electric vehicle fire, the focus was directed on the battery alone: The experiment concentrated on maximum damaging a lithium-ion battery used in a purely electrically powered vehicle approved for use in traffic (as per 2017). Neither fire or crash tests were conducted with full electric vehicles nor were there any analyses on the probability of such damages.

Potential causes of electric vehicle fires in road tunnels are mechanical (e.g. crash) and thermal (e.g. fire) damages to their batteries, thus leading to a thermal runaway. Hence, four different scenarios were realized with simultaneous damaging of all cells: (1) wedge-shaped penetration; (2) blunt impact; (3) central puncturing; (4) thermal stress. Besides thermal and visual parameters, the analyses focused primarily on pollutant emissions.

The hypothesis that the fire hazards in road tunnels will generally increase due to high-capacity traction batteries in electric vehicles cannot be confirmed. The study concludes that the thermal fire hazards of electric vehicles are comparable to those of conventional vehicles. In the immediate vicinity and in unfavourable ventilation situations, however, electric vehicle fires lead to new and potentially more severe chemical hazards. The pollutant analyses point to critical concentrations of the heavy metals cobalt and manganese as well as lithium in the form of aerosols. These pollutants do not occur in such high concentrations in conventional vehicle fires and are toxic to humans and the environment. It is assumed that the existing operational and safety equipment in road tunnels is sufficient to cope with these new threats – therefore, no technical adjustments are recommended. However, this statement only concerns road tunnels and cannot be applied to other underground infrastructures (e.g. parking garages) that are coming under the increasing influence of electric mobility.

The analyses raised new questions, in particular about the effects of the changed chemical hazards, which should be examined more closely in further steps. With this regard, the problem of potential contaminations from heavy metals and hydrogen fluoride appears to be particularly relevant. Since no specific measurements were carried out in the present experiment, further investigations are recommended to assess the potential hazard situation.

In the context of changing mobility, these findings support both emergency forces in coping with future incidents; on the other hand, they are also able to sensitize operators of other underground traffic infrastructures (e.g. parking garages) to changing hazards.

1 Einleitung

1.1 Elektromobilität in der Schweiz: heute und morgen

Für die Mobilität der Zukunft sind bereits heute die Konturen grundlegender Trends erkennbar. Neben der fortschreitenden Digitalisierung, der aufkommenden «*shared mobility*» und dem gesellschaftlich vermehrt akzeptierten automatisierten Fahren, wird das elektrisch angetriebene Fahrzeug als weiterer Grundpfeiler einer nachhaltigen Mobilität gepriesen. Die zukünftige Mobilität, die in zunehmend urbanisierten Räumen stattfindet, soll mit elektrifizierten Fahrzeugen aller Arten (vgl. Tabelle 1) insgesamt effizienter und emissionsärmer werden und dabei vorwiegend erneuerbare Energiequellen nutzen ([6]; [12]).

Vor dem Hintergrund der aktuellen verkehrs-, energie- und klimapolitischen Diskussionen ist es deshalb kaum verwunderlich, dass der Elektromobilität die Bedeutung einer Schlüsseltechnologie beigemessen wird. Auf Grund der technischen Entwicklung und der gezielten Förderung zur Emissionsverminderung verzeichnet die Elektromobilität im schweizerischen Strassenverkehr seit einigen Jahren auf tiefem Niveau hohe Wachstumszahlen (>69%). Die Neuzulassungen von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen steigen stetig, auch wenn deren Anteil am gesamten Motorfahrzeugbestand weiterhin überschaubar bleibt (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2).

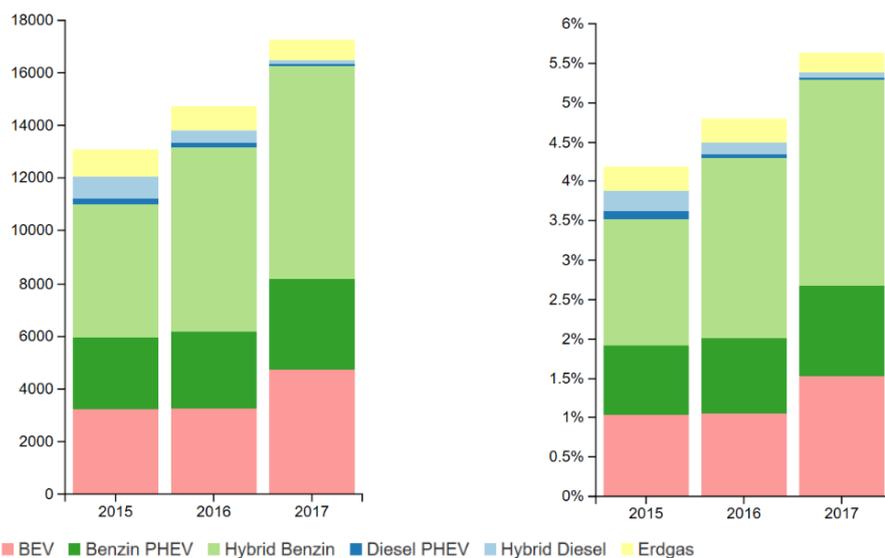


Abbildung 1 Neuzulassungen (links) und Anteile (rechts) der alternativen Antriebe und energieeffizienten Fahrzeugen an den Neuzulassungen in der Schweiz (<http://www.bfe.admin.ch>)

	1990	2000	2010	2015	2016
Total Personenwagen	2 985 397	3 545 247	4 075 825	4 458 069	4 524 029
Benzin	2 905 762	3 402 309	3 308 634	3 173 806	3 149 902
Diesel	79 129	141 863	739 112	1 214 075	1 291 500
Elektrisch	409	754	665	7 531	10 724
Hybrid ¹	0	0	17 156	48 508	57 439
Übrige	97	321	10 258	14 149	14 464

Zivile Fahrzeuge, die am 30. September in der Schweiz immatrikuliert waren (von Haltern mit Wohnsitz in der Schweiz)

¹ Hybrid = (Benzin-elektrisch / Diesel-elektrisch)

Quelle: BFS, ASTRA – Strassenfahrzeugbestand (MFZ)

Abbildung 2 Bestand der Personenwagen nach Treibstoff ([14])

Prognosen deuten darauf hin, dass auch in Zukunft mit einem deutlich steigenden Anteil von Elektrofahrzeugen aller Typen im motorisierten Individualverkehr (MIV) zu rechnen ist und sich die Wachstumszahlen zunehmend auf höheren Niveaus fortsetzen werden ([8]; [12]; [9]; [27]; [28]; [61]; [62]). Im Rahmen der Energiestrategie 2050 des Bundes wurden hierzu szenarienbasierte Modelle erarbeitet, denen jeweils die statistischen Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung des Bundesamtes für Statistik sowie die Verkehrsperspektiven des Bundesamtes für Raumentwicklung zugrunde gelegt sind. Die drei Szenarien «Weiter wie bisher» (WWB), «Politische Massnahmen» (POM) und «Neue Energiepolitik» (NEP) gehen jeweils von unterschiedlichen Grundannahmen aus (Bsp. Verkehrswachstum, Mobilitätsverhalten oder Energienachfrage) und prognostizieren deshalb unterschiedliche Durchdringungsraten der Elektrifizierung in der zukünftigen Mobilität ([13]).

Das Szenario POM nimmt im Vergleich zum Szenario WWB weitergehende politische Instrumente zur Beeinflussung der Energienachfrage an, und sagt deshalb einen vergleichsweise stärkeren Anstieg der Elektromobilität voraus. Das Szenario NEP konzentriert sich im Wesentlichen auf die Erreichung der aktuell gesetzten Energie- und CO₂-Ziele des Bundes gemäss Energiestrategie. Alle Szenarien gehen indes davon aus, dass sich ein spürbarer Anstieg der Elektromobilität erst ab dem Jahr 2020 einstellen wird: Grund dafür ist die Abhängigkeit der Schweiz von den technologischen Entwicklungen der internationalen Fahrzeugindustrie, die eine bemerkbare Etablierung hierzulande verzögern. Die beiden Szenarien POM und NEP prognostizieren anschliessend einen markanten Anstieg des Elektrofahrzeugparks ab dem Jahr 2020, so dass eine Durchdringungsrate von über 40% im Jahr 2050 realistisch erscheint (vgl. Abbildung 3).

Der hohe Anteil von über 40% an den zugelassenen Personenwagen im Jahr 2050 wird vor allem auf die Effizienz des elektrifizierten Antriebs zurückgeführt. Mit Wirkungsgraden von mehr als 90% werden Elektromotoren eine zunehmende Beliebtheit bei den Verkehrsteilnehmern erlangen, die sich in ansteigenden Neuzulassungen niederschlagen wird. Sämtliche Studien betonen allerdings, dass auch der vergleichsweise ineffiziente Verbrennungsmotor mit seinen Wirkungsgraden von derzeit maximal 40% eine technologische Weiterentwicklung durchlaufen wird und deshalb seine vollständige Marktverdrängung auch im Jahr 2050 nicht zu erwarten ist ([13]; [44]; [27]; [28]; [61]; [65]).

Anteil E-Fahrzeuge	2000	2010	2020			2035			2050		
			WWB	POM	NEP	WWB	POM	NEP	WWB	POM	NEP
% Personenwagen	0%	0%	1%	2%	2%	13%	20%	20%	30%	41%	41%
% Leichte Nutzfahrzeuge	0%	0%	0%	2%	2%	4%	15%	15%	10%	29%	29%
% Schwere Nutzfahrzeuge	0%	0%	0%	0%	1%	4%	4%	12%	6%	6%	26%
% Motorräder	0%	0%	14%	14%	15%	30%	30%	50%	40%	40%	80%

Abbildung 3 Anteile der Elektrofahrzeuge am gesamten Schweizer Fahrzeugpark, nach den Szenarien WWB, POM und NEP ([13])

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass die Elektromobilität in den Energieperspektiven 2050 des Bundesrates eine entscheidende Technologie darstellt, um die ambitionierten energie- und klimapolitische Ziele erreichen zu können und deshalb gezielt weitergefördert werden wird ([13]). Mit der Energiestrategie sind mehrere Massnahmen geplant bzw. bereits eingeleitet, die zur Verbesserung der Rahmenbedingungen beitragen (Bsp. keine Mineralölsteuer für Elektrofahrzeuge, Verschärfung CO₂-Emissionsvorschriften, günstige Ladeinfrastrukturen etc.), sodass ein hoher Anteil von Elektrofahrzeugen auf schweizerischen Strassen zukünftig als sehr wahrscheinlich erachtet werden muss.

1.2 Ziele und Hypothese des Projekts

Die Energie der Strassenfahrzeuge mit elektrifizierten Antriebssträngen kann in verschiedenen Arten und Kombinationen gespeichert werden. Auf schweizerischen Strassen manifestiert sich die Elektromobilität deshalb aktuell in zahlreichen Varianten: vom Mildhybrid,

der eine elektromotorische Unterstützung beim Losfahren und Leistungssteigerungen bei Verbrennungsmotoren ermöglicht, bis hin zum reinen batterieelektrischen Fahrzeug, das nur strombetriebenes Fahren erlaubt und am Netz aufgeladen werden muss, sind derzeit alle Ausprägungen vorzufinden. In Abhängigkeit vom Elektrifizierungsgrad kommen somit entweder vorwiegend fossile Treibstoffe für verbrennungsmotorisches Fahren oder aber wiederaufladbare Batterien für rein elektrisches Fahren als Energiequellen zur Anwendung. Hybridisches Fahren wird ermöglicht, sobald mindestens zwei verschiedene Energiespeichersysteme (Bsp. Treibstoff und Batterie) und zwei unterschiedliche Energiewandler (Bsp. Verbrennungsmotor und Elektromotor) den Fahrzeugantrieb unterstützen (vgl. Abbildung 4).

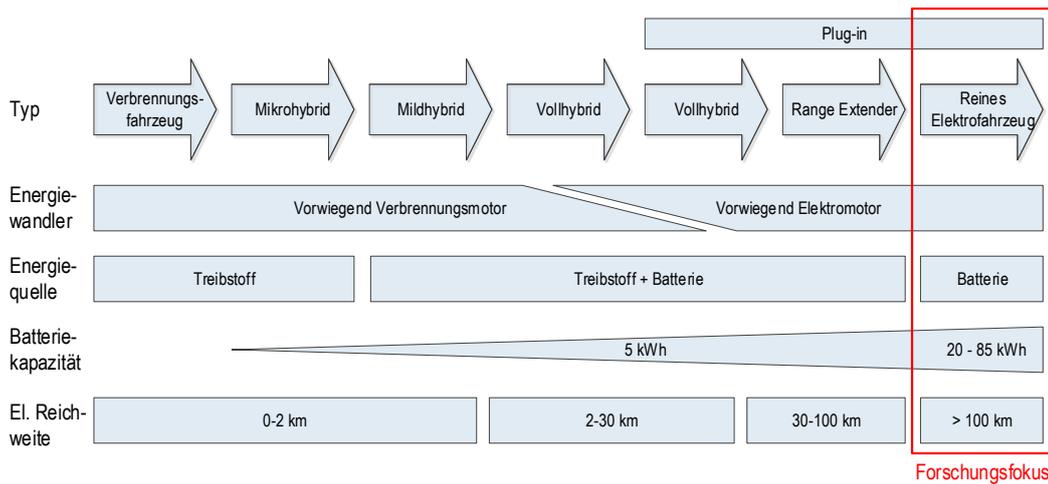


Abbildung 4 Forschungsfokus anhand der Unterscheidungsmerkmale der verschiedenen Fahrzeugtypen (eigene Darstellung nach [67])

Fragestellungen

Diese im Vergleich zum Verbrennungsmotor sogenannten *alternativen Antriebsformen* beziehen ihre elektrische Energie in der Regel aus hochkapazitiven Batterien, die aufgrund des grossen Energieinhalts und der hochreaktiven chemischen Bestandteile mit Brandgefahren und weiteren chemischen oder elektrischen Risiken verbunden sind ([2]; [3]; [24]; [43]; [46]; [48]; [55]; [57]; [70]). Im Kontext der zunehmenden Urbanisierung ([62]; [66]) und der steigenden Tendenz zur Verlagerung des Verkehrs in den Untergrund ([11]; [17]) drängt sich nun die Frage nach der Sicherheit dieser neuen Technologien auf.

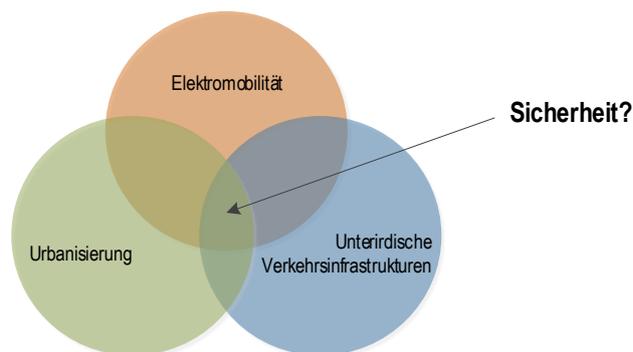


Abbildung 5 Fragestellung im Kontext zukünftiger Mobilitätstrends

Für spezielle Verkehrsinfrastrukturen mit eingeschränkten Belüftungs-, Flucht- oder Rettungsmöglichkeiten, wie sie in Strassentunnel typisch sind, stellen sich deshalb zwei Fragen nach der spezifischen Gefährdungssituation:

- Führen Elektrofahrzeugbrände in Strassentunneln im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugbränden zu anderen Gefährdungen?
- Müssen der zukünftige Betrieb von Strassentunneln oder deren technische Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen angepasst werden?

Damit zufriedenstellende Antworten auf diese Fragen gegeben und allenfalls Massnahmen unternommen werden können, muss ein typischer Elektrofahrzeugbrand in einem Strassentunnel spezifisch untersucht werden. In der wissenschaftlichen Literatur sind hierzu jedoch nur beschränkt verwendbare Informationen ableitbar. Die allgemeine Sicherheit sowie die Branddynamik von Elektrofahrzeugbatterien werden in der Forschung (vgl. [25]; [37]; [46]; [47]; [49]; [51]; [54]; [59]; [68]) und auch in den Medien (vgl. [10]; [15]; [20]; [57]) zum Teil immer wieder kontrovers diskutiert. Trotz der Aktualität des Themas, sind die Gefährdungen, die von solchen Bränden in Strassentunneln ausgehen, in der einschlägigen Fachliteratur bislang nicht umfassend beleuchtet (vgl. [25]; [40], [41]; [63]; [71]). Die möglichen Brandauswirkungen von Elektrofahrzeugbatterien (Bsp. Gasfreisetzung, Rauchentwicklung etc.) in einem Strassentunnel werden darin vor allem theoretisch und unter Zuhilfenahme von Modellen diskutiert und sind nur vereinzelt experimentell – und dann nicht in einer realen Umgebung – untersucht worden (vgl. [49]; [51]). Die spärlich vorliegenden experimentellen Studien widersprechen sich zudem teilweise in für den Tunnelbetrieb kritischen Punkten (Bsp. Rauchbildung, Explosionsgefahr etc.). In Bezug auf Strassentunnel kann deshalb behauptet werden, dass der aktuelle Wissensstand bislang noch nicht ausreichend gesichert ist.

Fokus auf Personenwagen

Zur Schliessung dieser Wissenslücke wurde mit Unterstützung des ASTRA und des französischen Centre d'études des tunnels (CETU) das vorliegende Forschungsprojekt lanciert. Mit ihm war zu untersuchen, ob sich in Strassentunneln durch den zukünftig steigenden Anteil von Elektrofahrzeugen aufgrund der unterschiedlichen Energiespeicherung in den Fahrzeugen eine veränderte Gefahrensituation ergibt. Im Kern sollten dazu die von einer typischen Elektrofahrzeugbatterie (Stand 2017) ausgehenden Gefährdungen in einer realen Umgebung mit aussagekräftigen Versuchen erforscht und beschrieben werden. Weil gemäss Prognosen die grössten Anteile des elektrifizierten Verkehrs bei den Personenwagen erwartet werden (vgl. Abbildung 3), hatten sich die Versuche auf diese zu konzentrieren; elektrifizierte Nutzfahrzeuge und Motorräder wurden von den Betrachtungen ausgeklammert. Das Experiment war in einer Art durchzuführen, dass die Erkenntnisse strukturiert zusammengefasst und im Hinblick auf weiteren Forschungsbedarf analysiert werden konnten. Dabei waren die folgenden Ziele zu erreichen:

1. **Experimentelle Analyse** der Auswirkungen eines Elektrofahrzeugbrandes in einem Strassentunnel
2. Aufzeigen der **tunnelspezifischen Gefährdungsunterschiede** eines Elektrofahrzeugbrandes und einem konventionellen Fahrzeugbrand aufgrund der unterschiedlichen Energiespeicherungen
3. Skizzierung der erwarteten risikobezogenen Auswirkungen auf den zukünftigen Betrieb von Strassentunneln und Formulierung **möglicher Massnahmen**

Experiment mit Worst-Case-Ansatz

Der Hauptunterschied zwischen einem konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und einem reinen Elektrofahrzeug ist neben dem elektrifizierten Antriebsstrang die Energiespeicherung. Während bei ersterem die Energie zumeist in Form flüssiger, fossiler Treibstoffe (Bsp. Benzin, Diesel) gespeichert wird, stammt sie bei letzterem aus elektrochemischen, wiederaufladbaren Batterien, die aus hochreaktiven und brennbaren Bestandteilen sind. Weil der Brandverlauf und die Brandgefährdungen beider Fahrzeugarten somit massgeblich durch die jeweilige Energiespeicherung beeinflusst werden, sollte der Versuchsfokus ausschliesslich auf die Batterie konzentriert werden und einen Worst-Case-Ansatz verfolgen: es waren grösstmögliche Beschädigungen an hochkapazitiven Batterien von Personenwagen herbeizuführen und die Auswirkungen zu analysieren. Brandversuche

oder Crashtests mit vollständigen Elektrofahrzeugen – allerdings ohne Tunnelbezug – sind in der einschlägigen Literatur bereits beschrieben (vgl. [47]; [51]; [68]) und wurden deshalb bewusst ausgeschlossen. Dem Forschungsprojekt wurde die folgende Hypothese zugrunde gelegt, die aufgrund des Experiments schliesslich bestätigt oder verworfen werden sollte:

"In Strassentunneln führen Elektrofahrzeuge aufgrund ihrer Energiespeicherung im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen zu einer erhöhten Brandgefährdung"

Die Hypothese verdeutlicht, dass im vorliegenden Forschungsprojekt die Brandgefährdungen eines Elektrofahrzeuges nicht losgelöst untersucht, sondern in Bezug zu den bisherigen Kenntnissen über Tunnelbrände mit konventionellen Verbrennungsmotorfahrzeugen gestellt werden mussten. Die Projektleitung legte gemeinsam mit dem ASTRA und dem CETU von Beginn an grossen Wert darauf, dass zum Schluss eine fundierte Begründung geliefert werden kann, ob Anpassungen der technischen Sicherheitseinrichtung in Strassentunneln empfehlenswert sind und ob sich die zukünftige Ereignisbewältigung in Strassentunneln aufgrund der zunehmenden Elektromobilität verändern wird.

1.3 Aufbau des Berichts

Der folgende Bericht gliedert sich in fünf aufeinander aufbauende Teile, die den Rahmen für den gesamten Bericht setzen. Zuerst werden in Kapitel 2 theoretische Grundlagen über Elektrofahrzeuge einerseits und Tunnelsicherheit andererseits vermittelt damit die Überlegungen der folgenden Kapitel besser nachvollzogen werden können. Dabei wird ein theoretischer Überblick der potentiellen Gefährdungen von Elektrofahrzeugbränden sowie der geltenden Normen und Richtlinien für Sicherheitseinrichtungen in Strassentunneln generell gegeben.

Anschliessend bildet Kapitel 3 den methodischen Teil, in dem die Vorgehensweise im Experiment beschrieben wird. Die dazu erforderlichen Vorbereitungen und Konzepte, aber auch Abgrenzungen werden detailliert erläutert, damit eine nachvollziehbare Grundlage für die spätere Beschreibung und Diskussion der Resultate geschaffen werden kann.

In Kapitel 4 folgt die Dokumentation der Resultate aus sämtlichen Versuchen des Experiments. Die Beschreibung erfolgt dabei für jeden Versuch einzeln und ohne Interpretation.

Die Erkenntnisse aus dem Experiment werden in Kapitel 5 in Bezug zu einander gestellt und im Gesamtkontext der zunehmenden Elektromobilität reflektiert. Zur besseren Einordnung werden dabei die wichtigsten Erkenntnisse anhand einiger essentieller Fragestellungen diskutiert und die Gültigkeit der zugrundeliegenden Hypothese untersucht.

Abschliessend wird in Kapitel 6 ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf sowie mögliche Sofortmassnahmen unternommen.

2 Grundlagen

2.1 Elektrofahrzeuge

Als Elektrofahrzeuge versteht man allgemein Fahrzeuge, die mit elektrischer Energie angetrieben werden. Obschon strenggenommen auch Eisenbahnen und sonstige elektrifizierte Fahrzeuge für den Personen- oder Güterverkehr dazugezählt werden müssen, werden im vorliegenden Projekt unter diesem Begriff lediglich Strassenfahrzeuge im weiteren Sinne und Personenwagen im engeren Sinne bezeichnet (d.h. keine Nutzfahrzeuge oder Motorräder). Grundsätzlich spielt dabei der Elektrifizierungsgrad des Fahrzeuges oder dessen Antriebsarchitektur keine Rolle: sobald das Fahrzeug über einen Elektromotor für den Fahrzeugantrieb verfügt, wird es als Elektrofahrzeug¹ bezeichnet ([64]) – Hybridfahrzeuge zählen somit explizit auch zu den Elektrofahrzeugen (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1 Definition der verschiedenen Elektrofahrzeugtypen (nach [12] und [44])

Fahrzeugtyp	Abkürzung	Definition
Brennstoffzellenfahrzeug	FCHEV (Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle)	Fahrzeugantrieb mit Elektromotor plus Brennstoffzelle zur Energieerzeugung
Elektrofahrzeug (reines)	BEV (Battery Electric Vehicle)	Fahrzeugantrieb mit Elektromotor, Akku (auch "Batterie") am Netz aufladbar
Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung (auch Range Extender)	REEV (Range Extended Electric Vehicle)	Elektrofahrzeug mit zusätzlichem Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle zur mobilen Aufladung des Akkus (eigentlich Hybrid, da 2 Energiewandler und 2 Energiequellen)
Hybridfahrzeug	HEV (Hybrid Electric Vehicle)	Fahrzeugantrieb mit Verbrennungsmotor plus Elektromotor, Akku nicht am Netz aufladbar
Plug-in Hybridfahrzeug	PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	Kombination Elektroantrieb und Verbrennungsmotor, Akku am Netz aufladbar

2.1.1 Energiespeicherung

Bei allen in Tabelle 1 aufgeführten Elektrofahrzeugen ist für die bedarfsgerechte Verfügbarkeit der elektrischen Energie die Energiespeicherung in Form einer wieder aufladbaren Batterie erforderlich ([65]). Je nach Fahrzeugtyp kann diese über eine geringere (Bsp. Hybridfahrzeuge) oder eine grössere (Bsp. reines Elektrofahrzeug) Kapazität haben. Entscheidende Merkmale eines Elektrofahrzeugs, wie zum Beispiel Reichweite oder Leistung, sind direkt von der Batterie abhängig, weshalb sie neben dem Elektromotor und der Leistungselektronik zu den Schlüsseltechnologien eines Elektrofahrzeugs zählt ([45]).

Die Batterietechnologie bestimmt daher massgeblich den Erfolg der Elektromobilität im zukünftigen Strassenverkehr. Obschon die jahrzehntelange Entwicklung zahlreiche Technologien und Varianten hervorgebracht hat, kommen als wieder aufladbare elektrochemische Speicher für Elektrofahrzeuge aktuell – und voraussichtlich auch in Zukunft – vor allem Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz ([30]; [33]; [35]; [69]). Weil sie im Zentrum des vorliegenden Forschungsprojektes stehen, werden die für das Verständnis erforderlichen Grundlagen in den kommenden Abschnitten kurz erläutert.

Bestandteile und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien

Ein elektrochemisches Energiespeichersystem wird in der Regel als «Lithium-Batterie» bezeichnet, wenn das Element Lithium in reiner oder gebundener Form als Aktivmaterial ver-

¹ Die vielfach uneinheitlich verwendeten Begriffe «Elektroauto», «Elektromobil», «E-Fahrzeug» etc. sind Synonyme.

wendet wird ([24]). Darunter werden somit einerseits nicht wiederaufladbare «Primärbatterien» wie Lithium-Metall-Batterien zusammengefasst. Andererseits wird der Begriff für sogenannte «Sekundärbatterien» verwendet, die wieder aufgeladen werden können und deshalb in Elektrofahrzeugen aber auch in grosser Zahl in ganz verschiedenen mobilen Anwendungen zum Einsatz kommen (Bsp. Telefone, Notebooks, Werkzeugmaschinen) ([70]). Sekundärbatterien sind aufgrund ihrer Fähigkeit zur Wiederaufladung und -verwendung genaugenommen «Akkumulatoren». Im englischsprachigen Raum existiert diese Unterscheidung indes nicht und so hat sich im Kontext der Elektromobilität auch im deutschen Sprachraum der Begriff «wiederaufladbares Batteriefahrzeug» gegenüber dem Begriff «akkugetriebenes Fahrzeug» durchgesetzt ([44]). Im vorliegenden Bericht werden deshalb Lithium-Ionen-Energiespeicher ausschliesslich als «Batterie» bezeichnet.

Lithium-Ionen-Batterien bestehen wie alle anderen Batterien aus einer negativen und einer positiven Elektrode, die eine Potentialdifferenz aufweisen und durch einen Separator getrennt sind. Zwischen den gegensätzlich aufgeladenen Polen befindet sich ein leitfähiger Elektrolyt, der die freie Bewegung der Lithium-Ionen während des Lade- und Entladevorganges ermöglicht. Die negative Elektrode (Anode) besteht typischerweise aus Graphit und die positive (Kathode) aus einem Lithium-Metalloxid, wobei hier verschiedene chemische Varianten möglich sind (Bsp. Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid oder Lithium-Cobalt-Aluminium-Oxid). Beim Betrieb der Batterie werden Elektronen über die Stromableiter in den Aktivmaterialien abgeleitet, der Ladungsträger wird durch die chemische Reaktion auf ein Lithium-Ion übertragen, das schliesslich im Elektrolyten und durch den porösen Separator zur anderen Elektrode diffundiert und dort in das Kristallgitter des Aktivmaterials eingelagert wird (vgl. Abbildung 6). Die Kristallgitter der Aktivmaterialien bleiben jeweils erhalten, weshalb der Vorgang reversibel, jedoch nicht unbegrenzt ist (die Batterielebensdauer ist von den Ladezyklen abhängig). Im entladenen Zustand der Batterie sind sämtliche Lithium-Ionen im Metalloxid eingelagert; beim Laden wandern sie dann wieder zurück in das Graphit.

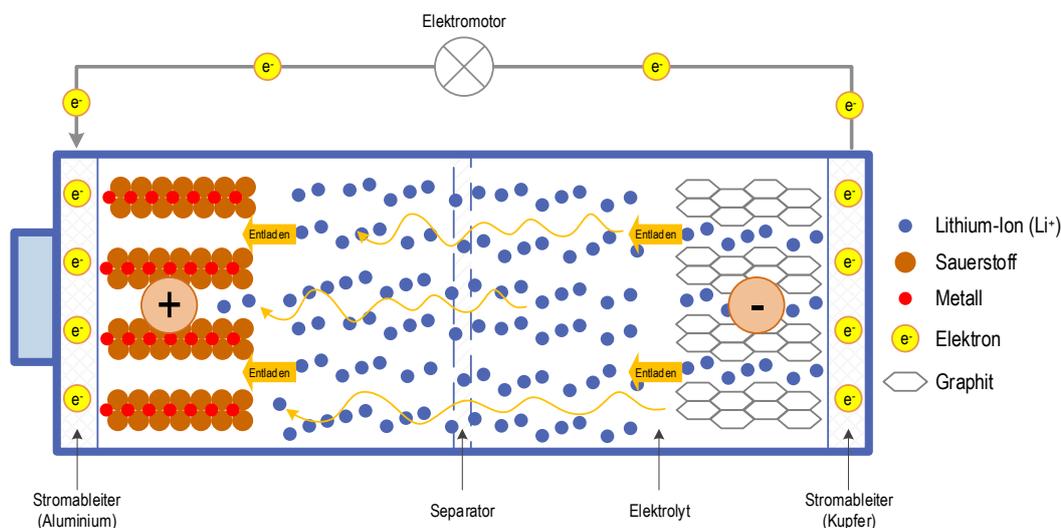


Abbildung 6 Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie (eigene Darstellung nach [31]; [33]; [44]; [70])

Das folgende praktische Beispiel illustriert die Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batterie: während des Fahrens eines Elektrofahrzeuges (Entladung) wandern Lithium-Ionen aus dem Aktivmaterial der negativen Elektrode durch den Separator hindurch zur positiven Elektrode und lagern sich dort in das Kristallgitter des entsprechenden Metalloxids ein. In der selben Zeit wandern Elektronen ausserhalb der Batterie über eine elektrische Kabelverbindung vom Stromableiter (Kupfer) der negativen Elektrode zum Stromableiter (Aluminium) der positiven Elektrode und versorgen dabei den Elektromotor als Leistungsverbraucher mit der erforderlichen elektrischen Energie. Beim Stromtanken des Elektrofahrzeugs an einer Ladestation wird dieser Vorgang umgekehrt: die Lithium-Ionen wandern nach dem

gleichen Prinzip von der positiven zur negativen Elektrode zurück und werden wieder in den Graphit integriert (vgl. Abbildung 6).

Damit die Leistungsparameter, wie beispielsweise die erforderlichen Spannungen (V) oder Energien (Wh), für das rein elektrische Fahren erreicht werden können, müssen viele einzelne Lithium-Ionen-Zellen zusammengeschaltet werden. Dadurch ergibt sich die für Traktionsbatterien typische modulare Bauweise, in der mehrere Basiszellen zu einem Modul und anschliessend mehrere Module zu einem Batteriesystem, die eigentliche Fahrzeugbatterie zusammengebaut sind (vgl. Abbildung 7). Traktionsbatterien, die rein elektrisches Fahren ermöglichen, verfügen mit dieser Architektur typischerweise über Spannungsniveaus zwischen 200 - 400 V und elektrische Antriebsleistungen über 20 kW ([64]). Bei der Zellgestaltung kommen heutzutage, je nach Zweck und Hersteller, drei verschiedene Formen zur Anwendung: zylindrische Zellen, prismatische Zellen und laminierte Zellen (auch «Pouch Bag») (vgl. Abbildung 8).

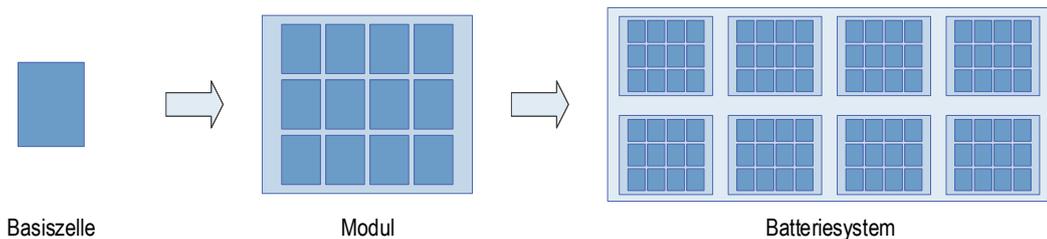


Abbildung 7 Aufbau einer Elektrofahrzeugbatterie



Abbildung 8 Schematische Darstellung der möglichen Gestaltungsformen: zylindrische (links), prismatische (Mitte) und laminierte Zellen (rechts) (eigene Darstellung nach [70])

Durch die modulare Zusammenschaltung einzelner Zellen müssen allfällige Ungleichheiten zwischen den Einzelzellen aus Sicherheitsgründen kompensiert werden können. Hierzu wird für jedes Batteriesystem ein Batteriemanagementsystem eingesetzt, das im Grunde eine Messeinheit ist, die einzelne Zellspannungen und Temperaturen der Batterie laufend kontrolliert und Meldungen an übergeordnete Steuergeräte abgibt ([52]). Weil im Falle fehlerhafter Lade- oder Entladevorgänge irreversible Schäden und teils kritische Zustände mit stark exothermen Reaktionen auftreten können (vgl. Kapitel 2.1.2), steuert das Batteriemanagementsystem diese wichtigen Prozesse und schützt damit das ganze System vor Überladung und Tiefentladungen ([58]).

Tabelle 2 Definitionen typischer Kenngrößen (nach [52])

Begriff	Einheit	Beschreibung
Kapazität	Ah	Diejenige Menge an elektrischer Ladung, die von der Batterie unter spezifischen Entladebedingungen geliefert werden kann.
Leistung	W	Produkt aus Strom und Spannung einer Batterie.
Energie	Wh	Produkt aus Kapazität und mittlerer Entladespannung.
Spezifische Energie	Wh/kg	Energie, die sich auf die Masse der Batterie bezieht.

Lithium-Ionen-Batterien spielen aufgrund ihrer positiven Eigenschaften eine essentielle Rolle zur Ermöglichung des rein elektrischen Fahrens. Die Vorteile von Lithium-Ionen-Batterien, insbesondere im Anwendungsbereich der Elektromobilität sind ([23]; [44]):

- Hohe Zellspannungen
- Hohe spezifische Leistungen (W/kg) und Energien (Wh/kg)
- Hohe Wirkungsgrade (>98%) aufgrund geringer Innenwiderstände
- Anwendung in einem grossen Temperaturbereich
- Geringe Selbstentladung und kein Memory-Effekt

Sicherheit

Die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien wird im Wesentlichen durch chemische, elektrische, mechanische und funktionale Faktoren bestimmt (vgl. Abbildung 9). Während die chemische Sicherheit durch die Auslegung und Materialien einer Batteriezelle vorbestimmt ist, spielt bei der elektrischen Sicherheit vor allem die Isolation der Kabel und Gehäuse eine wichtige Rolle. Für die mechanische Sicherheit einer Batterie wird in der Regel durch konstruktive Massnahmen, beispielsweise durch stossichere Gehäuse oder durch die Verbauung in einem geschützten Bereich des Elektrofahrzeugs gesorgt. Mit der Überwachung und angemessenen Steuerung der Basiszellen mittels eines Batteriemanagementsystems wird schliesslich die funktionale Sicherheit des gesamten Systems gewährleistet ([42]; [52]).

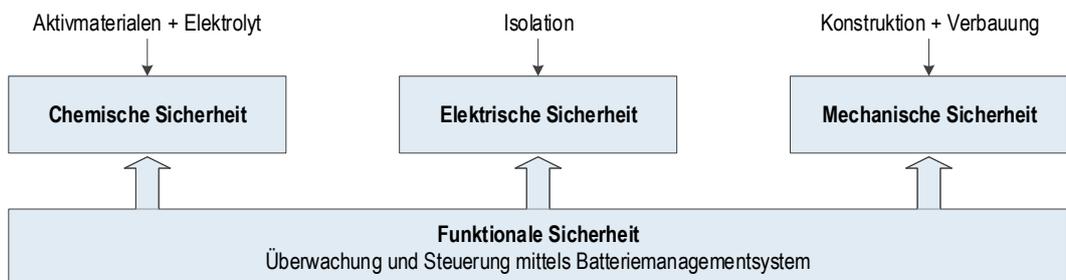


Abbildung 9 Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien (eigene Darstellung nach [52])

Die Sicherheit von Traktionsbatterien wird von den Fahrzeugherstellern bereits in der Entwicklung mittels spezifischer Komponenten- oder auch Crashtests nach internationalen Normen und Richtlinien (Bsp. ECE R100) überprüft und nachgewiesen. Alleine für den europäischen Raum existieren zahlreiche EN, IEC und ISO Normen, die sich mit der Sicherheit von elektrochemischen Speichern befassen². Das Sicherheitssystem eines Fahrzeuges sollte unter normalen Bedingungen kritische Batteriezustände melden und beispielsweise bei einem Unfall die Batterieanschlüsse automatisch trennen. Eine hohe Gesamtsicherheit wird zudem erreicht, indem diverse chemische, elektrische, mechanische und funktionale Schutzmassnahmen sowohl auf Zell-, Modul- und Systemebene einer Batterie eingerichtet werden («Zwiebelprinzip») ([1]). Dadurch können Wahrscheinlichkeit und Ausmass eines vollständigen Batteriebrandes, der zwingendermassen auf das Fahrzeug überspringen wird, minimiert werden ([49]).

Obschon spezifische Gefahrenpotentiale bestehen und die Berichterstattungen in den aktuellen Medien zum Eindruck verleiten können, dass Lithium-Ionen-Batterien hochgefährliche und unkontrollierbare Energiespeicher sind, muss entgegengehalten werden, dass diese Speichertechnologie bereits seit vielen Jahren erprobt ist und seither rasante Weiterentwicklungen, auch mit Bezug zur Sicherheit, durchlaufen hat. Lithium-Ionen-Batterien können daher als sehr zuverlässig bezeichnet werden.

² Für eine Übersicht dieser aktuellen Vorschriften, wird an dieser Stelle auf den Anhang des Berichts [70] verwiesen.

2.1.2 Potentielle Brandgefährdungen

Aufgrund des hohen Energiegehalts, der hohen Spannungen, vor allem aber wegen der hochreaktiven Bestandteile, bergen Lithium-Ionen-Batterien aber tatsächlich potentielle Brandgefährdungen. So besteht zum Beispiel die nicht-wässrige, organische Elektrolytlösung aus Fluorphosphatsalzen und ist genauso wie das Graphit im Aktivmaterial der Anode brennbar ([24]; [33]). Unter normalen Betriebsbedingungen und sofern keine Fabrikationsfehler das System schwächen, sind Lithium-Ionen-Batterien aber ausreichend vor einer spontanen Brandentwicklung geschützt – die Batterien eines Elektrofahrzeuges beginnen in der Regel nicht ohne vorheriges Stressereignis zu brennen.

Thermisches Durchgehen

Unter Einwirkung eines mechanischen, thermischen oder elektrischen Ereignisses, kann die Batterie jedoch überbeansprucht sein und eine sich selbstverstärkende Reaktion, das sogenannte «thermische Durchgehen» (engl. *thermal runaway*) ausgelöst werden ([56]). Dabei erwärmt sich die Batterie durch chemische Vorgänge einerseits selbstständig, d.h. ohne äussere thermische Einwirkung und andererseits sehr schnell (>10 °C/min, [70]) und verlässt ihren stabilen Betriebsbereich. In diesem instabilen Zustand beginnen sich die Materialien exotherm zu zersetzen und es entsteht ein Batteriebrand mit sehr hoher Energieentfaltung. Es sei betont, dass bei diesem Prozess Ursache und Wirkung zeitlich nicht unmittelbar beieinanderliegen müssen: das thermische Durchgehen kann augenblicklich aber durchaus auch mehrere Tage nach der auslösenden Stresssituation stattfinden. Die Temperatur, bei der ein thermisches Durchgehen beginnt, unterscheidet sich bei den Zelltypen. In Abhängigkeit der verbauten Materialien in den Batteriezellen variiert sie jedoch zwischen 130-250 °C ([3]; [46]; [70])

Jedes thermische Durchgehen ist, vereinfacht gesagt, das Resultat eines unkontrollierbaren Temperaturanstiegs in den Batteriezellen. Mit Bezug zur Elektromobilität kann dieser jedoch verschiedene Gründe haben (nicht abschliessend, [56]):

- Externe **thermische Beanspruchung** der Batterie (Bsp. Feuer)
- **Mechanische Beschädigung** (Bsp. Kollision)
- **Interner Kurzschluss** (Bsp. Zellfehler)
- **Überladung** bzw. **Tiefentladung** (Bsp. falsche Handhabung während Ladeprozess)

Emissionen im Brandfall

Im Anwendungsbereich der Elektromobilität ist zurzeit ein wichtiges Ziel, die Reichweiten der Fahrzeuge zu verlängern. Dazu muss unter anderem die spezifische Energie (auch Energiedichte) in den Batterien erhöht werden, die wiederum direkte Auswirkungen auf die Intensität eines Brandereignisses und dessen Emissionen hat. Aufgrund der chemischen Speicherung der Energie in den Batterien bestehen im Falle eines Elektrofahrzeugbrandes im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugbränden, deshalb in erster Linie veränderte chemische Gefährdungen. Diese korrelieren direkt mit der Kapazität einer Batterie.

Eine stoffliche Betrachtung von heutigen Batteriesystemen zeigt, dass neben Lithium und den Schwermetallen im Kathodenmaterial auch Fluor und andere organische Komponenten im Elektrolyt vorkommen. Diese Stoffe sind sehr reaktiv und können für Mensch und Umwelt allesamt ein erhebliches Risiko darstellen, wenn sie im Brandfall gasförmig freigesetzt werden. Bisherige Studien belegen, dass abgesehen von den herkömmlichen Brandgasen (Bsp. CO, CO₂ etc.), die bei einem Elektrofahrzeugbrand in vergleichbarem Ausmass wie bei einem konventionellen Fahrzeugbrand auftreten (vgl. [25]; [51]), vor allem die veränderten chemischen Gefährdungen durch toxische und karzinogene Stoffe zu beachten sind ([49]; [50]; [55]). Theoretisch erwartbare Schadstoffemissionen eines Lithium-Ionen-Batteriebrandes, die sich von einem Benzin- oder Dieselbrand unterscheiden sind in Tabelle 3 aufgeführt.

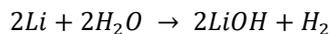
Tabelle 3 Mögliche Zersetzungsprodukte während eines Lithium-Ionen-Batteriebrandes

Stoff	Formel	Beschreibung ³
Fluorwasserstoff	HF	farbloses Gas mit stechendem Geruch, sehr giftig
Phosphoroxidfluorid	POF ₃	farbloses, stechend riechendes Gas, undefinierte Toxizität ([49])
Phosphorsäure	H ₃ PO ₄	farb- und geruchloser Feststoff oder Flüssigkeit, giftig
Flüchtige organische Verbindungen	VOC	kohlenstoffhaltige Stoffe, typisch als Gas vorliegend
Monophosphan	PH ₃	brennbares, giftiges, farb- und geruchloses Gas, sehr giftig
Schwermetallaerosole	Co, Mn	Staubförmige Rückstände in der Luft, sehr giftig

Besondere Gefährdungen in unterirdischen Infrastrukturen

Wegen der reaktiven und teils hochgiftigen Materialien, bestehen bei Batteriebränden in abgeschlossenen Räumen oder unterirdischen Infrastrukturen vor allem chemische Gefahren. Die freigesetzten Schadstoffe können sich aufgrund von eingeschränkten Belüftungsmöglichkeiten in der Luft konzentrieren und überschreiten für Menschen kritische Schwellenwerte schneller als im Freien, wo die Rauchgase eher verdünnt werden. Die in solchen Räumen oftmals nicht optimalen Flucht- oder Rettungsmöglichkeiten erschweren die Situation zusätzlich und tragen zur besonderen Gefährdung bei.

Lithiumionen-Batterien sind in der Regel gasdicht verschlossen, sodass im Normalbetrieb keine Inhaltsstoffe austreten bzw. keine Stoffe in die Batterien eindringen können. Diese Vorkehrung ist gerade auch im Zusammenhang mit Wasser sehr wichtig, da in den Batterien enthaltenes elementares Lithium beim Kontakt mit Wasser stark exotherm zu Wasserstoff und Lithiumhydroxid reagiert:



Der dabei entstehende Wasserstoff H₂ ist unter atmosphärischem Druck bei einem Volumenanteil zwischen 4 und 77 % explosiv (das sogenannte «Knallgas»). Dieses sehr weite Mischungsverhältnis macht Wasserstoff gerade in unterirdischen Infrastrukturen hochgefährlich: in Räumen mit unzureichender Frischluftzufuhr kann sich Wasserstoffgas unter Umständen anreichern und so genügen bereits geringe Zündquellen, wie zum Beispiel elektrostatische Entladungen oder elektrische Zündfunken eines betätigten Lichtschalters, um eine Explosion auszulösen. Im Falle einer Gehäusebeschädigung nach einem Unfall oder einer zu grossen thermischen Belastung bei einem Brand können entweder Inhaltsstoffe der Batterie in die Umgebung gelangen und in Kontakt mit Wasser treten oder Wasser kann direkt in die Batterie eindringen. Diese Problematik muss besonders von Feuerwehren beachtet werden, da Wasser nach wie vor als bestes Kühlmittel für nicht löschbare Lithium-Ionen-Batteriebrände empfohlen wird ([37]; [59]).

Mit zunehmender Energiedichte in den Batteriesystemen steigt somit auch das Risiko (über das potentielle Schadensausmass) von Bränden bei Unfällen. Gerade im speziellen Fall von Strassentunneln kann so die Sicherheit der Fahrzeuginsassen und anderer Tunnelnutzer sowie die Einsatzstrategien der Rettungskräfte zur Bekämpfung des Schadens stark beeinflusst werden. Das ASTRA weist darauf hin, dass die Rettungskräfte aufgrund der bislang unklaren Faktoren im fachgerechten Umgang mit solchen Unfallfahrzeugen allgemein geschult werden müssen ([12]). Auf internationaler Ebene liegen teilweise Empfehlungen und Merkblätter für Feuerwehren vor, die jedoch den Fokus eher auf Parkgaragen richten und nicht spezifisch auf die Gefährdungssituation in Strassentunneln eingehen (vgl. [37]; [38]; [46]; [68]). Zurzeit ist somit nicht genau klar, wie sich die durch die Energiespeicherung bedingten Brandgefahren von Elektrofahrzeugen in Strassentunneln auswirken und ob bei einem solchen Ereignis von einer höheren Gefährdung für die Tunnelnutzer als bei einem konventionellen Fahrzeugbrand ausgegangen werden muss.

³ u.a. nach Verordnung (EG) Nr. 1272/2008

Bisherige Ereignisse

In den Medien wird immer häufiger von Brandereignissen berichtet, deren Ursache auf eine fehlerhafte Lithium-Ionen-Batterie zurückgeführt werden kann. Der Grossbrand in der Altstadt von Steckborn (Dezember 2015) sowie die Garagenbrände in Niederönz (Januar 2016) oder Lupfig (Oktober 2016) wurden durch brennende Batterien mit geringen Kapazitäten (Bsp. Modellbau-Akkus) ausgelöst und sind Beispiele dafür, dass auch niederkapazitive Batterien zu grossen Bränden mit teils verheerenden Schäden führen können.

Mit Bezug zum Anwendungsbereich der Elektromobilität werden diverse Grossbrände auf Hochseefähren berichtet, die durch hochkapazitive Traktionsbatterien elektrifizierter Fahrzeuge verursacht wurden, die während der Schifffahrt am Bordnetz angesteckt waren ([59]). In diesem Zusammenhang werden vor allem falsche Handhabungen während des Ladevorgangs am Bordnetz (unpassende oder defekte Ladekabel) sowie beschädigte Batterien (noch vor der Einfahrt in die Fähre) als Brandursache erwähnt. Tabelle 4 gibt einen Überblick weiterer Brandereignisse, die auf hochkapazitive Lithium-Ionen-Batterien zurückgeführt werden können und für das Verständnis der Fragestellungen im vorliegenden Bericht relevant sein können.

Tabelle 4 Ereignisse bedingt durch hochkapazitive Li-Ionen-Batterien (u.a. nach [1])

Datum / Ort	Anwendung	Beschreibung
April 2011 China	Elektrofahrzeug Zotyc M300	Interner Kurzschluss aufgrund beschädigter Isolation zwischen den Batteriezellen und dem Aluminiumgehäuse der Batterie.
Juni 2011 USA	Elektrofahrzeug Chevrolet Volt	Batteriebrand ereignete sich 3 Wochen nach einem Crashtest.
Mai 2012 China	Elektrofahrzeug Nissan GT-R	Kurzschluss zwischen der Hochspannungsverteilung und dem Fahrzeugkörper verursachte Lichtbögen, die brennbares Material im Fahrzeug entzündeten.
Januar 2013 USA	Flugzeugbatterie Boeing 787 "Dreamliner"	Batterie überhitzte und führte zu einem Brand mit sehr starker Rauchentwicklung.
Januar 2013 Japan	Flugzeugbatterie Boeing 87-8	Fehlermeldung deutete auf einen Batteriefehler hin, worauf Rauchgeruch im Cockpit und in der Kabine gemeldet wurde
März 2013 Japan	Elektrofahrzeug Mitsubishi i-MiEV	Fahrzeugbatterie fing Feuer während sie an einem Lade- und Entladetestgerät angeschlossen war.
März 2013 Japan	Elektrofahrzeug Mitsubishi Outlander P-HEV	Fahrzeugbatterie überhitzte nachdem sie voll aufgeladen und 1 Tag nicht gebraucht wurde; einzelne Batteriezellen begannen zu schmelzen.
Oktober 2013 USA	Elektrofahrzeug Tesla Model S	Nach einem direkten Einschlag eines metallischen Objektes in eines der 16 Module begann die gesamte Fahrzeugbatterie zu brennen.
Oktober 2013 Mexiko	Elektrofahrzeug Tesla Model S	Batteriebrand nach einem Unfall eines überschnellten Fahrzeugs in einem Kreisel.
November 2013 USA	Elektrofahrzeug Tesla Model S	Das Fahrzeug kollidierte mit einer lose herumliegenden Anhängerkuppel auf der Strasse, worauf die Fahrzeugunterseite beschädigt wurde und ein Fahrzeugbrand ausgelöst wurde.
Februar 2014 Kanada	Elektrofahrzeug Tesla Model S	Garagenfeuer durch ein geparktes Fahrzeug, das weder eingesteckt war noch geladen wurde.
Oktober 2017 Österreich	Elektrofahrzeug Tesla Model S	Kollision mit einer Betonleitwand vor einem Strassentunnel, worauf Batterie Feuer fing und das Fahrzeug komplett ausbrannte.
Mai 2018 Schweiz	Elektrofahrzeug Tesla Model S	Kollision mit Leitplanke vor dem Nordportal des Monte-Ceneri-Tunnels, worauf Batterie Feuer fing und das Fahrzeug komplett ausbrannte.

2.2 Tunnelsicherheit

Strassentunnel sind baulich aufgrund der geltenden Normen und Richtlinien auf sehr hohe Belastungen ausgelegt und müssen sowohl grossen Brandenergieen als auch Brandtemperaturen⁴ über längere Zeit standhalten können (vgl. [60]). Es ist bereits jetzt klar, dass Elektrofahrzeugbrände in Strassentunneln die vorgegebenen, sehr hohen Bemessungswerte nicht überschreiten werden (vgl. [41]). Die physische Tragsicherheit von normgerecht erbauten Strassentunneln kann somit als ausreichend erachtet werden und bedarf auch mit dem aktuellen Mobilitätswandel keiner weiteren Überprüfung.

Die geforderte Tunnelsicherheit muss gemäss der europäischen Richtlinie EU 2004/54/EG [36] zusätzlich durch technische und betriebliche Massnahmen hergestellt werden. Im Vergleich zu baulichen Sicherheitsmassnahmen unterliegen diese sehr starken technologischen Entwicklungen und müssen laufend auf die aktuellen Gefährdungssituationen ausgerichtet werden. Als Konsequenz werden die schweizerischen Richtlinien und Normen kontinuierlich dem aktuellen Stand der Technik angepasst.

2.2.1 Richtlinien und Normen

Eine Grundlage für die Planung von Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) ist die Annahme einer zu erwartenden Verkehrszusammensetzung im betroffenen Tunnel (Anteil Schwerverkehr, Gefahrguttransporte etc.). Im Kontext der sich wandelnden Mobilität, unterliegt dieser Aspekt aktuell aber einer schleichenden Veränderung: die zukünftige Verkehrszusammensetzung wird sich zunehmend weniger durch reine Benzin- und Dieselfahrzeuge dafür mehr durch batteriebetriebene und weitere alternativ angetriebene Fahrzeuge charakterisieren (vgl. Kapitel 1.1).

In den schweizerischen Richtlinien und Normen werden potentielle Auswirkungen der Elektromobilität auf die Tunnelsicherheit nicht behandelt. So sind den Empfehlungen für die Bemessung der BSA aktuell Fahrzeugbrände mit fossilen Treibstoffen zugrunde gelegt. Obschon in den Betrachtungen Gefahrguttransporte berücksichtigt werden, geht die Norm SIA 197/2 in ihren Definitionen ausschliesslich von Brandereignissen mit Beteiligung konventioneller Antriebsarten aus (vgl. [60]). Bei den zunehmend eingesetzten alternativen Treibstoffen, d.h. nicht nur bei elektrochemischen Speichern, sondern auch bei gasförmigen Treibstoffen besteht allerdings ein bedeutendes Schadenpotential ([12]). Neuartige Schadensszenarien durch Anreicherung zündfähiger Gas-Luft-Gemische nach einem Unfall, allfällige Grenzbelastungen für Feuerwehrleute aufgrund der veränderten chemischen Gefährdungen, oder die Gefahr der Knallgasbildung durch Wasser als Löschmittel werden somit nicht behandelt. Auch in den Vorgaben des ASTRA zu den Lüftungs- und Detektionsanlagen eines Strassentunnels (vgl. [4] bzw. [5]) werden die Auswirkungen des steigenden Anteils von Elektrofahrzeugen nicht berücksichtigt.

Mit Blick auf die Tunnelsicherheit ist der Mobilitätswandel in den geltenden schweizerischen Richtlinien und Normen (noch) nicht genügend mit einbezogen. Dadurch wird für die Projektierung der BSA nach wie vor eine Verkehrszusammensetzung zugrunde gelegt, die ausschliesslich aus Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben besteht. Spezifische Gefährdungen, die von alternativen Antriebsformen ausgehen können sowie allfällige Schutzmassnahmen in der Ereignisbewältigung bleiben dadurch vorerst unbeachtet.

2.2.2 Massnahmen bei Elektrofahrzeugbränden

Mit der zunehmenden Verwendung von elektrifizierten Antriebssträngen ist davon auszugehen, dass in Strassenverkehrsunfällen immer häufiger auch Elektrofahrzeuge mit ihren Lithium-Ionen-Batterien beteiligt sein werden. Das wird dazu führen, dass die neuartigen elektrischen und chemischen Gefährdungen sowohl die Arbeitssicherheit und den Gesund-

⁴ Bsp. 1'500'000 MJ bzw. 1'400 °C (Tanklastwagen mit 50 m³ Petrol ohne Abfluss in Kanalisation)

heitsschutz als auch Arbeitsabläufe im Umgang mit beschädigten Elektrofahrzeugen verändern werden ([34]). Für die Rettungs- und Bergungskräfte ist es deshalb essentiell, geeignete Konzepte für den Umgang mit solchen Fahrzeugen bereit zu haben. Abgesehen von der Grundregel, dass Wasser das Kühlmittel der Wahl ist, liegen zurzeit keine offiziellen Massnahmenempfehlungen im Sinne einer Richtlinie für den Umgang mit Elektrofahrzeugbränden in Strassentunneln vor. Es existieren jedoch diverse Ratgeber und Einsatzhinweise von und für Feuerwehren, wie mit beschädigten Elektrofahrzeugen umzugehen ist und auf welche Gefahren besonders zu achten ist.

In einer Informationsbroschüre der Eidgenössischen Koordinationskommission für Arbeitssicherheit (EKAS) werden Sicherheitsmassnahmen beschrieben, die im direkten Zusammenhang mit den Gefährdungen von Traktionsbatterien zu beachten sind (vgl. [32]). Darin wird betont, dass aufgrund der zahlreichen Fahrzeugarten im heutigen Strassenverkehr vor allem der Fahrzeugidentifikation eine viel grössere Bedeutung beizumessen ist. Während früher mehr oder weniger klar war, dass ein verunfalltes Fahrzeug irgendwo einen Tank mit einem fossilen Brennstoff hat, ist die Energiequelle eines heutigen Fahrzeugs nicht mehr augenblicklich erkennbar. Durch die Rettungs- und Bergungskräfte muss jederzeit in Betracht gezogen werden, dass das Fahrzeug unter Strom steht und chemische Gefährdungen durch austretende Elektrolytlösungen vorliegen. Ziel der EKAS-Informationsbroschüre ist, die Arbeitssicherheit und den Schutz der Gesundheit im Umgang mit Hochvoltssystemen von Elektrofahrzeugen zu erhöhen. Die empfohlenen Sicherheitsmassnahmen im Umgang mit verunfallten Elektrofahrzeugen sind als Ergänzung zu den Standardmassnahmen in der Strassenrettung zu verstehen – sie sind in Abbildung 10 wiedergegeben.

Auch im Einsatzhinweis der Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg ([53]) sowie in den Empfehlungen der amerikanischen *Fire Protection Research Foundation* ([37]; [38]) werden die Bekämpfung von Elektrofahrzeugbränden mit Wasser ausdrücklich empfohlen. Die dadurch mögliche Gefahr der Wasserstoffbildung – die sich in einem Strassentunnel unter Umständen schneller manifestiert (vgl. Kapitel 2.1.2) – werden explizit betont. Alle Empfehlungskataloge heben hervor, dass durch die Vielzahl unterschiedlicher Systeme und Unfallszenarien eine abschliessende Aufzählung von Sicherheitsmassnahmen äusserst schwierig ist und zurzeit lediglich Hilfestellungen beim Erkunden und Vorgehen geleistet werden können (vgl. [19]; [23]).

Gefährdungen	Mögliche Sicherheitsmassnahmen
<p>Elektrische Gefährdungen: Stromschläge, Lichtbögen</p> <p>➡ Folgen: Verbrennungen (äussere und innere), Schädigung der Augen, Herzrhythmusstörungen, Herzstillstand, Atemstillstand, Tod</p> <p>Chemische Gefährdungen durch gesundheitsgefährdende Stoffe</p> <p>➡ Folgen: Verätzungen, Reizungen, Gesundheitsschädigungen durch toxische Dämpfe oder austretende Elektrolyt-Lösungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fahrzeuge mit Hochvoltssystemen identifizieren: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Typenbezeichnung orten, z.B. Hybrid, Electric Drive, etc. ▪ Ohne Bezeichnung dienen folgende Merkmale als Hinweise: Elektrischer Ladeanschluss, orangefarbene Hochvoltleitungen, Warnkleber an elektrischen Komponenten, Ladeanzeige, Kennzeichnungen auf der Instrumententafel, unter Umständen fehlende Abgasanlage. ▪ Rettungskarten der diversen Fahrzeugmarken konsultieren (falls vorhanden, mittels QR-Code abrufbar oder unter www.rettungskarte.ch). ▪ Erkennung via Nummernschild. ■ Berühren des Fahrzeugs verhindern. Bereich absperren, Fahrzeug kennzeichnen und Beteiligte warnen. ■ Dreifachen Brandschutz erstellen (Wasser, Schaum, Pulver). ■ Zündschlüssel abziehen und aus dem Fahrgastraum entfernen. ■ Fahrzeug gegen Wegrollen sichern (grosse Keile verwenden). ■ 12-Volt-Batterie abklemmen und Pole isolieren. ■ Hochvoltsystem spannungsfrei schalten, gemäss Herstellerangaben und/oder Rettungskarte. ■ Zustand der Hochvoltbatterie auf mechanische Beschädigung überprüfen und Wärmeentwicklung mit Wärmebildkamera festhalten. ■ Hochvoltkabel und -komponenten nicht ungeschützt berühren. ■ Bergungspersonal im Umgang mit Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen schulen. ■ Geeignete persönliche Schutzausrüstungen (PSA) tragen (siehe S. 19). ■ Bei der Übergabe an Dritte, die eingeleiteten Massnahmen mitteilen und schriftlich bestätigen lassen (Übergabeprotokoll unter: www.stadt-zuerich.ch > Polizeidepartement > Schutz und Rettung > Fort- und Weiterbildung > Downloads). ■ Fahrzeuge mit beschädigter Batterie zum nächstgelegenen Fachbetrieb transportieren und wenn möglich entladen lassen. Ständige Kontrolle auf Temperaturerhöhung mittels Wärmebildkamera.
<p>Brandgefährdungen durch Auslaufen brennbarer Flüssigkeiten</p> <p>➡ Folgen: Verbrennungen, Gesundheitsschädigungen durch toxische Rauchgase</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Brandrauch und Brandgase nicht einatmen. Atemschutzgerät verwenden. ■ Feuer vorzugsweise mit Wasser löschen (wirkt kühlend auf Hochvolt-Energiespeicher und als Löschmittel). Abstandsregel: 3m Sprühstrahl, 5m Vollstrahl einhalten.

Abbildung 10 Umgang mit verunfallten oder beschädigten Elektrofahrzeugen ([32])

3 Methodik

Im Kontext der sich rasant verändernden Mobilität und der zunehmenden Tendenz, in urbanisierten Räumen den Verkehr aus Platzgründen in unterirdische Infrastrukturen zu verlagern, stellt sich unweigerlich die Frage nach der Sicherheit. Weil der aktuelle Stand der Forschung diesbezüglich noch keine abschliessende Antwort zu liefern vermag und weil bis anhin die praktische Erfahrung im Umgang mit batterieinduzierten Grossschadenergebnissen klein ist, wurde das vorliegende Forschungsprojekt initiiert. Ziel war, die von einer brennenden Elektrofahrzeugbatterie ausgehenden Gefährdungen in einem Strassentunnel experimentell und nach wissenschaftlichen Grundsätzen zu untersuchen (vgl. Tabelle 5). Die Erkenntnisse der durchzuführenden Versuche sollten schliesslich eine systematische Folgenabschätzung für zukünftige Personenwagenbrände in Strassentunneln ermöglichen (vgl. Kapitel 1.2).

Tabelle 5 Wissenschaftliche Grundsätze des Experiments

Grundsatz	Beschreibung
Transparenz	Aufbau, Methodik und Durchführung des Versuchs müssen transparent dokumentiert werden.
Validität	Die Ergebnisse müssen zutreffende und belastbare Aussagen zulassen.
Objektivität	Die Ergebnisse müssen unabhängig von den Messbedingungen sein.
Reliabilität	Die Messungen müssen zuverlässig und genau sein.

Die experimentelle Situation musste so hergestellt werden, dass die relevanten Messgrößen (abhängige Variablen) ohne Beeinträchtigungen erhoben werden konnten. Um beeinflussende Faktoren, wie zum Beispiel produktspezifische Schutzvorkehrungen an den Batteriesystemen möglichst auszuschliessen, wurden im Experiment einzelne Module einer Elektrofahrzeugbatterie ohne überwachendes Batteriemanagementsystem und ohne schützendes Batteriegehäuse untersucht.

Dieser Aufbau bedingte, dass die Versuchsergebnisse anschliessend bis auf die Fahrzeugebene skaliert (vgl. Abbildung 11), plausibilisiert und in Bezug zu realen Tunnelereignissen gestellt werden mussten. Die Signifikanz der Resultate konnte durch diese Versuchsanordnung erhöht werden, weil die erhobenen Messdaten ausschliesslich auf den Energiespeicher eines Elektrofahrzeugs zurückgeführt werden konnten und nicht durch weitere Faktoren verfälscht wurden.

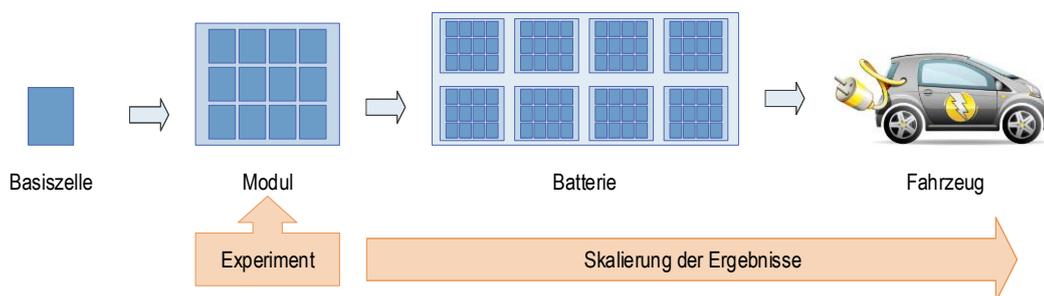


Abbildung 11 Experimentebene und Skalierung der Ergebnisse

3.1 Versuchsmaterial

Das Forschungsprojekt war auf die Analyse grösstmöglicher Brandgefährdungen (engl. *worst case*) eines Elektrofahrzeugbrandes ausgerichtet. Dabei war es wichtig, dass im Experiment keine exotischen Elektrofahrzeuge (Bsp. Konzeptfahrzeuge) oder zukünftige Batterietechnologien (Bsp. Feststoffbatterien) untersucht wurden, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht markttauglich sind. Für die Auswahl des Versuchsmaterials standen aus diesen Gründen Batterien für gängige Elektropersonenwagen der Mittelklasse (Stand 2017) mit reinem Elektroantrieb im Fokus, d.h. keine Hybride (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6 Eigenschaften eines typischen Elektropersonenwagens (Stand 2017)

Merkmal / Kenngrösse	Beschreibung
Fahrzeugtyp	(Reines) Elektrofahrzeug, Pkw (≠ Lkw)
Drehmoment	Ca. 250 Nm
Leistung	Ca. 80 kW
Batterieenergie	>20 kWh (wieder aufladbar)
Stromverbrauch	Ca. 15 kWh/100 km
Reichweite	Ca. 200 km

Als wieder aufladbare Energiespeicher eines solchen Fahrzeugs zählen aktuell – und voraussichtlich auch in Zukunft – vor allem Basiszellen mit Lithium-Ionen zu den vielversprechendsten Technologien (vgl. Kapitel 2.1.1). Die Selektion des Versuchsmaterials wurde folglich auf Lithium-Ionen-Batterien eingegrenzt, die mit ihrer Vielzahl von Materialkombinationen die Basis für die meisten elektrifizierten Antriebe aller Art bilden. Für das Experiment wurden schliesslich Batteriemodule eines reinen Elektrofahrzeugs beschafft, das auf schweizerischen Strassen zugelassen und vergleichsweise häufig anzutreffen ist und daher als typisches Beispiel bezeichnet werden kann (Stand 2017). Das Batteriesystem dieses Elektrofahrzeugs war zum Zeitpunkt des Experiments durch die folgenden Eigenschaften charakterisiert (vgl. Tabelle 7):

Tabelle 7 Eigenschaften des untersuchten Fahrzeugbatteriesystems

Merkmal / Kenngrösse	Beschreibung
Batterieart	Sekundärbatterie = Akkumulator ("Akku", wiederaufladbar)
Basiszelle	Lithium-Ionen-Akku
Zelltyp	Prismatische Zelle
Anzahl der Zellen	96 Zellen (60A) in 8 Modulen
Elektrodenaktivmasse	Anode: Graphit Kathode: Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid ⁵
Elektrolyt	Lithiumhexafluorophosphat LiPF ₆
Nominalspannung (Zellen / Batterie)	3.67 / 353 V
Ladeschlussspannung (Zellen / Batterie)	4.1 / 393 V
Energie (brutto / netto)	33.182 / 27.2 kWh
Gewicht	230 kg
Spezifische Energie (brutto / netto)	0.14 / 0.12 kWh/kg
Thermisches Durchgehen	Ab 210°C typisch. Hohe Ladungen sind begünstigend.

⁵ Dieser Batterietyp wird aufgrund des Kathodenmaterials auch als «NMC-Batterie» bezeichnet (Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid)

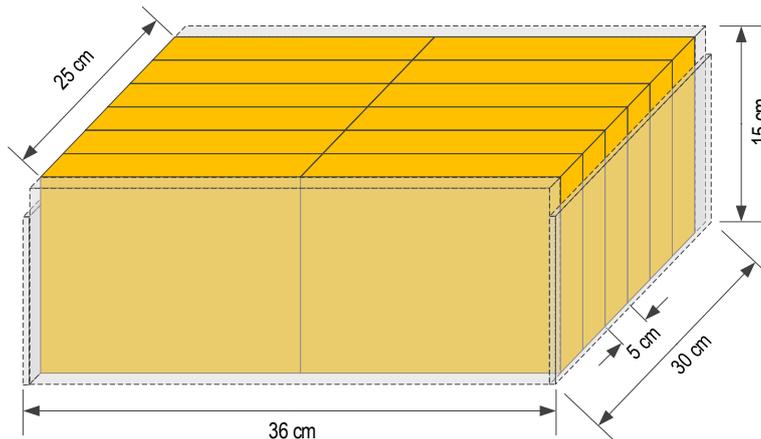


Abbildung 12 Schematische Darstellung des untersuchten Batteriemoduls mit 12 Zellen (orange) und stabilisierendem Aluminiumrahmen (grau transparent)

Die im Experiment verwendeten Batteriemodule waren vollständig gebrauchstaugliche und neuwertige Bestandteile des zugelassenen Elektrofahrzeugs. Sie wurden durch den Fahrzeugmarkenvertreter aus Sicherheitsgründen mit einem Ladezustand von <60 % angeliefert und in geeigneten Räumlichkeiten bis zu den Versuchen gemäss aktuellen Empfehlungen gelagert (vgl. [70]).

Damit in den Versuchen grösstmögliche Brandeffekte bewirkt werden konnten, wurden die Batteriemodule für das Experiment vollständig aufgeladen. Weil das den Ladevorgang überwachende Batteriemanagementsystem ausgebaut war, mussten die einzelnen Zellen der Module separat auf die vorgesehene Schlussspannung von 4.1 Volt aufgeladen werden (Ladezustand >95%, vgl. [26]). Während der Versuche waren in einem Batteriemodul somit 4.15 kWh (brutto) chemisch gespeicherte Energie enthalten; bei einem Gewicht von je 28.75 kg entspricht das einer Energiedichte von rund 0.14 kWh/kg.

3.2 Messkonzept

Messgrössen und -methoden

Im Falle eines Brandes mit Elektrofahrzeugbeteiligung ist abgesehen von den herkömmlichen Brandgasen (Bsp. CO, CO₂ etc.), die gemäss diverser Studien in vergleichbarem Ausmass auftreten (vgl. [25]; [51]), vor allem die Bildung von neuartigen, hoch toxischen Schadstoffen entscheidend (vgl. Kapitel 2.1.2). Wegen dieses theoretisch erwartbaren Unterschieds zu konventionellen Fahrzeugbränden, sowie aufgrund der bisherigen, teils unterschiedlichen Erkenntnisse in der Forschungsliteratur, wurde der Schwerpunkt im Experiment speziell auf die Schadstoffanalyse gerichtet. Daneben wurden thermische Grössen gemessen und visuellen Charakteristiken der provozierten Batteriebrände mit Video aufgezeichnet. Elektrische Gefährdungen (Bsp. durch unter Spannung stehende Fahrzeugteile) standen nicht im Fokus des vorliegenden Forschungsprojektes, da sie während eines Elektrofahrzeugbrandes für den Tunnelbetrieb nur eine untergeordnete Rolle spielen. Erste Erfahrungen haben gezeigt, dass sie erst bei der Ereignisbewältigung und bei der späteren Bergung von Elektrofahrzeugwracks durch die betroffenen Dienste relevant werden und in die Betrachtungen miteinbezogen werden müssen.

Die Gasentnahme sowie die Aerosolmessung erfolgten im Stollen auf ca. 1.5 m über Boden (vgl. Abbildung 13). Die kontinuierlich registrierenden Messgeräte wurden in einer Seitenkammer des Stollens aufgestellt. Sämtliche Messgrössen, die mit dem Experiment analysiert wurden sowie die dafür erforderlichen Methoden und Unsicherheiten sind in Tabelle 8, Tabelle 9, Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgeführt. Es wurden ausschliesslich messtechnische Einrichtungen und Geräte eingesetzt, die aus akkreditierten Laborbereichen stammen und sich innerhalb des vom Hersteller angegebenen Kalibrationszyklus befanden.



Abbildung 13 Standort der Schadstoffmessungen mit Probenahmebereich (links) und Lokalisation im Stollen (rechts)

Table 8 Messgrößen während des Experiments

Messgröße	Messprinzip / Vorgehen	Methode ⁶
Ablufttemperatur	Thermoelektrizität / kontinuierlich	Kap. 3.1.3
Strömungsgeschwindigkeit	Differenztemperaturanemometrie / kontinuierlich	Kap. 3.1.3
Kohlenmonoxid CO	Nicht-dispersive Fotometrie im IR Bereich / kontinuierlich	Kap. 6.3.6
Kohlendioxid CO ₂	Nicht-dispersive Fotometrie im IR Bereich / kontinuierlich	Kap. 6.3.5
Stickoxide NO und NO ₂	Chemilumineszenz / kontinuierlich	Kap. 6.3.7
Luftdruck	Dosenbarometer	
Anorganische Fluorverbindungen angegeben als HF	Absorption in H ₂ O; F ⁻ -Analyse mittels ionenselektiver Fluoridelektrode / diskontinuierlich	Kap. 6.4.4
Anorganische staubgebundene Fluorverbindungen angegeben als F ⁻ (F ⁻ -Aerosol)	Planfilter mit Quarzglasfilter / Extraktion des Filters mit Wasser und F ⁻ -Analyse mittels ionenselektiver Fluoridelektrode / diskontinuierlich (DIN 38405-4)	---
PH ₃	Umsetzung von PH ₃ mit HgCl ₂ zu HCl; Detektion des HCL mit einem pH-Indikator /diskontinuierlich / orientierend (Dräger PH3 0.01/a)	
PO ₄ ³⁻ als H ₃ PO ₄	Absorption in H ₂ O; PO ₄ ⁻ -Analyse mittels Ionenchromatographie/ diskontinuierlich	
VOC / Aromate	Adsorption auf TENAX TA, thermische Desorption und anschließende Analytik mittels GC-MS / diskontinuierlich	Kap. 7.4.3
Metalle staubgebunden	Staubabscheidung auf einem Quarzglasfilter / Säureaufschluss des Filters und anschließende Analytik der Metalle mittels AAS/ diskontinuierlich	Kap. 5.2
rel. Abluftfeuchte	Kapazitiv	

Table 9 Messanordnung

Anordnung	Gilt für
Entnahme eines Teilvolumenstromes mittels unbeheizter Teflonleitung über einen Feststofffilter (Teflonmembranfilter).	CO, CO ₂ , NO, NO ₂
Entnahme eines Teilvolumenstromes und Staubabscheidung auf einem Planfilter	Schwermetalle, F-Aerosol,
Entnahme eines Teilvolumenstromes und Adsorption auf TENAX TA	VOC / Aromate
Entnahme eines Teilvolumenstromes und Absorption in Gaswasch-flaschen	HF, H ₃ PO ₄

⁶ Nach den Empfehlungen über die Emissionsmessungen von Luftfremdstoffen von stationären Anlagen; Bundesamt für Umwelt BAFU, Stand 2013 ([7])

Tabelle 10 Messgeräte

Messgrösse	Hersteller
Ablufttemperatur	Rotronic
Strömungsgeschwindigkeit	TSI
CO	Horiba
NO / NO ₂	Horiba
CO ₂	Acontec AG (Eigenbau)
Luftdruck	Thommen
Feuchte	Rotronic

Tabelle 11 Prüfgase

Messgrösse	Prüfgase
NO	300 pppv in N ₂
CO	9.99 ppmv in N ₂
CO ₂	2511 ppmv in N ₂

Messunsicherheit

Gemäss den Empfehlungen des BAFU über die Emissionsmessungen von Luftfremdstoffen von stationären Anlagen ([7]), eigenen Berechnungen und der Beurteilung der Gegebenheiten vor Ort, wurden folgende relativen Messunsicherheiten (u_{rel}) angenommen:

Tabelle 12 Relative Messunsicherheiten

Komponente	Messunsicherheit	Bestimmungsgrenze
Gasgeschwindigkeit	± 10%, mindestens 0.05 m/s	0.02 m/s
HF	± 20%, mindestens ± 0.05 mg/m ³	0.03 bzw. 0.01 mg/m ³
H ₃ PO ₄	± 20%, mindestens ± 0.05 mg/m ³	0.03 bzw. 0.01 mg/m ³
F- feststoffgebunden	± 15%, mindestens ± 0.5 mg/m ³	0.5 mg/m ³
Stollenabmessung	± 30 cm	
Kohlendioxid	± 15%, mindestens ± 1 mg/m ³	
Kohlenmonoxid	± 10%, mindestens ± 0.05 mg/m ³	0.02 mg/m ³
Luftdruck (Barometer)	± 3 mbar	
Schwermetalle	± 15%, mindestens ± 1 mg/m ³	1 mg/m ³
Stickoxide	± 10%, mindestens ± 0.005 mg/m ³	0.001 mg/m ³
Temperatur	± 0.5°C	
Wasser	± 10%, mindestens 0.2%-Vol.	0.1 %-Vol.
VOC (Aromate)	± 25%, mindestens 0.002 mg/m ³	0.002 mg/m ³

3.3 Versuchsszenarien

Damit ein Batteriebrand entsteht, muss die Batterie thermisch durchgehen. Dabei verlässt die Batterie ihren stabilen Betriebsbereich, sodass eine sich selbstverstärkende, exotherme chemische Reaktion ausgelöst wird, die schlussendlich zur Zerstörung der Batterie mit hoher Energieentfaltung (Brand) führt. Dieses thermische Durchgehen einer Elektrofahrzeugbatterie kann ganz unterschiedliche Gründe haben (vgl. Kapitel 2.1.2), die aber hinsichtlich der aktuellen Fragestellung zur Tunnelsicherheit nicht alle relevant sind.

Weil Elektrofahrzeuge in Strassentunneln typischerweise nicht geladen werden, sind Batteriebrände aufgrund von falschen Ladeprozessen oder Handhabungen (Überladung bzw. Tiefentladung und elektrische Kurzschlüsse) aktuell keine realistischen Szenarien. Sie wurden durch das vorliegende Forschungsprojekt nicht berücksichtigt. Ebenso wurden Brandursachen, die in Zusammenhang mit der Produktqualität stehen (interne Kurzschlüsse aufgrund von Zellfehlern) nicht genauer untersucht. Mögliche Brandszenarien in Strassentunneln mit Beteiligung eines Elektrofahrzeugs sind somit mechanische Beschädigungen ("Crash") und thermische Beanspruchung ("Brand") von Batterien.

Tabelle 13 Hauptszenarien für das Experiment

Szenario	Beschreibung	Testziel
Crash	Eine Kollision mit Beteiligung eines Elektrofahrzeuges oder ein Fremdkörpereinschlag führen zur mechanischen Beschädigung einer Li-Ionen-Batterie	Maximale Beschädigung bis zur Auslösung eines thermischen Durchgehens
Brand	Ein Brand im Strassentunnel - verursacht durch anderes Fahrzeug oder durch das Elektrofahrzeug selber - führt zur thermischen Beschädigung einer Li-Ionen-Batterie	

Diese Hauptszenarien wurden dem Experiment zugrunde gelegt und in den einzelnen Versuchen leicht variiert (Bsp. Kollision mit struktureller oder mit penetrierender Beschädigung der Batterie). Insgesamt wurden vier Versuche mit vier identischen Modulen durchgeführt, die auf unterschiedliche Arten beschädigt und zum thermischen Durchgehen gebracht wurden. Der genaue Hergang der Batteriebeschädigung und dessen Eintretenswahrscheinlichkeit (Bsp. Kollision von vorne oder hinten) wurden indessen nicht weiter definiert: Ziel war bei allen Testszenarien, die maximale Beschädigung der Batteriemodule und ein dadurch ausgelöstes thermische Durchgehen herbeizuführen (vgl. Tabelle 13).

3.3.1 Mechanische Beschädigung

Mit dem Hauptszenario «Crash» wurden Gefährdungen untersucht, die durch Fremdkörpereinwirkungen auf ein Elektrofahrzeug im Strassentunnel auftreten können, sofern dabei die Batterie durch mechanische Kräfte maximal beschädigt wird (*worst case*). Diese Grundannahme machte es erforderlich, dass im Experiment jeweils alle 12 Zellen eines Batteriemoduls gleichzeitig beschädigt werden mussten. Es sollte möglichst eine gemeinsame Reaktion aller Zellen provoziert und ein verzögertes Abreagieren einzelner Zellen (Kettenreaktion) vermieden werden. Insgesamt wurden drei Versuche mit unterschiedlichen mechanischen Beschädigungen durchgeführt, wobei jeweils ein identisches, neuwertiges und voll aufgeladenes Batteriemodul verwendet wurde. Es wurden die Auswirkungen einer Penetration (Versuch 1), einer stumpfen Beschädigung (Versuch 2) und eines Fremdkörperdurchschlags (Versuch 3) untersucht.

Die erforderlichen Kräfte für die mechanischen Beschädigungen der Batteriemodule wurden mit sprengtechnischen Methoden herbeigeführt – die Batterien wurden aber nicht gesprengt. Je nach Versuch erfolgte die Krafteinwirkung über eine Stahlplatte, auf der eine ausreichende Sprengladung zur Beschleunigung in Richtung Batteriemodul angebracht war oder durch ein penetrierendes Geschoss. Die optimalen Sprengstoffmengen für die Szenarien wurden in spezifischen Vorversuchen ermittelt. Die Abschätzung der durch die Sprengungen erzeugten Krafteinwirkungen auf die Batteriemodule erfolgte mittels Scha-

densbildvergleichen anhand von Dummies. Dazu wurden Holzblöcke mit den genauen Dimensionen der Batteriemodule mit den vorgesehenen Methoden mechanisch beschädigt, indem unter die Stahlplatte zwei Stahlringe (6 cm Durchmesser und 5 cm Höhe) platziert wurden. Die erzeugten Schadensbilder an identischen Dummies in einer hydraulischen Presse nachgebildet. Bei Erreichung eines vergleichbaren Abdruckbildes wurde die entsprechende Belastungskraft dokumentiert.



Abbildung 14 Schadensbild eines Holzblocks aus einem Vorversuch

Versuch 1

Zur Untersuchung eines penetrierenden Fremdkörpers wurde einem auf dem Untergrund festgeschraubten Batteriemodul lose eine Stahlplatte (38 cm x 27 cm x 2 cm) direkt aufgelegt, auf deren Unterseite über die gesamte Länge zwei 8 cm lange Stahlkeile (8 cm x 27 cm x 0.8 cm) befestigt waren (vgl. Abbildung 15). Auf der Oberseite der Stahlplatte waren zweimal je 100 g Sprengschnur (Detonex, 40 g/m) fest angebracht. Durch die simultane Detonation beider Sprengladungen beschleunigte sich die Stahlplatte in Richtung des Batteriemodules. Dadurch drangen die auf der Unterseite fixierten Keile gleichmässig in die beiden Zellenreihen des Batteriemodules ein, wo sie verblieben und elektrische Kurzschlüsse bewirkten.

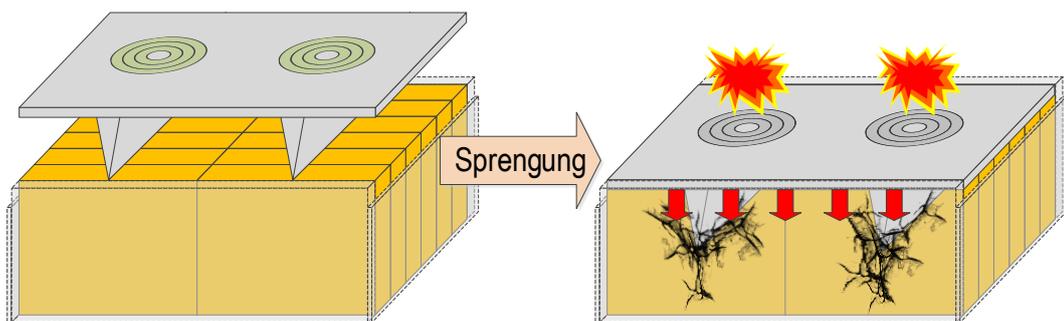


Abbildung 15 Keilförmige Penetration: Batteriemodul (orange) und aufliegender Stahlplatte mit Keilen (grau) mit Sprengschnur (grün) vor und nach der Krafteinwirkung (rot)

Versuch 2

Für die Analyse einer stumpfen Krafteinwirkung wurde dem Batteriemodul wiederum eine Stahlplatte (38 cm x 27 cm x 2 cm) direkt aufgelegt (vgl. Abbildung 16). Auf deren Oberseite waren erneut zweimal je 100 g Sprengschnur (Detonex, 40 g/m) fest angebracht. Durch die simultane Detonation der beiden Sprengladungen beschleunigte sich die Stahlplatte in Richtung des Batteriemodules und löste eine Krafteinwirkung von ca. 23 t (≈ 225 kN) auf dieses aus. Das Batteriemodul erfuhr dadurch vollflächig einen stumpfen Schlag, sodass

eine durchgehende, strukturelle Schädigung sämtlicher Zellen aufgrund von Druck ohne Penetration erzeugt werden konnte.

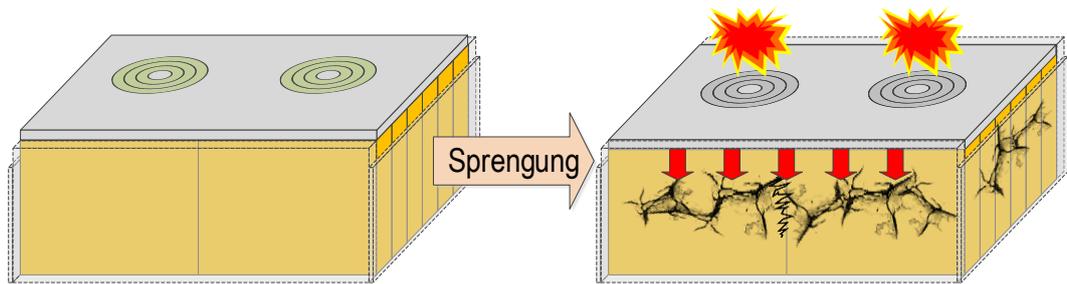


Abbildung 16 Stumpfer Schlag: Batteriemodul (orange) und direkt aufliegender Stahlplatte (grau) mit Sprengschnur (grün) vor und nach der Krafteinwirkung (rot)

Versuch 3

Für die Auswirkungsanalyse eines Fremdkörperdurchschlags, wurde das Batteriemodul mit einer projektilbildenden Kupferladung (engl. *explosively formed projectile, EFP*) zentral aus 10 cm Entfernung beschossen (vgl. Abbildung 17). Dadurch sollten beide Zellreihen gleichmässig beschädigt und eine zentrale, durchgängigen Penetration aller 12 Zellen mit hoher Oberflächenvergrößerung bewirkt werden.

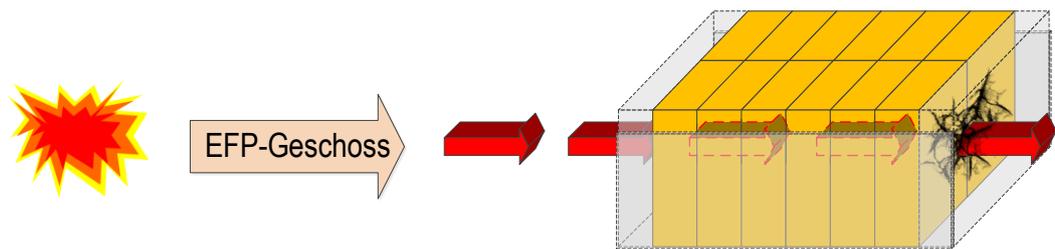


Abbildung 17 Zentraler Durchschuss: Batteriemodul (orange) wird zentral und durchgehend von einem Kupfergeschoss penetriert (rot)

3.3.2 Thermische Beschädigung

Mit dem Hauptszenario «Brand» wurden Gefährdungen untersucht, die bei einem Brand im Strassentunnel – verursacht durch ein anderes Fahrzeug oder durch das Elektrofahrzeug selber – entstehen können, sofern dabei die Batterie durch die thermischen Einflüsse maximal beschädigt wird (*worst case*). Diese Grundannahme machte es erforderlich, dass im Experiment alle 12 Zellen eines Batteriemoduls gleichmässig bis zum thermischen Durchgehen erwärmt werden mussten. Es wurde ein Versuch (Versuch 4) mit einem neuwertigen und voll aufgeladenen Batteriemodul durchgeführt.

Versuch 4

Für die Analyse der Auswirkungen einer durch Wärme provozierten Batterieschädigung, wurde das Batteriemodul mit einem Propangasfeuer gleichmässig unterfeuert, bis das Modul Feuer fing. Danach wurde die Brandquelle entfernt und das thermische Durchgehen der Batterie beobachtet. Dieses Brandszenario wurde in ähnlicher Form bereits in vergleichbaren Studien durchgeführt (vgl. [25]; [51]) und dient deshalb unter anderem auch als Referenzszenario für die Versuche.

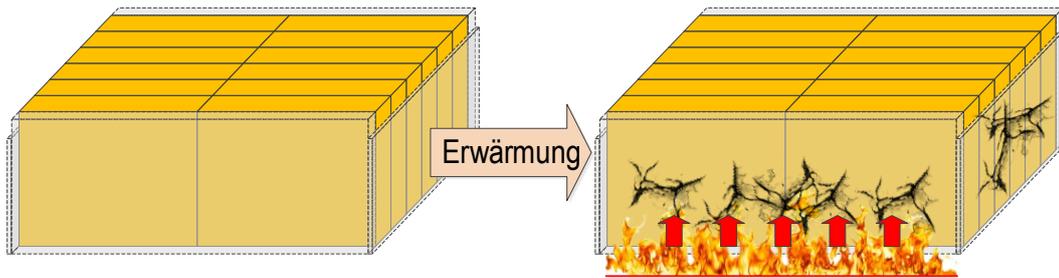


Abbildung 18 Thermische Beanspruchung: Batteriemodul (orange) vor und nach der thermischen Einwirkung mittels eines Propangasbrenners (rot)

3.4 Versuchsaufbau

Die Belastungstests wurden in den Versuchsanlagen der Versuchsstollen Hagerbach AG (VSH) durchgeführt. Die dortigen unterirdischen Anlagen bieten eine reale Umgebung für Brandversuche mit einem Tunnelbezug und ermöglichen im Gegensatz zu Modellversuchen, Simulationen oder Labors die Möglichkeit, Versuche im Massstab 1:1 und gemäss den geltenden Sicherheitsanforderungen durchzuführen.

3.4.1 Versuchsraum

Für eine sichere und umweltschutzgerechte Durchführung des Experiments wurden zwei grundsätzlich verschiedene Umgebungsprofile benötigt: ein Versuchsbereich und ein Entsorgungsbereich (vgl. Abbildung 19).

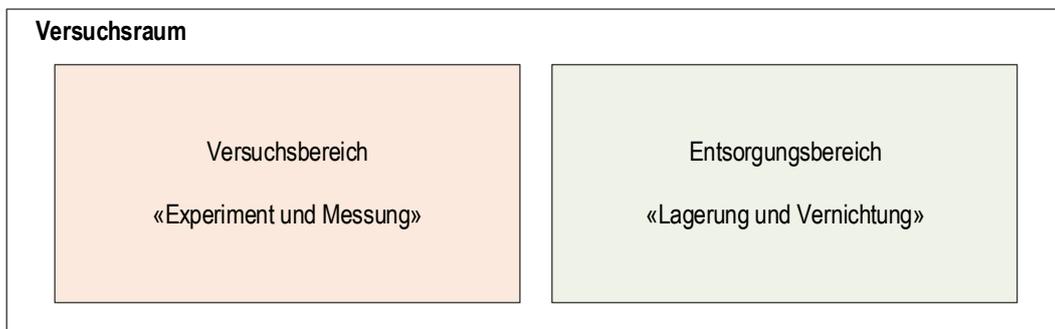


Abbildung 19 Struktur des Versuchsraumes

Versuchsbereich

An diesem Standort fanden sämtliche Versuche statt, an denen hohe kinetische und thermische Energien freigesetzt und chemische Analysen durchgeführt wurden. Der Standort verfügte insgesamt über einen variierenden Querschnitt von 56 m² am Versuchsplatz und 43 m² am Messstandort und zeichnete sich durch die folgenden Eigenschaften aus:

- Reale Umgebung eines Strassentunnels
- Explosions sichere und rauchunempfindliche Umgebung
- Belüftungssteuerung möglich (700 U/min oder 1000 U/min)
- Rauchableitung ins Freie möglich



Abbildung 20 Versuchsbereich (links) und darauffolgender Brandstollen (rechts)

Der Versuchsbereich musste während des gesamten Experiments aus Sicherheits- und Messgründen konstant belüftet sein. Damit der Luftstrom kontrolliert und eine Verdünnung der Abluft nach dem Versuchsbereich ausgeschlossen werden konnte, wurde der in Abbildung 21 eingezeichnete Bypass (rosa) zur Hauptbelüftungsstrecke (blau) während sämtlichen Versuchen mit einem Tor verschlossen. Die Messungen der Schadstoffkonzentrationen sowie der Strömungsgeschwindigkeiten in der Hauptbelüftungsstrecke konnten somit abschliessend und verlässlich bestimmt werden. Sowohl der Messstandort für die Luftschadstoffe als auch der treibende Ventilator befanden sich im Brandstollen direkt nach dem Versuchsbereich (vgl. Abbildung 21). Der Ventilator für die Regelung der Luftströmungen wurde in der Mitte des Brandstollens platziert und sorgte für eine konstante, homogenisierte Luftströmung mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 1.0 – 1.5 m/s.

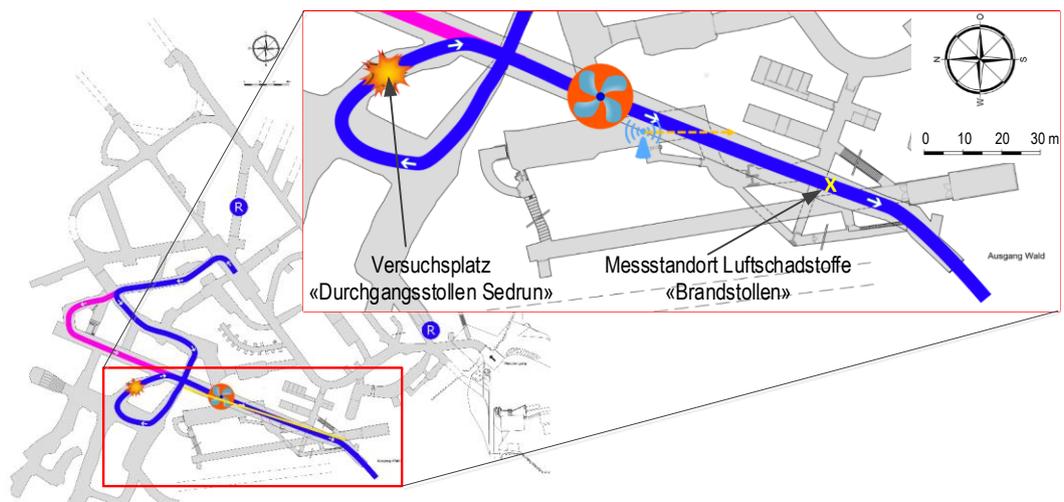


Abbildung 21 Grundriss des Versuchsbereichs: Versuchsbereich (Explosion), Hauptbelüftungsstrecke (blau) mit Bypass (rosa), Ventilator und Messstandort (gelb)

Entsorgungsbereich

Für die sichere und überwachbare Entsorgung der beschädigten Batteriemodule, wurde ein vom Versuchsbereich abgetrennter Entsorgungsbereich im VSH eingerichtet. An diesem Standort wurden die abreagierten Batteriebestandteile nach den erfolgten Versuchen auf allfällige Restgefährdungen überprüft (Bsp. Wiederentzündung, Restspannungen etc.) und bis zur fachgerechten Entsorgung gelagert und überwacht. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse wurden mit Blick auf den Umgang von havarierten Li-Ionen-Batterien nach einem Ereignis dokumentiert. Der Entsorgungsbereich zeichnete sich durch die folgenden Eigenschaften aus:

- Vorhandensein eines fahrzeuggetriebenen Schaufelshredders
- Bereich ohne entzündbare Materialien
- Einfacher Zugriff mit Löschmitteln möglich

- Befestigter Untergrund
- Bereich absperbar

3.4.2 Sicherheit und Umwelt

Die von den Belastungstests ausgehenden kinetischen, thermischen und chemischen Gefährdungen für das Versuchspersonal konnten mit angemessenen Sicherheitsvorkehrung ausgeschlossen werden. Die Sicherheit für Personen und Umwelt wurde während des gesamten Experiments in Anlehnung an einschlägige internationale Standards zu jeder Zeit gewährleistet (Bsp. ISO 45001).

Sicherheitszonen

Während den Versuchen wurden drei verschiedene Sicherheitszonen, analog zur Zonenbildung von Einsatzkräften bei besonderen Ereignissen, definiert (vgl. Tabelle 14). Alle Personen in den Zonen 0, 1 und 2 mussten geeignete, signalfarbene Arbeitskleidung, Sicherheitsschuhe (min. S3), Helm, Schutzbrille und Schutzhandschuhe tragen.

Tabelle 14 Sicherheitszonen während des Experiments

Zone	Beschreibung
0	Bereiche, die direkt oder indirekt von Splintern getroffen werden können, die grosser Hitze oder Feuer ausgesetzt sein können, oder, die stark konzentrierte Emissionen (Rauch) des Versuchs enthalten können. Während der Versuchsdurchführung dürfen sich keine Personen darin aufhalten.
1	Bereiche, die mit Umgebungsluft verdünnte Emissionen (Rauch) des Versuchs enthalten. Während der Versuchsdurchführung dürfen sich nur so viele Personen darin befinden, wie zur Versuchsdurchführung unbedingt benötigt werden. Die Personen müssen mit umgebungsluftunabhängiger Atemschutzausrüstung geschult und ausgerüstet sein. Weitere Schutzausrüstung wird durch die Versuchsleitung situativ festgelegt.
2	Bereiche, die durch die Versuche mit Schalldruck affektiert werden können aber sonst keinen anderen Gefährdungen ausgesetzt sind. Während der Versuchsdurchführung dürfen sich nur Personen darin befinden, die durch die Versuchsleitung autorisiert und entsprechend instruiert wurden. Die Personen müssen mit Gehörschutz ausgerüstet sein.

Explosionsgefahr durch Kontakt einer beschädigten Batterie mit Wasser

Wie in Kapitel 2.1.2 erläutert, reagiert das in den Batterien enthaltene, elementares Lithium im Kontakt mit Wasser (Bsp. Löschwasser) stark exotherm zu Wasserstoff (H_2) und Lithiumhydroxid ($LiOH$). Da von Wasserstoff zusammen mit Sauerstoff (O_2) eine hohe Explosionsgefahr ausgeht, die in abgeschlossenen Räumen aufgrund der fehlenden Luftverdünnung besonders ausgeprägt ist⁷, musste die Akkumulation von H_2 im Versuchsbereich verhindert werden. Dazu wurde einerseits der gesamte Versuchsraum während und auch nach dem Experiment konstant entlüftet. Andererseits wurde im Versuchsstollen kein Wasser als Lösch- oder Kühlmittel für die Batteriemodule vorgesehen – Wasser sollte nur zum Einsatz kommen, wenn es die Situation unbedingt erforderlich gemacht hätte. Brennende Überreste der Batteriemodule wurden nach den Versuchen nicht gelöscht, sondern belassen, bis sie komplett abgebrannt waren. Für Notfälle wurde während des gesamten Experiments auf der Unterseite des Experiments (Frischlufstrom) 1 m³ feuchter Sand in einer Baggerschaufel bereitgestellt, die bei Bedarf unter Atemschutz über die brennende Batterie hätte gekippt werden können.

Entsorgung von havarierten Batteriemodulen

Die Überreste der Batteriemodule wurden nach den Versuchen unschädlich gemacht, indem die übriggebliebenen Batteriemodule mittels eines fahrzeuggetriebenen Schaufelredders in Teile von <4 cm zerkleinert wurden. Potentiell reaktive Überreste der Batteriemodule wurden bis zur endgültigen Entsorgung durch speziell geschultes Personal beobachtet.

⁷ Wasserstoff ist bei einem Volumenanteil zwischen 4 und 77 % explosiv.

4 Resultate

Die Versuche wurden am 27. und am 28. November 2017 im Versuchsstollen Hagerbach nach dem in Tabelle 15 dokumentierten Programm und gemäss dem vorgängig erstellten Versuchskonzept durchgeführt. Die Messungen wurden jeweils zum Zeitpunkt der Beschädigung begonnen («Start») und nach dem vollständigen Abreagieren der Batteriemodule beendet («Ende»).

Versuch 3 stellt in diesem Zusammenhang ein Sonderfall dar: mit dem Durchschuss der EFP-Ladung wurde lediglich eine Zellreihe des Moduls (d.h. 6 Zellen anstatt der 12 Zellen) getroffen und es konnte somit nicht wie geplant eine vollständige Reaktion aller Zellen herbeigeführt werden. Weil dieser Umstand während des Versuchs aus Sicherheitsgründen nicht verifiziert werden konnte, wurden die Messungen nach dem Abreagieren der getroffenen Zellreihe gestoppt. Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera bestätigten im Anschluss, dass die nicht beschossene Zellreihe bis zu diesem Zeitpunkt innerlich unbeschädigt und kaum erwärmt war (vgl. Abbildung 30). In den Messungen ist nur die Reaktion der ersten Zellreihe berücksichtigt.

Bei den in den dargestellten Resultaten handelt es sich um die Mittelwerte über die in Tabelle 15 aufgeführten Messdauern. Sie sind mit den relativen Messunsicherheiten gemäss Tabelle 12 zu interpretieren.

Tabelle 15 *Versuchsprogramm*

Versuch	Datum	Start	Ende	Dauer
1 («Keil»)	27.11.2017	16:20	16:36	16 min
2 («Platte»)	27.11.2017	17:48	18:09	21 min
3 («Durchschuss»)	28.11.2017	10:42	10:58	16 min
4 («Brand»)	28.11.2017	16:34	17:00	26 min

Tabelle 16 *Physikalische Parameter während den Messungen*

Parameter	Versuch 1 («Keil»)	Versuch 2 («Platte»)	Versuch 3 («Durchschuss»)	Versuch 4 («Brand»)
Barometerdruck [mbar]	970	970	961	961
Temperatur [°C]	13.7	13.4	13.3	14.3
Geschwindigkeit [m/s]	1.5	1.4	1.3	1.0
Stollenquerschnitt [m ²]	43	43	43	43
Relative Luftfeuchte [%] ⁸	65	65	65	65
Volumenstrom (b) [m ³ /h]	229'800	228'200	196'000	155'200
Volumenstrom (n,f) [m ³ /h]	209'500	208'300	177'300	139'900
Volumenstrom (n,tr) [m ³ /h]	207'500	206'300	175'600	138'600

Bezugszustände: (b): Betriebsbedingungen; (tr): trocken; (f): feucht; (n): 0°C, 1013 mbar

⁸ Gemessen am 28.11.2017 um 10:22 Uhr

Tabelle 17 Mittlere Konzentrationen 10 Minuten vor den Versuchen

Parameter	Versuch 1 («Keil»)	Versuch 2 («Platte»)	Versuch 3 («Durchschuss»)	Versuch 4 («Brand»)
NO (n,tr) [mg/m ³ _n]	0.004	< 0.002	0.059	0.046
NO ₂ (n,tr) [mg/m ³ _n]	0.005	0.005	0.024	0.019
CO (n,tr) [mg/m ³]	2.1	1.9	1.5	1.5
CO ₂ (n,tr) [mg/m ³]	781	791	826	805

Bezugszustände: (tr): trocken; (n): 0°C, 1013 mbar

Tabelle 18 Konzentrationen

Parameter	Versuch 1 («Keil»)	Versuch 2 («Platte»)	Versuch 3 («Durchschuss»)	Versuch 4 («Brand»)
PH ₃ [mg/m ³]	< 0.02	---	< 0.02	---
F ⁻ als HF (n,tr) [mg/m ³]	0.03	0.06	< 0.03	< 0.01
PO ₄ -P als H ₃ PO ₄ (n,tr) [mg/m ³]	< 0.04	< 0.03	0.35	< 0.02
Co (n,tr) [mg/m ³]	12.0	11.0	5.9	7.5
Li (n,tr) [mg/m ³]	2.8	2.4	1.3	1.9
Mn (n,tr) [mg/m ³]	11.7	10.4	5.7	7.2
F ⁻ Aerosol (n,tr) [mg/m ³]	4.0	3.1	2.1	2.6
NO (n,tr) [mg/m ³ _n]	0.026	0.019	0.061	0.077
NO ₂ (n,tr) [mg/m ³ _n]	0.016	0.009	0.029	0.033
CO (n,tr) [mg/m ³]	4.1	5.3	4.5	4.4
CO ₂ (n,tr) [mg/m ³]	1000	910	890	970
TVOC (n,tr) [mg/m ³] ⁹	0.52	3.80	2.90	0.65
∑ Aromate (n,tr) [mg/m ³] ¹⁰	0.042	0.167	0.100	0.063
Benzol (n,tr) [mg/m ³]	0.030	0.058	0.051	0.036
Toluol (n,tr) [mg/m ³]	0.006	0.021	0.016	0.009

⁹ Für die Gesamtsumme aller quantifizierten Substanzen im analytischen Fenster zwischen n-Hexan (C₆) und n-Hexadecan (C₁₆) wurden alle weiteren im genannten analytischen Fenster nachweisbaren Substanzen mittels Bibliotheksvergleich als Toluoläquivalent berechnet und hinzuaddiert. Für die Zuordnung der Einzelstoffe zu den Retentionszeitbereichen (RT): RT<C₆, RT_{C₆-C₁₆} bzw. RT>C₁₆;≤C₂₂ ist die Analytik auf einer unpolaren Säule zugrunde gelegt. Folgende nachweisbaren Einzelverbindungen wurden nicht berücksichtigt:

- (**RT<C₆**): 1-Propanol, 2-Propanol, 2-Methylpentan, 3-Methylpentan, Aceton, Acrolein, Acrylnitril, Butanal, Dimethylsulfid, Ethanol, Ethylacetat, Isobutyraldehyd, MTBE, Methylacetat, Vinylacetat
- (**RT>C₁₆;≤C₂₂**): Benzophenon, Dibutylphthalat (DBP), Diethylphthalat (DEP), Diisobutylphthalat (DIBP), Diisobutyladipat, Diphenylsulfid, n-Heptadecan, n-Oktadecan, n-Nonadecan, n-Eicosan, n-Heneicosan, n-Docosan, TCEP, Tetradecansäureisopropylester

¹⁰ Summe der im Anhang I.1 aufgeführten Aromaten

Xylol (n,tr) [mg/m ³]	0.002	0.012	0.01	0.004
Styrol (n,tr) [mg/m ³]	0.002	0.058	0.016	0.012

Bezugszustände: (tr): trocken; (n): 0°C, 1013 mbar

Table 19 Maximale gleitende Minutenmittelwerte

Parameter	Versuch 1 («Keil»)	Versuch 2 («Platte»)	Versuch 3 («Durchschuss»)	Versuch 4 («Brand»)
NO (n,tr) [mg/m ³ ,n]	0.074	0.054	0.109	0.142
NO ₂ (n,tr) [mg/m ³ ,n]	0.032	0.017	0.063	0.057
CO (n,tr) [mg/m ³]	9.2	16.4	12.8	8.5
CO ₂ (n,tr) [mg/m ³]	1500	1100	1100	1200

Bezugszustände: (tr): trocken; (n): 0°C, 1013 mbar

Table 20 Fracht / Freisetzungsmengen

Parameter	Versuch 1 («Keil»)	Versuch 2 («Platte»)	Versuch 3 ¹¹ («Durchschuss»)	Versuch 4 («Brand»)
PH ₃ [g]	< 0.4	---	< 0.4	---
F ⁻ als HF [g]	1.1	3.1	< 1	< 0.5
PO ₄ -P als H ₃ PO ₄ [g]	< 1.5	< 1.5	11.3	< 1
Co [g]	457	567	190	364
Li [g]	107	124	42	92
Mn [g]	445	536	184	349
F ⁻ Aerosol [g]	152	160	68	126
NO [g] ¹²	< 1	1.1	< 1	1.5
NO ₂ [g] ¹²	< 1	< 1	< 1	< 1
CO [g] ¹²	76	181	97	141
CO ₂ [g] ¹²	8'500	6'000	2'000	7'800
TVOC [g]	20	196	93	32
Σ Aromate [g]	1.6	8.6	3.2	3.1
Benzol [g]	1.1	3	1.6	1.7
Toluol [g]	0.2	1.1	0.5	0.4
Xylol [g]	0.1	0.6	0.3	0.2
Styrol [g]	0.1	3.0	0.5	0.6

¹¹ In Versuch 3 erfolgte die Messung bzw. Probenahme nur über die Dauer, in der 50% des Moduls zerstört wurde. Vgl. hierzu die einführenden Abschnitte auf Seite 41.

¹² Um die Menge an freigesetztem NO, NO₂, CO und CO₂ berechnen zu können, muss die Grundbelastung der Stollenluft berücksichtigt werden. Aus der Differenz der Belastung während der Messung und der «tages- und wetterabhängigen Vorbelastung» gemäss Tabelle 17 wurden die Fracht bzw. die Freisetzungsmengen berechnet.

4.1 Keilförmige Penetration

Im ersten Versuch wurde beide Zellreihen des Batteriemoduls mit zwei Keilen beschädigt (vgl. Kapitel 3.3.1). Nach der Detonation der beiden Sprengschnüre auf der Oberseite der Stahlplatte, drangen die beiden Keile ca. 5 cm gleichmässig in die Zellen ein und verursachten innere elektrische Kurzschlüsse. Diese führten zu einer sehr raschen Überhitzung der Zellen, die sich bereits 2 Sekunden nach der Beschädigung durch eine heftige, exotherme Reaktion manifestierte (vgl. Abbildung 22). Die Temperaturen erhöhten sich innerhalb des Batteriemoduls innert 3 Minuten kontinuierlich auf über 600 °C; unterhalb des Batteriemoduls wurde ein konstanter Temperaturanstieg auf über 250 °C in 5 Minuten registriert (vgl. Abbildung 25).

In der ersten Minute der exothermischen Reaktion konnte die Bildung grosser Rauchmengen beobachtet werden. Der schwarze Rauch stieg bis an die Tunneldecke und driftete mit dem Luftstrom in einer stabilen Schichtung bis zum treibenden Ventilator im Brandstollen, wo Turbulenzen die Rauchsichten auflösten. Die Rauchemissionen verringerten sich in der Folge sukzessive aufgrund des Verbrennungsprozesses. Die kontinuierlichen Gasmessungen registrierten einen korrespondierenden, schnellen Anstieg der Konzentration von CO, CO₂, NO und NO₂ (vgl. Abbildung 24). Neben diesen typischen Brandemissionen wurden beim untersuchten Lithium-Ionen-Batteriemodul zusätzliche Schadstoffe gemessen (vgl. Tabelle 18 und Tabelle 20), die deshalb relevant sind, weil sie bei Bränden von konventionellen fossilen Treibstoffen nicht auftreten (vgl. Diskussion in Kapitel 5.1). Die diskontinuierlichen Messungen deuten insbesondere auf erhöhte Mengen der beiden toxischen Schwermetalle Co und Mn sowie Li in Form von Aerosolen hin. Wider den Erwartungen wurden keine grösseren Mengen HF gemessen (vgl. Kapitel 6.1)

Die sehr heftige mechanische Beschädigung aller Zellen führte zu einem beinahe gleichzeitigen thermischen Durchgehen aller Zellen mit teilweise spektakulären thermischen (Stichflammen) und akustischen (Zischen, leichtes Knallen) Effekten. Diese schnellen Verbrennungsvorgänge werden typischerweise als Deflagrationen (auch Verpuffungen) bezeichnet – es wurden zu keiner Zeit Explosionen beobachtet. Die Energiefreisetzung des gesamten Moduls erfolgte äusserst schnell und ohne bemerkbare Kettenreaktion einzelner Zellen. Die gesamte chemisch gespeicherte Energie des Batteriemoduls war nach ungefähr 10 Minuten freigesetzt und das Batteriemodul an sich ausgebrannt. Nach dem Brand konnten in den einzelnen Zellen keine Spannungen mehr nachgewiesen werden.



Abbildung 22 Reaktion des Batteriemoduls zu verschiedenen Zeitpunkten nach Beschädigungsbeginn in Versuch 1 (Sicht von oben)



Abbildung 23 Reaktion des Batteriemoduls zu verschiedenen Zeitpunkten nach Beschädigungsbeginn in Versuch 1 (Sicht von unten)

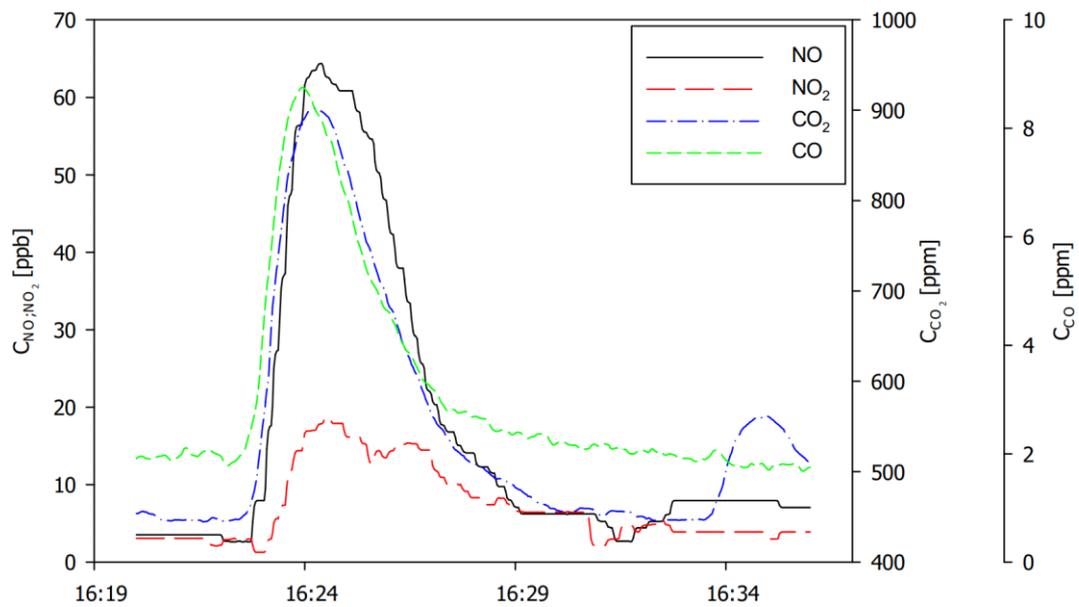


Abbildung 24 Messwertverlauf in Versuch 1 (Keil)

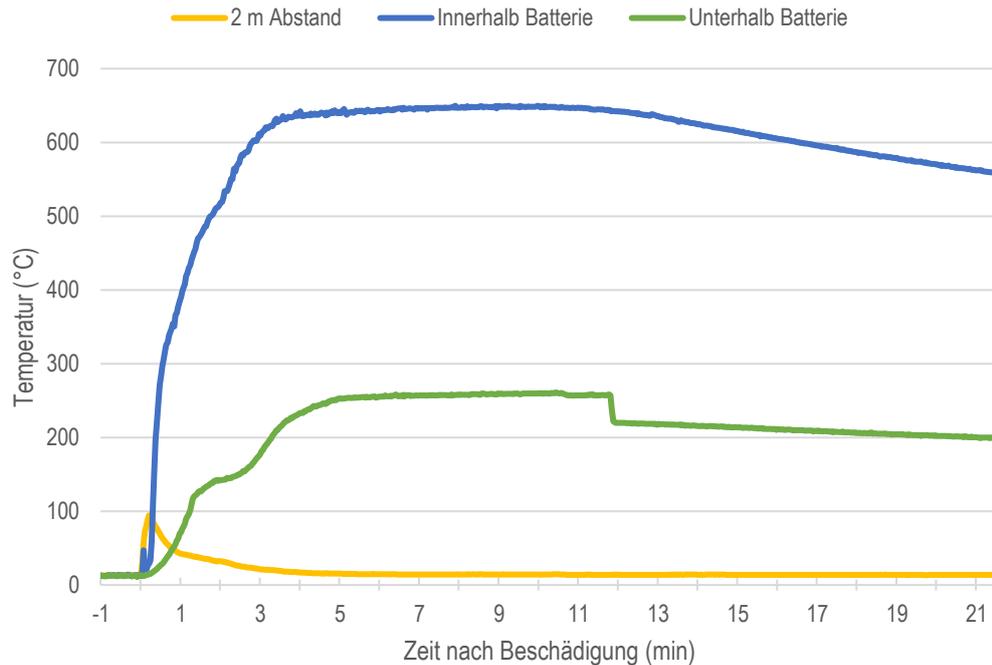


Abbildung 25 Mittlere Temperaturen in Versuch 1 (Keil)

4.2 Stumpfer Schlag

Im zweiten Versuch wurde alle Zellen des Batteriemoduls mit einer Stahlplatte beschädigt (vgl. Kapitel 3.3.1). Nach der Detonation der beiden Sprengschnüre auf der Oberseite der Stahlplatte, erfuhr diese eine Beschleunigung und verursachte einen stumpfen Schlag auf darunterliegende Modul. Dieser mechanische Stoss führte zu einer strukturellen Schädigung des Zellinnern, worauf sich interne Kurzschlüsse ergaben und in der Folge zu einer raschen Überhitzung und Überdruckbildung in Zellen führten. Direkt nach dem Schlag begann das Batteriemodul heftig zu rauchen (vgl. Abbildung 26), unter Begleitung von starkem Funkenschlag und einzelnen Stichflammen. 20 Sekunden nach der Beschädigung manifestierten sich erste Flammen. Die Temperaturen erhöhten sich innerhalb des Batteriemoduls innert 5 Minuten kontinuierlich auf knapp 600 °C; in der gleichen Zeitspanne wurde unterhalb des Batteriemoduls ein konstanter Temperaturanstieg auf über 200 °C registriert (vgl. Abbildung 28).

Der heftige stumpfe Schlag führte nicht zu einer gleichmässigen Beschädigung aller Zellen, weshalb ein zeitlich versetztes thermisches Durchgehen der Zellen beobachtet werden konnte (Bsp. t_{7min} in Abbildung 26). Dieses war ebenfalls mit teilweise spektakulären thermischen (Stichflammen) und akustischen (Zischen, leichtes Knallen) Effekten verbunden. Abgesehen von einzelnen Deflagrationen, die sich jeweils mit einer starken Ausgasung und Rauchbildung ankündigten und infolge derer auch Bestandteile von Batteriezellen weggeschleudert wurden, konnten zu keiner Zeit explosionsartige Vorgänge beobachtet werden. Die Energiefreisetzung des gesamten Moduls erfolgte schnell, im Vergleich zu Versuch 1 jedoch mit einer bemerkbaren Kettenreaktion einzelner Zellen. Die gesamte chemisch gespeicherte Energie des Batteriemoduls war nach ungefähr 10 Minuten komplett freigesetzt und das Batteriemodul an sich ausgebrannt. Nach dem Brand konnten in den einzelnen Zellen keine Spannungen mehr nachgewiesen werden.

In der kurzen Zeit bis zur ersten Flammenbildung nach 20 Sekunden wurden sehr grosse Rauchmengen ausgestossen. Der schwarze Rauch stieg bis an die Tunneldecke und driftete mit dem Luftstrom in einer stabilen Schichtung bis zum treibenden Ventilator im

Brandstollen, wo Turbulenzen die Rauchschichten auflösten. Die Rauchemissionen verringerten sich in der Folge sukzessive aufgrund des Verbrennungsprozesses. Die kontinuierlichen Gasmessungen registrierten korrespondierende, schnelle Anstiege der Konzentration von CO, CO₂, NO und NO₂ (vgl. Abbildung 28). Neben diesen typischen Brandemissionen wurden beim untersuchten Li-Ionen-Batteriemodul ebenfalls erhöhte Mengen an Schwermetallfreisetzungen in Form von Aerosolen gemessen (vgl. Tabelle 18 und Tabelle 20 und Diskussion in Kapitel 5.1). Es wurden keine grösseren Mengen HF gemessen (vgl. Kapitel 6.1)



Abbildung 26 Reaktion des Batteriemoduls zu verschiedenen Zeitpunkten nach Beschädigungsbeginn in Versuch 2 (Sicht von oben)



Abbildung 27 Reaktion des Batteriemoduls zu verschiedenen Zeitpunkten nach Beschädigungsbeginn in Versuch 2 (Sicht von unten)

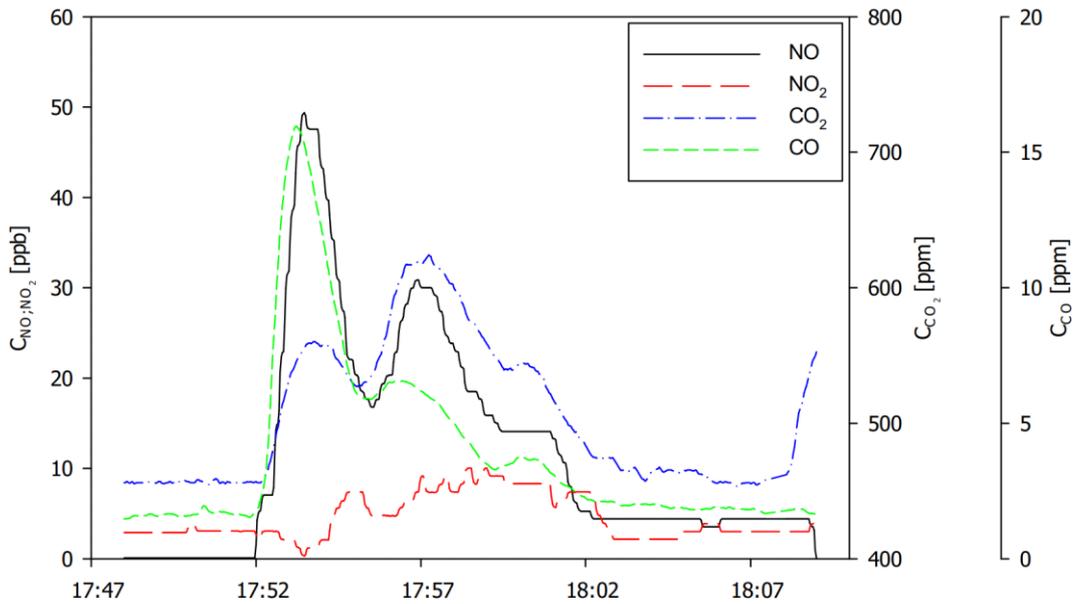


Abbildung 28 Messwertverlauf in Versuch 2 (Platte)

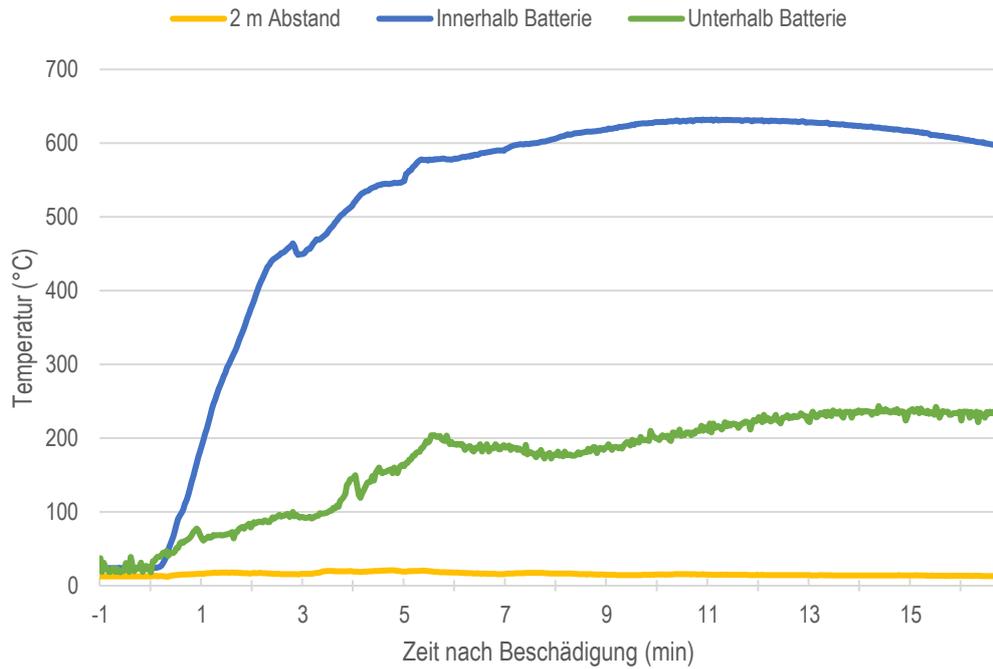


Abbildung 29 Mittlere Temperaturen in Versuch 2 (Platte)

4.3 Zentraler Durchschuss

Im dritten Versuch wurden die Zellen des Batteriemoduls mit einem EFP-Geschoss beschädigt (vgl. Kapitel 3.3.1). Gemäss Versuchskonzept hätten beide Zellreihen durchschossen werden sollen. Das EFP drang aber wenige Millimeter neben der Mitte in das

Batteriemodul ein, wodurch lediglich eine Zellreihe beschädigt wurde – die andere Zellreihe blieb mechanisch unversehrt und erwärmte sich während des Versuchs nur langsam (vgl. Abbildung 30). Nach dem Durchschlag mit dem Kupfergeschoss erfuhr die betroffene Zellreihe eine durchgängige Penetration, die eine Beschädigung des Innern der Zellen bewirkte und schliesslich zu einer Überhitzung der Zellen führte. Unmittelbar nach dem Einschlag wirkte das Batteriemodul abgesehen von den Eintritts- und Austrittslöchern des EFP-Geschosses äusserlich unbeschädigt (vgl. Abbildung 31). Erst nach ungefähr einer Minute begann aus den beiden Öffnungen allmählich Rauch zu qualmen, der sich in den folgenden 2 Minuten so stark intensivierte, dass die Sicht im Tunnel stark beeinträchtigt war (Sichtweite im Rauch zeitweise <1 m). Ab 3 Minuten nach der Beschädigung manifestierten sich die ersten Flammen und die Rauchemissionen verringerten sich stetig aufgrund des Verbrennungsprozesses. Die Temperaturen erhöhten sich innerhalb des Batteriemoduls stufenartig und überstiegen nach 4 Minuten 500 °C; die Unterseite des Batteriemoduls erwärmte sich langsam aber kontinuierlich auf über 100 °C bis zum Versuchsende (vgl. Abbildung 34).

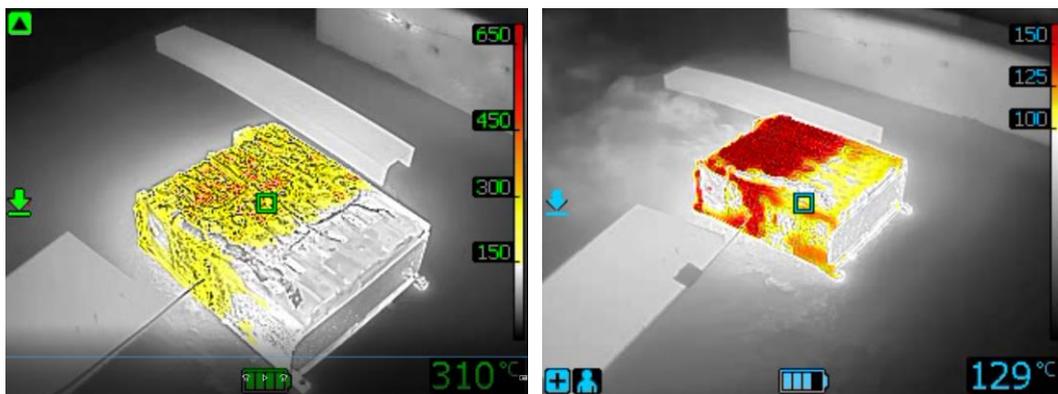


Abbildung 30 Batteriemodul mit beschädigter (>210 °C) und unbeschädigter (<210 °C) Zellreihe nach Versuch 3 (Durchschuss)

Die heftige Penetration der einen Zellreihe führte zu einem beinahe gleichzeitigen thermischen Durchgehen aller betroffenen 6 Zellen mit teilweise spektakulären thermischen (Stichflammen) und akustischen (Zischen, leichtes Knallen) Effekten. Aufgrund der Ein- und Ausschusslöcher konnte der sich durch die chemischen Zersetzungsprozesse aufbauende Überdruck im Innern der Zellen jederzeit entweichen, sodass weder Deflagrationen noch Explosionen festgestellt wurden. Zeitweise konnten heftige, zischende Rauchausstösse und Stichflammen aus beiden Modulseiten beobachtet werden.

In den 3 Minuten bis zur ersten Flammenbildung wurden sehr grosse Rauchmengen ausgestossen. Der schwarze Rauch stieg bis an die Tunneldecke und driftete mit dem Luftstrom in einer stabilen Schichtung bis zum treibenden Ventilator im Brandstollen, wo Turbulenzen die Rauchsichten auflösten. Die Rauchemissionen verringerten sich nach der Flammenbildung sukzessive aufgrund des Verbrennungsprozesses. Die kontinuierlichen Gasmessungen registrierten nach der Beschädigung zuerst einen alleinigen Anstieg von NO, der typischerweise auf nicht optimale Verbrennungsprozesse mit starker Rauchbildung hindeutet und mit der visuellen Wahrnehmung des Versuchslaufs korrespondiert. Nach der ersten Flammenbildung verringerte sich die Konzentration von NO und die Konzentrationen von CO, CO₂, und NO₂ stiegen an (vgl. Abbildung 33). Neben diesen typischen Brandemissionen wurden beim untersuchten Li-Ionen-Batteriemodul ebenfalls erhöhte Mengen an Schwermetallfreisetzungen in Form von Aerosolen gemessen (vgl. Tabelle 18 und Tabelle 20 und Diskussion in Kapitel 5.1). Es wurden keine grösseren Mengen HF gemessen (vgl. Kapitel 6.1)

Die Energiefreisetzung der beschädigten Zellreihe erfolgte ab dem Moment der ersten Flammenbildung äusserst schnell und ohne bemerkbare Kettenreaktion einzelner Zellen. Die gesamte chemisch gespeicherte Energie der betroffenen Zellreihe war nach ungefähr 10 Minuten freigesetzt. Die Zellen der benachbarten Reihe erwärmten sich durch den Brand der beschädigten Zellreihe nur schwach; bis zu diesem Zeitpunkt erfuhren sie kein

thermisches Durchgehen (vgl. Abbildung 30). Sie wurde nach Versuchsende zur Entladung mit einer erneuten EFP-Ladung beschossen, wobei die folgende Reaktion vergleichbar mit derjenigen der ersten Zellreihe war. Nach dem Brand konnten in den einzelnen Zellen keine Spannungen mehr nachgewiesen werden.

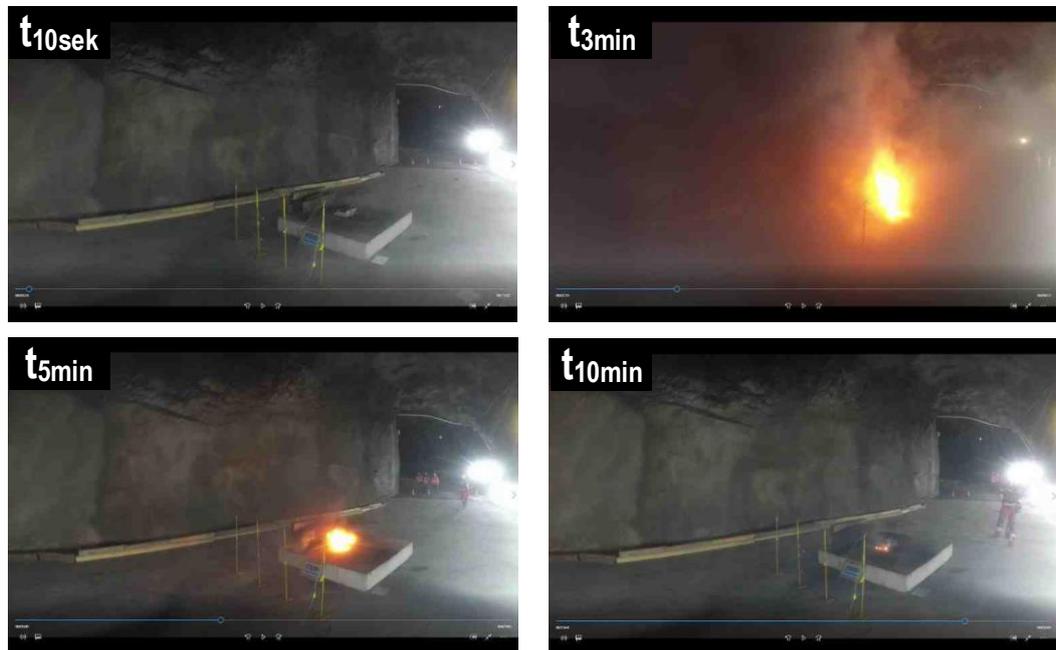


Abbildung 31 Reaktion des Batteriemoduls zu verschiedenen Zeitpunkten nach Beschädigungsbeginn in Versuch 3 (Sicht von oben)

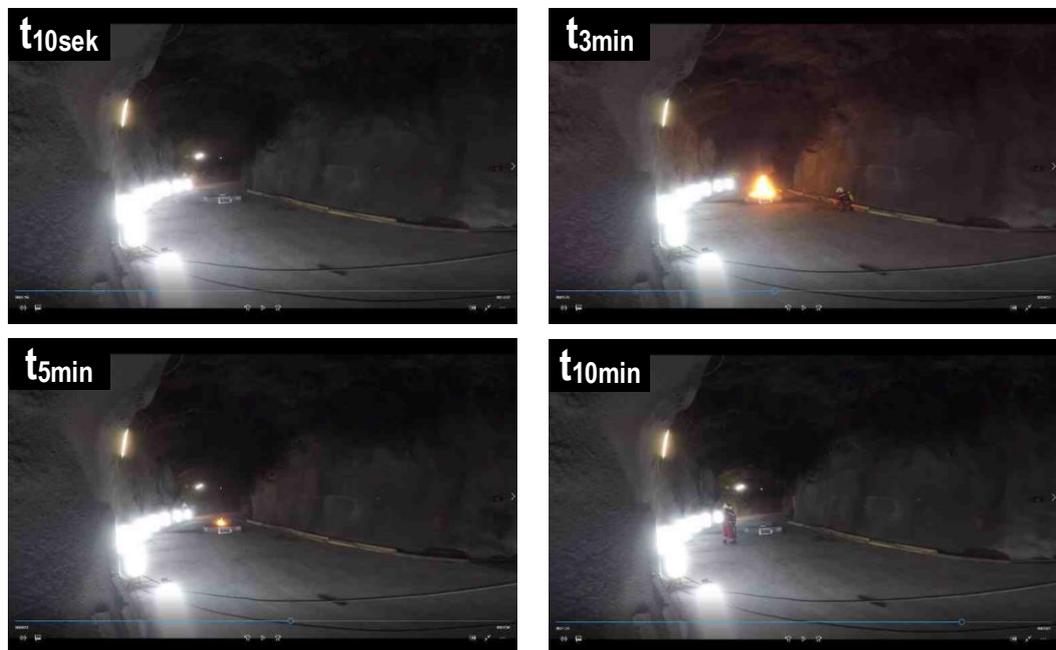


Abbildung 32 Reaktion des Batteriemoduls zu verschiedenen Zeitpunkten nach Beschädigungsbeginn in Versuch 3 (Sicht von unten)

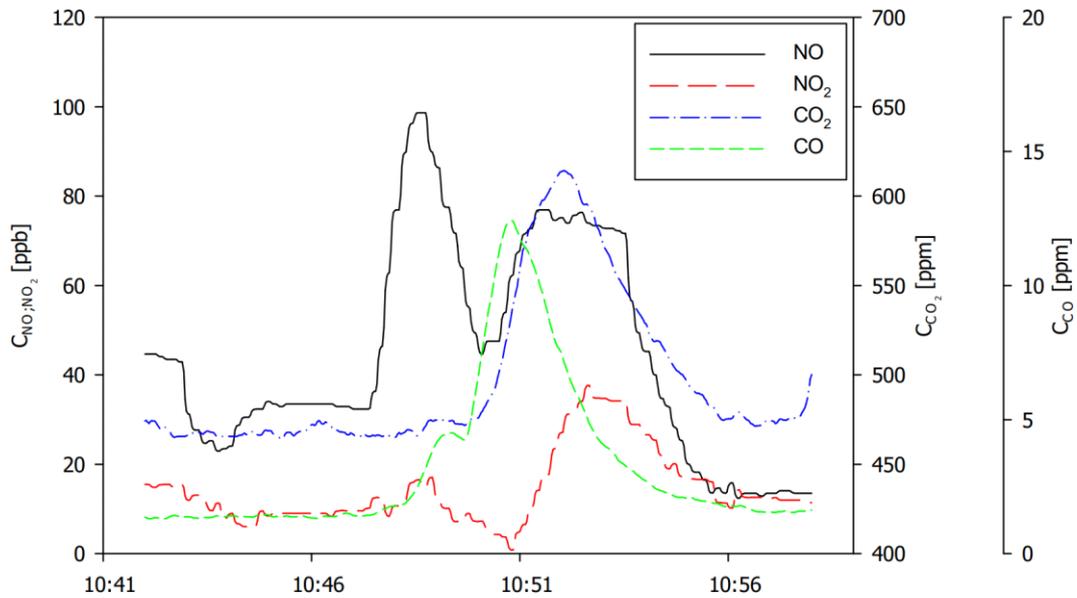


Abbildung 33 Messwertverlauf in Versuch 3 (Durchschuss)

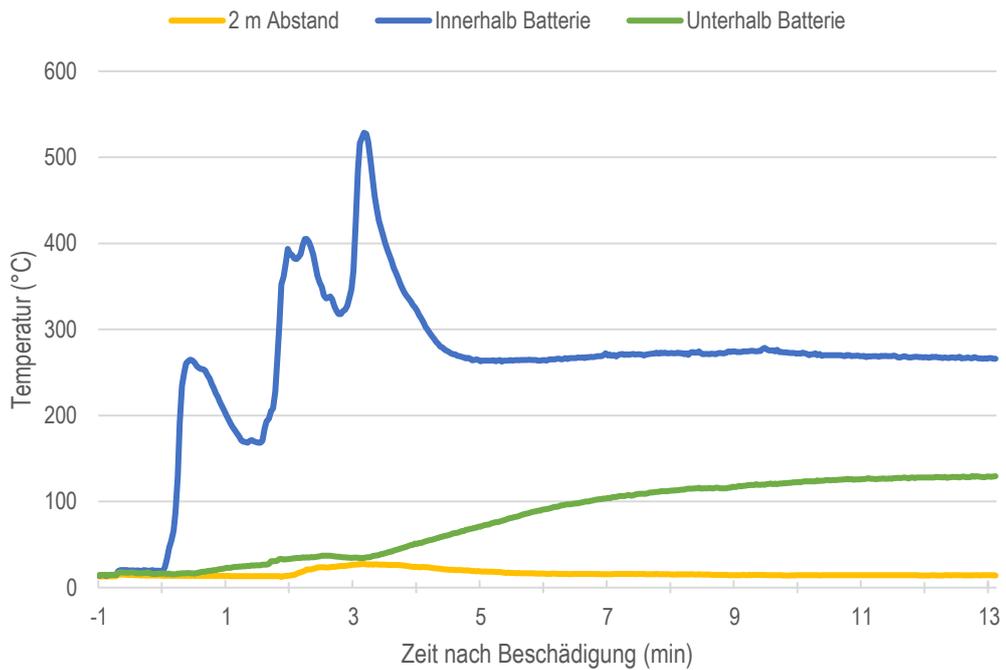


Abbildung 34 Mittlere Temperaturen in Versuch 3 (Durchschuss)

4.4 Thermische Beanspruchung

Im vierten Versuch wurden alle Zellen des Batteriemoduls mit einem Propangasbrenner von der Unterseite aufgeheizt (vgl. Kapitel 3.3.2). Durch die externe Wärmestrahlung wurden einzelne Batteriekomponenten (Bsp. Separator) im Innern der Zellen beschädigt und schliesslich Kurzschlüsse und Überhitzungen bewirkt. Nach ca. 3 Minuten konnten erste exothermische Reaktionen der Zellen beobachtet werden und die externe Brandquelle wurde entfernt (vgl. Abbildung 35).

Die Temperaturen erhöhten sich innerhalb des Batteriemoduls langsam und erreichten erst nach 19 Minuten rund 750 °C; aufgrund der unterseitigen Erwärmung stiegen die Temperaturen dort bereits nach 3 Minuten auf 400 °C und erreichten nach Entfernung der externen Brandquelle und nach einem erneuten plötzlichen Anstieg bei 9 Minuten mit knapp 600 °C ihre maximalen Werte (vgl. Abbildung 38).

Die starke thermische Belastung führte nicht zu einer gleichmässigen Beschädigung aller Zellen, weshalb ein zeitlich versetztes thermisches Durchgehen aller Zellen in Form einer regelmässigen Kettenreaktion beobachtet werden konnte (Bsp. $t_{6\text{min}}$ und $t_{11\text{min}}$ in Abbildung 26). Diese zeichnete sich durch wiederkehrende und spektakuläre thermische (Stichflammen) und akustische (Zischen, leichtes Knallen) Effekte aus. Aufgrund der entstehenden Überdrücke in den Zellen wurden mehrere Deflagrationen beobachtet, die sich jeweils mit einer starken Rauchbildung und einem ansteigenden, zischenden Geräusch ankündigten und infolge derer Bestandteile von Batteriezellen weggeschleudert wurden. Es wurde keine explosionsartigen Vorgänge beobachtet. Die Energiefreisetzung des gesamten Moduls erfolgte aufgrund der Kettenreaktion vergleichsweise langsam. Die gesamte chemisch gespeicherte Energie des Batteriemoduls war nach knapp 20 Minuten komplett freigesetzt und das Batteriemodul an sich ausgebrannt. Nach dem Brand konnten in den einzelnen Zellen keine Spannungen mehr nachgewiesen werden.

Während der Kettenreaktion wurden mehrmals grosse Rauchmengen ausgestossen. Die schwarzen Rauchschwaden stiegen jeweils bis an die Tunneldecke und drifteten mit dem Luftstrom in einer stabilen Schichtung bis zum treibenden Ventilator im Brandstollen, wo Turbulenzen die Rauchsichten auflösten. Die Rauchemissionen verringerten sich infolge des Verbrennungsprozesses sukzessive. Die kontinuierlichen Gasmessungen registrierten mit der Kettenreaktion korrespondierende, schnelle Anstiege der Konzentration von CO, CO₂, NO und NO₂ (vgl. Abbildung 37). Neben diesen typischen Brandemissionen wurden beim untersuchten Li-Ionen-Batteriemodul ebenfalls erhöhte Mengen an Schwermetallfreisetzungen in Form von Aerosolen gemessen (vgl. Tabelle 18 und Tabelle 20 und Diskussion in Kapitel 5.1). Es wurden keine beträchtlichen Mengen HF gemessen (vgl. Kapitel 6.1)



Abbildung 35 Reaktion des Batteriemoduls zu verschiedenen Zeitpunkten nach Beschädigungsbeginn in Versuch 4 (Sicht von oben)



Abbildung 36 Reaktion des Batteriemoduls zu verschiedenen Zeitpunkten nach Beschädigungsbeginn in Versuch 4 (Sicht von unten)

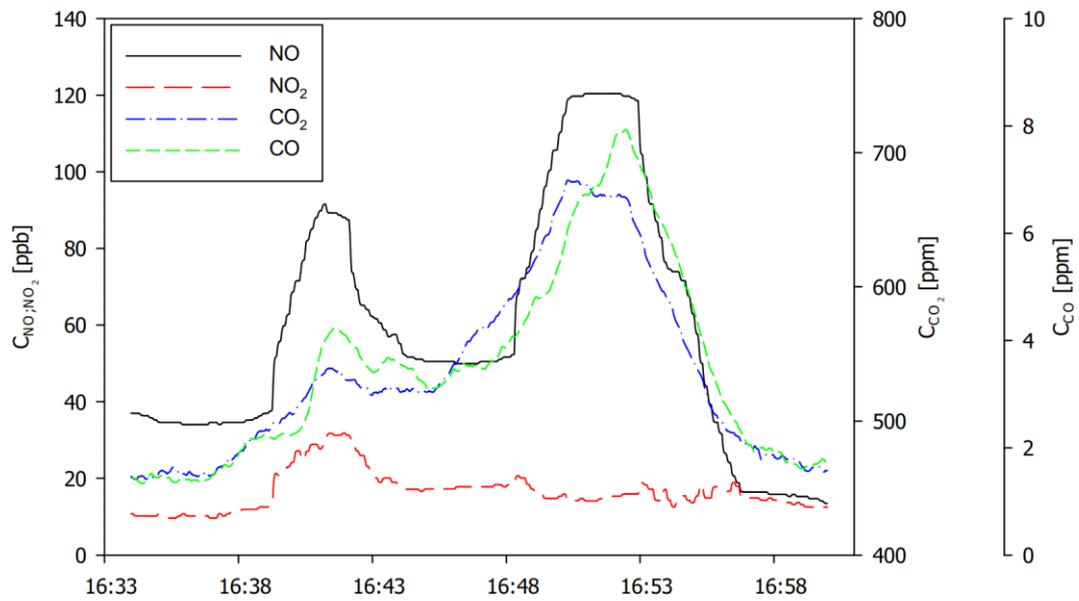


Abbildung 37 Messwertverlauf in Versuch 4 (Brand)

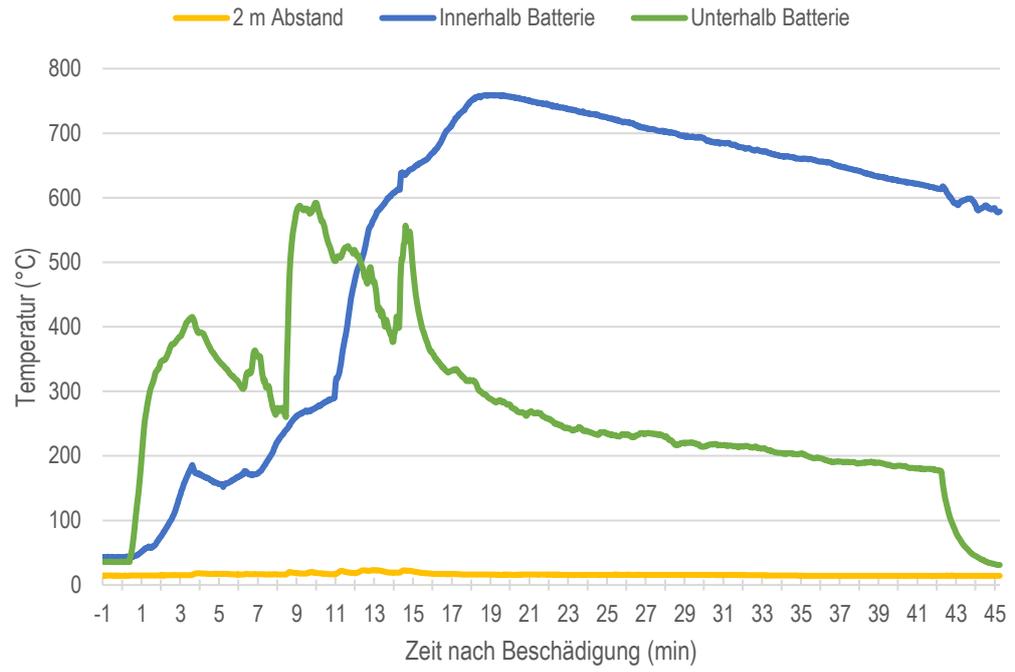


Abbildung 38 Mittlere Temperaturen in Versuch 4 (Brand)

5 Diskussion

Es wurde nachgewiesen, dass starke mechanische und thermische Beschädigungen von Elektrofahrzeugbatterien augenblicklich zu unkontrollierbaren Bränden mit hoher Energieentfaltung führen können. Die beobachteten thermischen Effekte ($>700\text{ °C}$) während der Experimente legen nahe, dass sich der Brand einer Lithium-Ionen-Batterie auf die umliegenden Karosserieteile ausweiten und in der Regel zu einem vollständigen Fahrzeugbrand führen wird.

Die pauschale Hypothese, dass sich die Brandgefährdung in Strassentunneln aufgrund von hochkapazitiven Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen generell erhöhen wird, kann indessen nicht bestätigt werden. Die experimentell hergeleiteten Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die chemische Energiespeicherung typischer Elektrofahrzeuge in Form von Lithium-Ionen-Batterien insgesamt nicht zu einer Verschärfung im eigentlichen Sinne, aber doch zu einer Veränderung der Gefährdungssituation in Strassentunneln führen. Die Erkenntnisse aus dem Experiment werden zur besseren Einordnung in den folgenden Kapiteln anhand essentieller Fragestellungen diskutiert.

5.1 Veränderung der Gefährdungssituation

Ergeben sich veränderte thermische Gefährdungen im Strassentunnel?

Nein. Die erzeugten Batteriebrände charakterisierten sich durch ihre schnelle Entstehung, ihre hohe Energiefreisetzung in kurzer Zeit und durch teilweise spektakuläre thermische Vorgänge (Verpuffungen, Stichflammen) mit starker Rauchbildung und hohen Temperaturen (vgl. Abbildung 39). Trotz dieser eindrücklichen Effekte konnten jedoch keine Explosionen oder andere thermische Auswirkungen beobachtet oder gemessen werden, die sich von konventionellen Treibstoffbränden markant unterscheiden würden. Die Messungen aus den Versuchen zeigen zwar innerhalb der Batterien sehr hohe Temperaturen bis zu 750 °C , in 2 m Distanz konnten aber nur noch knapp 100 °C im Extremfall und knapp 30 °C im Normalfall registriert werden (vgl. Abbildung 40 und Abbildung 41). Die subjektiven Erfahrungsberichte der Berufsfeuerwehr, die das Experiment fach- und sicherheitstechnisch vor Ort begleitet hat, belegen zudem, dass sich die Strahlungswärme eines Traktionsbatteriebrandes nicht mit jener eines kompletten Fahrzeugbrandes, auf die Strassentunnel bereits jetzt ausgelegt sind, vergleichen lassen.

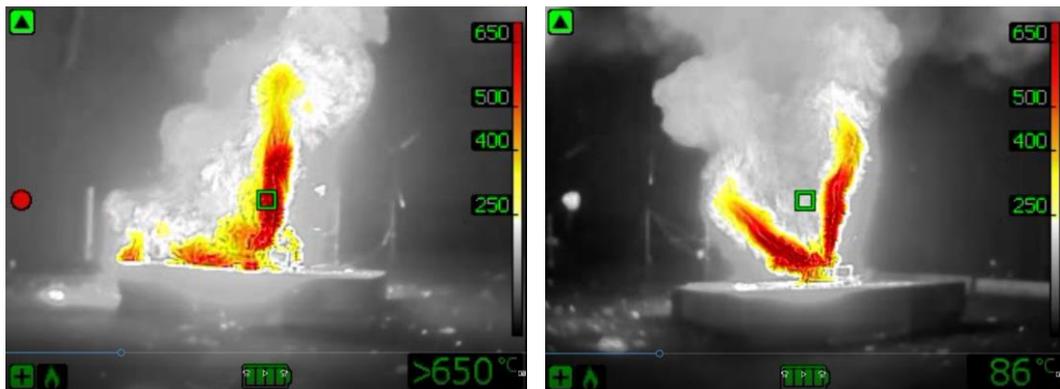


Abbildung 39 Thermische Effekte während des Versuchs 4 (Brand)

Auf Basis der erhobenen Messreihen ist es nicht möglich, eine verlässliche Aussage zur Wärmefreisetzungsrate (engl. *heat release rate*, HRR) der Batteriebrände machen zu können. Es ist davon auszugehen, dass in den Batteriemodulen diverse exotherme Redoxreaktionen abliefen, die kein CO_2 emittierten und nicht immer in Verbindung mit O_2 erfolgten. Obschon verschiedene mathematische Methoden zur Berechnung der HRR eines Brandes bestehen (vgl. [16]; [18]; [29]), wären zur korrekten Abschätzung im vorliegenden Experiment zusätzliche Messungen mit einem kalorimetrischen Gerät notwendig gewesen.

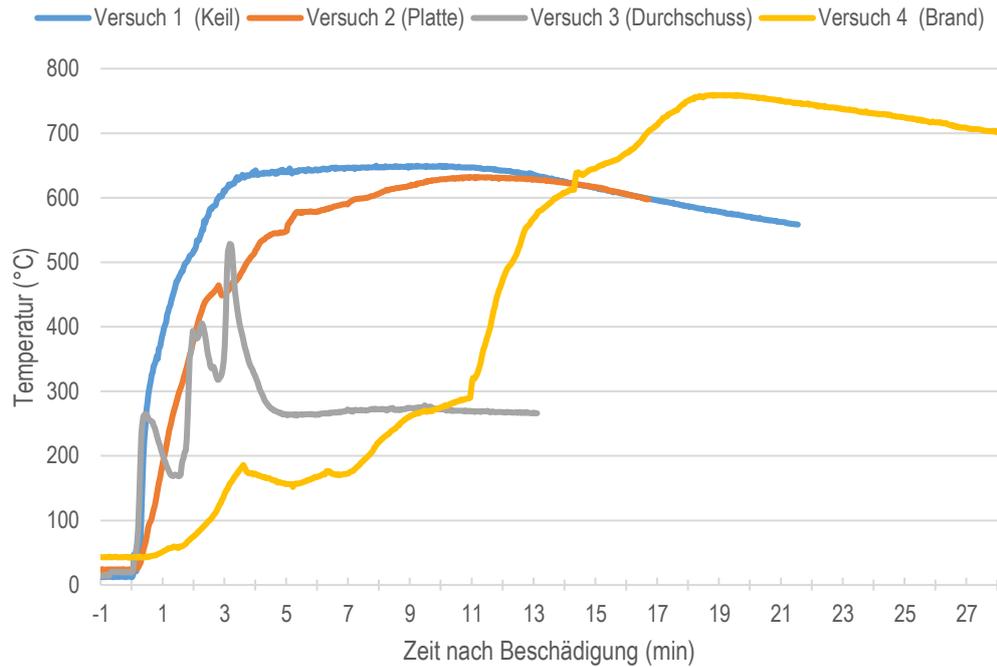


Abbildung 40 Brandtemperaturen innerhalb der Batterie

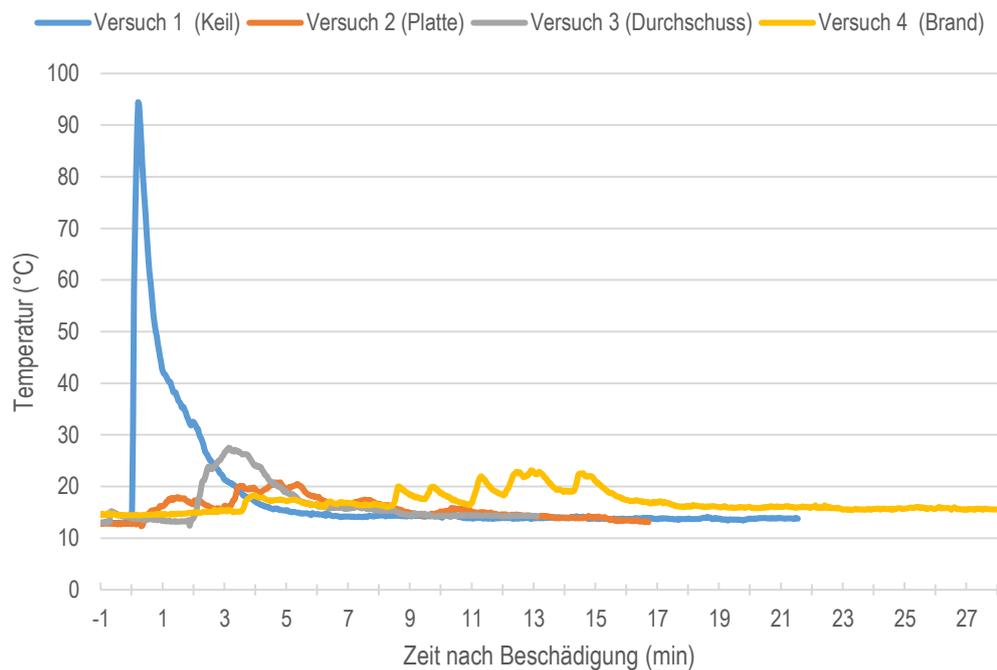


Abbildung 41 Brandtemperaturen in 2 m Distanz zur Batterie

Die HRR der Batteriebrände ist aber im Zusammenhang mit der Tunnelsicherheit weniger entscheidend. Die sehr hohen Brandtemperaturen verdeutlichen nämlich, dass hochkapazitive Traktionsbatterien in der Tat äusserst energiereiche Brandquellen darstellen und in der Regel zu vollständigen Fahrzeugbränden führen werden. Aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit sowie der chemischen Eigenheiten von Lithium-Ionen-Batterien werden sie zudem kaum abwendbar sein. Sobald ein Fahrzeugvollbrand entstanden ist, wird er sich allerdings hinsichtlich der thermischen Charakteristiken nicht von einem konventionellen Fahrzeugbrand unterscheiden: Experimentelle Brandstudien mit kompletten Fahrzeugen

belegen, dass vergleichbare Elektrofahrzeuge und konventionelle Fahrzeuge ähnliche maximale Brandleistungen (ca. 5 MW) und Brennwerte (ca. 7'000 MJ) aufweisen ([25]; [47]; [51]). Fahrzeugbrände in Strassentunneln – ob mit oder ohne Beteiligung einer hochkapazitiven Traktionsbatterie – werden somit weiterhin innerhalb den massgebenden Bemessungskurven nach SIA 197/2 verlaufen (vgl. Abbildung 42).

Diese Erkenntnis deckt sich mit den Erfahrungen von Feuerwehren im Umgang mit brennenden Elektrofahrzeugen. Sie impliziert, dass Elektrofahrzeugbrände in Strassentunneln schlussendlich vergleichbare thermische Gefährdungen wie Fahrzeuge mit konventionellen Verbrennungsmotoren bergen. Es deutet somit nichts darauf hin, dass sich die thermische Gefährdungssituation in normgerechten Strassentunneln durch die zunehmende Elektromobilität verändern wird.

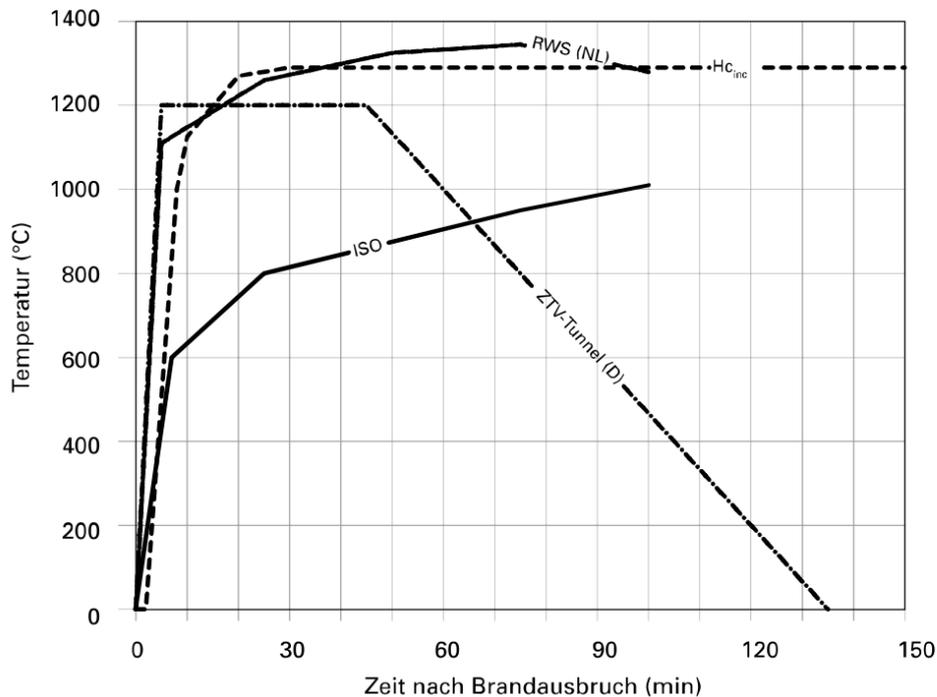


Abbildung 42 Bemessungskurven gemäss SIA 197/2 ([60])

Verändern sich die chemischen Gefährdungen mit potentiellen Auswirkungen auf den Menschen?

In unmittelbarer Nähe und bei ungünstigen Lüftungssituationen – Ja. Vollständig brennende Elektrofahrzeuge emittieren ebenso wie konventionelle Fahrzeuge Schadstoffe, die aus der exothermischen Zersetzung des Fahrzeugmaterials entstehen. Aufgrund der chemischen Komponenten von Lithium-Ionen-Batterien sind in den Rauchgasen eines Elektrofahrzeugbrandes aber zusätzliche Stoffe enthalten, die zum einen sehr reaktionsfreudig sind und zum anderen für den Menschen ein erhebliches gesundheitliches Risiko darstellen. Zur Übersicht der zusätzlichen Bestandteile im Brandrauch, die in den Versuchen effektiv nachgewiesen werden konnten, wird auf Tabelle 3 verwiesen.

In unmittelbarer Nähe führen Elektrofahrzeugbrände deshalb zu neuen und potentiell stärkeren chemischen Gefährdungen für Personen als bei konventionellen Fahrzeugbränden. Im Ganzen betrachtet, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die chemische Gefährdungssituation für Tunnelnutzer mit zunehmendem Abstand vom Brandereignis nicht verändern wird: die natürlichen Luftströmungen in Strassentunneln sowie die lüftungstechnischen Einrichtungen führen zu Verdünnungen und Absaugungen und damit zu zunehmend niedrigeren Schadstoffkonzentrationen. Diese Aussagen betreffen ausschliesslich Strassentunnel mit einem normgerechten technischen Ausrüstungsgrad. Sie können nicht auf weitere unterirdische Infrastrukturen übertragen werden, die sich bezüglich Lüftungssituation oder der brandschutztechnischen Einrichtungen unterscheiden können (Bsp. Parkhaus).

Bereits kurzfristige Expositionen bei hohen Konzentrationen bestimmter gasförmiger Schadstoffe können beim Menschen zu einem breiten Spektrum gesundheitlicher Schädigungen führen: Irritationen der Augen und der Atemwege, schwerwiegende irreversible Gesundheitsauswirkungen, Beeinträchtigung der Selbstrettungsfähigkeit oder in extremen Fällen letale Konsequenzen. Die potentiellen Schädigungen, die durch Expositionen gegenüber Schadstoffen auftreten können sind seit langem bekannt. So wurden bereits in den 1970er-Jahren durch die amerikanischen Behörden (National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH), Konzentrationswerte zahlreicher Schadstoffe gesammelt¹³. Diese sogenannten IDLH-Werte (engl. *immediately dangerous to life or health*) sind Referenzwerte für Maximalkonzentrationen von Stoffen in der Luft und sind unter anderem Bestandteil von Auswahlkriterien für Atemschutzgeräte. So wurden die IDLH-Werte festgelegt um sicherzustellen, dass Rettungskräfte beim Ausfall der Atemschutzausrüstung aus einer bestimmten kontaminierten Umgebung entweichen können. Die Werte geben Maximalkonzentrationen an, bei denen eine ausgesetzte Person nach 30 Minuten schwere oder bleibende Schäden davonträgt. Bei relevanten Erkenntnissen aus der Forschung werden die Konzentrationswerte angepasst und laufend publiziert.¹⁴

Zur Abschätzung der lufthygienischen Brandgefährdung einer kompletten Lithium-Ionen-Batterie in einem passiv belüfteten Raum (Bsp. Einstellhalle) können die Messresultate des vorliegenden Forschungsprojektes in Bezug zu den IDLH-Werten gestellt werden. Dazu wird folgendes Szenario angenommen: Die komplette Batterie (8 Module) eines rein elektrisch angetriebenen Personenwagens mit rund 33 kWh gespeicherter Energie und Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC) als Kathodenmaterial wird in einem Raumvolumen von 1'000 m³ (Bsp. Einstellhalle mit 20 x 20 x 2.5 m) innert 30 Minuten vollständig abgebrannt. Die Belüftung des Raumes erfolgt passiv mit einer Luftwechselrate von 3/h.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 21 zusammengefasst, wobei in der zweiten Spalte die zu erwartenden durchschnittlichen Schadstoffkonzentrationen einer ganzen Elektrofahrzeugbatterie aufgeführt sind. Als Indiz für die Schädlichkeit werden die berechneten Konzentrationen des Experiments in Bezug zu den IDLH-Werten der jeweiligen Stoffe gesetzt (Spalten 3 und 4).

Tabelle 21 Lufthygienische Gefährdung in einem Raum mit 1000 m³ (≠ Strassentunnel)

Stoff	Konzentration (mg/m ³)	IDLH-Wert (mg/m ³)	Q (Konzentration/IDLH)
PH ₃	0.3	70	< 1
HF	4	25	< 1
H ₃ PO ₄	16	1'000	< 1
Co	1'100	20	55
Li	300	1 ¹⁵	600
Mn	1'100	500	2.2
F ⁻ Aerosol	400	250	1.6
NO	6	123	< 1
NO ₂	3	24	< 1

¹³ <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/intrid4.html>

¹⁴ Für Einsatzkräfte relevant ist auch der Einsatztoleranzwert (ETW). Dieser wird vom Einsatzleiter genutzt, um eine Gefährdung seiner Einsatzkräfte abzuschätzen. Für ausgewählte Stoffe existieren ETW jeweils für 1h und 4h Einsatzdauer. Der ETW ist auf die Belastung einer Einsatzkraft (die ohne Atemschutz arbeitet) zugeschnitten und entspricht einer Expositionsdauer von 1 bzw. 4 Stunden. Dies bedeutet, dass Unwohlsein auftreten kann, aber keine dauerhafte gesundheitliche Gefährdung eintritt.

¹⁵ Der IDLH-Wert bezieht sich auf Lithiumhydrid.

CO	600	1375	< 1
CO ₂	121'000	72'000	1.68
Benzol	3	1'597	< 1
Toluol	1	1'884	< 1
Xylol	1	3'908	< 1
Styrol	2	2'982	< 1

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass im Hinblick auf die Schädlichkeit der Brandgase in abgeschlossenen Räumen insbesondere die Schwermetallemissionen im Fokus stehen – die bei einem konventionellen Benzin- oder Dieselbrand nicht vorkommen. Im vorliegenden Beispiel liegen die berechneten Konzentrationen von Kobalt und Mangan um das 55-fache bzw. das 2-fache sowie von Lithium um das 600-fache über jenem Maximalwert, bei dem man nach 30 Minuten Exposition schwere oder bleibende Schäden davonträgt. Aufgrund der nachgewiesenen sehr schnellen Schadstofffreigabe, müssen diese Werte als kritisch betrachtet werden: bereits in der kurzen Zeitspanne, in der sich Flüchtende selber in Sicherheit bringen, können die Maximalwerte für Schwermetallkonzentrationen überschritten werden¹⁶. Zur genaueren Beurteilung der dadurch entstehenden toxischen Schädigungen am Menschen wird auf die detaillierten Datenblätter des NIOSH im Anhang II.1 des vorliegenden Schlussberichtes verwiesen. Aus wissenschaftlicher Sicht sollten diese Erkenntnisse verifiziert werden; es wird deshalb empfohlen, die durch Elektrofahrzeugbrände entstehenden Schwermetallkonzentrationen in Infrastrukturen mit eingeschränkten Lüftungen sowie allfällige Kontaminationen vertiefter zu untersuchen (vgl. Kapitel 6.1).

Es sei darauf hingewiesen, dass zur angemessenen Abschätzung der chemischen Gefährdungen nicht primär die elektrisch nutzbare Energie einer Traktionsbatterie, sondern vielmehr die in ihr enthaltenden Stoffe relevant sind. Die hier präsentierten Erkenntnisse beziehen sich auf die im Experiment untersuchte Batterie eines Personenwagens, in der Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid als Aktivmaterial der positiven Elektrode verwendet wird. Neuartige Batterietypen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen und anderen, allenfalls geringeren Gefährdungen (Bsp. Lithium-Ionen-Batterien mit festem Elektrolyt (nicht brennbar) oder Lithium-Metallanode mit Dünnschicht-Elektrolyt (keine toxischen Emissionen) sind zurzeit Gegenstand aktueller Forschungen ([33]) und von den hier vorliegenden Schlussfolgerungen ausgenommen.

Verändern sich die chemischen Gefährdungen mit potentiellen Auswirkungen auf die Umwelt?

In Bezug auf mögliche Kontaminationen – Ja. Brennende Lithium-Ionen-Batterien bilden aufgrund des Fluors, der in den Elektrolyten enthaltenen ist, den an sich schon stark toxischen, gasförmigen Fluorwasserstoff (HF). Dieser ist stark hygroskopisch geht dadurch sehr schnell Verbindungen mit Wasser ein. Im Kontakt mit allfälligem Löschwasser kann sich so die sogenannte Fluorwasserstoffsäure bilden. Diese ist ein starkes Kontaktgift, dessen Gefährlichkeit besonders kritisch einzustufen ist, weil es sofort von der menschlichen Haut resorbiert wird. Dadurch sind Verätzungen tieferer Gewebeschichten und sogar der Knochen möglich, ohne dass die Haut äusserlich sichtbar verletzt ist ([21]; [22]). Sofern kontaminiertes Löschwasser mit HF – aber auch mit den Schwermetallen Co und Mn – nach einem Brandereignis in einem Strassentunnel unkontrolliert abfliessen und in Kontakt mit der Umwelt kommt, können zusätzliche, zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abschätzbare Gefährdungen entstehen. Weil im vorliegenden Experiment aus Sicherheitsgründen bewusst auf die Anwendung von Wasser als Löschmittel verzichtet wurde, konnten diesbe-

¹⁶ Die nachgewiesene durchschnittliche Fluchtgeschwindigkeit von Personen in unterirdischen Infrastrukturen beträgt 1-2 m/s.

züglich keine Messungen durchgeführt werden. Weitergehende Untersuchungen zur Einschätzung der potentiellen Gefährdungslage durch Kontaminationen sind deshalb empfehlenswert (vgl. Kapitel 6.1).

Verändern sich die chemischen Gefährdungen mit potentiellen Auswirkungen auf die Umwelt durch gasförmige Schadstoffausbreitungen? – Nein. Die Rauchentwicklung von brennenden Elektrofahrzeugen ist gesamthaft mit konventionellen Fahrzeugbränden vergleichbar. Zudem sind die Lüftungen von normgerechten Strassentunneln auf die Bewältigung von Rauchemissionen viel grösserer Ereignisse ausgelegt (Bsp. Lastwagenbrand mit 30 MW; [5]). Weil die Rauchgase eines Elektrofahrzeugbrandes bereits im Strassentunnel verdünnt werden und anschliessend in sehr niedrigen Konzentrationen über die Abluft in die Umwelt gelangen, muss nicht von einer zusätzlichen chemischen Gefährdung für die Umwelt ausgegangen werden.

5.2 Auswirkungen auf den Tunnelbetrieb

Ergibt sich technischer Anpassungsbedarf in Strassentunneln?

Nein. Aufgrund der Versuchserkenntnisse lässt sich zurzeit kein erkennbarer Anpassungsbedarf für die bestehenden BSA ableiten. Lüftungen von Strassentunneln, als zentrale Einrichtungen zur Ermöglichung einer angemessenen Selbstrettung der Tunnelnutzer im Ereignisfall, sind in der Schweiz für grosse Brandereignisse mit erheblichen Schadstoffemissionen ausgelegt (vgl. Tabelle 22). In der Lüftungsrichtlinie des ASTRA (vgl. [5]) sind neben Brandereignissen auch Unfälle mit einer Freisetzung von gefährlichen Substanzen ohne Brand, d.h. mit einer Bandleistung von 0 MW berücksichtigt. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass Elektrofahrzeugbrände in normgerechten Strassentunneln mit den bestehenden technischen Einrichtungen ausreichend bewältigt und die Schutzziele der BSA weiterhin erreicht werden können.

Tabelle 22 Nominale Brandleistungen verschiedener Brandobjekte ([5])

Brandobjekt	Brandleistung nominal
Personenwagen	2 bis 5 MW
Lieferwagen	15 MW
Bus	20 MW
Lastwagen beladen	20 bis 30 MW

Es ist theoretisch denkbar, dass ein Elektrofahrzeug mit einer bereits beschädigten Batterie in einen Strassentunnel einfährt und diese während der Durchfahrt thermisch durchgeht. Die Folge davon wäre ein Brand ohne vorher erkennbaren Auslöser. Weil sich solche Ereignisse auch bei konventionellen Fahrzeugen ereignen können (Bsp. Motorüberhitzung), wird beispielsweise beim Gotthard Strassentunnel ein Thermoportal betrieben, mit dem überhitzte Fahrzeuge vor der Tunneleinfahrt aus dem Verkehr genommen werden können.

Mit Blick auf die frühestmögliche Erkennung von ähnlichen Ereignissen mit Elektrofahrzeugen (auch Elektrolastwagen) bzw. auf die optimale Bekämpfung eines Ereignisses mit Beteiligung eines Elektrofahrzeuges, ist zurzeit noch unklar, ob technische Massnahmen die Schadensminderung unterstützen könnten. Es stellen sich insbesondere die folgenden Fragestellungen, die prüfenswert sind und in weiteren Untersuchungen geklärt werden sollten (vgl. Kapitel 6.1):

- Können beschädigte Elektrofahrzeugbatterien frühzeitig vor der Tunneleinfahrt detektiert werden (Bsp. Temperaturen, Schadstoffemissionen)?
- Verändert die zunehmende Elektromobilität die Bedeutung automatischer Löschanlagen im Strassentunnel aus risikobezogener Perspektive?

5.3 Auswirkungen auf die Ereignisbewältigung

Die Versuche haben verdeutlicht, dass starke mechanische oder thermische Beschädigung von Lithium-Ionen-Batterien zu sehr grossen Energiefreisetzen mit lokal sehr hohen Temperaturen ($>700\text{ °C}$) führen können. Die Ergebnisse lassen darauf schliessen – und die bisherige Erfahrung mit Traktionsbatteriebränden belegt dies – dass thermisch durchgegangene Lithium-Ionen-Batterien konsequenterweise zu vollständigen Fahrzeugbränden führen werden. Feuerwehren sind ausreichend im Umgang mit Gefahrenstoffen geschult; Elektrofahrzeugbrände werden deshalb keine grundsätzlichen Veränderungen in der Ereignisbewältigung zur Folge haben. Neu ist aber, dass Feuerwehren in Zukunft vermehrt auch bei Personenwagen auf chemische Gefährdungen für Mensch, Tier und Umwelt stossen werden, wohingegen dies früher praktisch ausschliesslich bei gekennzeichneten Fahrzeugen angenommen werden musste (Bsp. Gefahrguttransporte).

Es lässt sich somit sagen, dass die thermischen Effekte von Elektrofahrzeugbränden keine Auswirkungen auf die Ereignisbewältigung haben werden – die Auswirkungen der veränderten chemischen Gefährdungen auf die Ereignisbewältigung sind zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht vollumfassend abschätzbar.

Verändert sich die Ereignisbewältigung im Hinblick auf die Brandbekämpfung?

In Bezug auf die Löschmittelwahl – Nein. Wasser gilt allgemein als bestes Kühlmittel für Lithium-Ionen-Batteriebrände, obschon die Brände aufgrund der chemischen Eigenschaften der Batterien nicht wirklich gelöscht werden können. Die Brandbekämpfung mittels Wasser birgt den Vorteil, dass unbeschädigte Zellen einer Batterie ebenfalls wirksam gekühlt und unter Umständen vor einem verzögerten thermischen Durchgehen bewahrt werden können (Vermeidung einer Kettenreaktion). Für eine wirksame Kühlung von Lithium-Ionen-Batteriebränden werden aber sehr grosse Wassermengen benötigt, unter gewissen Umständen mehr als bei konventionellen Fahrzeugbränden (vgl. [25]; [59]). Von den Einsatzleitern muss deshalb beachtet werden, dass eine ausreichende Wasserversorgung am Ereignisort sichergestellt werden kann. Weil aber normgerechte Strassentunnel in der Regel an das Wasserversorgungsnetz angeschlossen sind oder über eigene Löschwasserreservoirs mit mindestens 250 m^3 Volumen verfügen müssen ([60]), wird die Löschwasser-Verfügbarkeit im Hinblick auf zunehmende Elektrofahrzeugbrände nicht als kritisch beurteilt. Über die effizienteste Löschtaktik und Vorgehensweise zur Unschädlichmachung von beschädigten Hochvoltbatterien aber auch über die risikobezogene Wirksamkeit zusätzlicher technischer Einrichtungen (Bsp. automatische Löschanlagen im Strassentunnel) bestehen aktuell noch Unklarheiten, die mittels weiterer Forschungen untersucht werden sollen (vgl. Kapitel 6.1).

Die Ereignisbewältigung wird sich aber im Hinblick auf die Schaffung neuer, potentieller Gefahren durch die Brandbekämpfung selbst verändern. Bei der Reaktion von Wasser mit dem in den Traktionsbatterien eingelagerten Lithium kann nämlich Wasserstoff entstehen, der mit der Umgebungsluft zündfähige Gemische bilden kann. In der freien Umgebung kann diese Problematik vernachlässigt werden. In unterirdischen Infrastrukturen mit künstlicher Frischluftzufuhr muss diese zusätzliche Gefährdung der Wasserstoffanreicherung während der Brandbekämpfung jedoch unbedingt beachtet werden. Diese Gefahr wird sich für Feuerwehren aber weniger in Strassentunneln, denn in Parkhäusern und -garagen manifestieren: während die Lüftungstechnik erzeugte Luftströmung während eines Brandfalls in einem Strassentunnel die kritische Anreicherung von Wasserstoff praktisch verunmöglicht wird, ist dies bei einem Elektrofahrzeugbrand in einem Parkhaus nicht unbedingt der Fall. Durch die oftmals nicht laminaren Luftströmungen sowie der geringen Raumhöhen können in einem Parkhaus oder einer Garage schneller zündfähige Mischungsverhältnisse und damit kritischere Situationen erreicht werden.

Verändert sich die Ereignisbewältigung im Hinblick auf die Interventionszeiten?

Nein. Es ist schon lange bekannt, dass der Rettung von Personen aus Rauchgefahren ohnehin enge zeitliche Grenzen gesetzt sind. Für Feuerwehren bestehen deshalb einerseits zur Planung aber auch als Überprüfungsgrundlage bereits heute spezifische Richtzeiten, innerhalb derer das Eintreffen der Ersteinsatzelemente gewährleistet werden sollte.

Zur Bestimmung der massgebenden Interventionszeiten wurde in wissenschaftlichen Modellen die tödliche Wirkung von Gasen untersucht, die bei einem Zimmerbrand freigesetzt werden ([39]). Sofern sich eine Person seit der Brandentstehung im Raum aufhält, ist die sogenannte Erträglichkeitsgrenze nach 13 Minuten erreicht; danach wird die Person bewusstlos. Nach 17 Minuten wird die Reanimationsgrenze überschritten, nach der die Rettungschancen drastisch sinken (vgl. Abbildung 43). Ausgehend von diesen Richtzeiten wurden für Feuerwehren in der Schweiz typische Abläufe für Brandeinsätze entwickelt, die auch für Einsätze in Strassentunneln gelten (Abbildung 44).

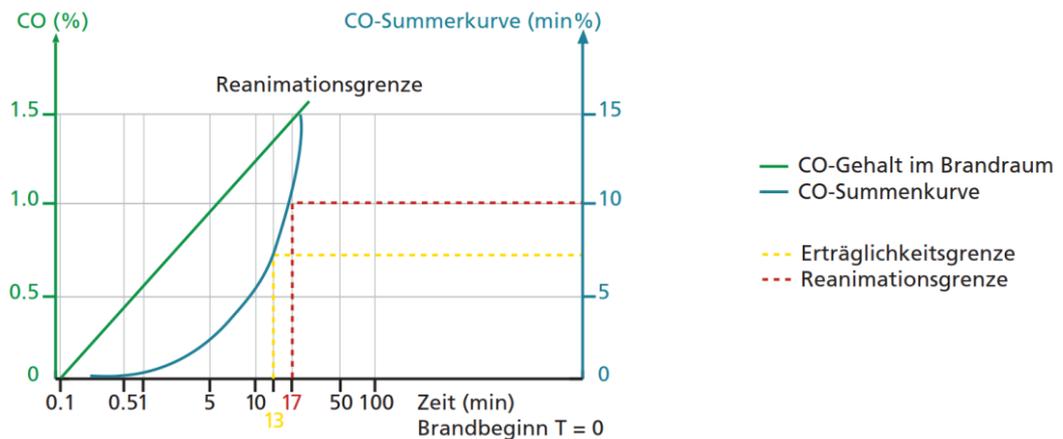


Abbildung 43 Grundlage für die Definition der Richtzeiten für Feuerwehren ([39])

An diesen engen Richtzeiten für Rettungs- und Brandeinsätze wird sich durch die Erkenntnisse des vorliegenden Forschungsprojektes vorerst nichts ändern. Gemäss dem Beschluss der Regierungskonferenz der Feuerwehr Koordination Schweiz (FKS) sollten Ersteinsatzglieder der Feuerwehren bereits heute je nach Siedlungsgebiet in 10-15 Minuten an den Einsatzstellen eintreffen ([39]). Diese Einsatzrichtzeiten (vgl. Abbildung 44) sowie weitere Vorgaben (Bsp. Aufgebot von Fachspezialisten zur Unfallrettung auf Strassen oder für Chemiewehren) haben weiterhin Gültigkeit und sollen auch in Bezug auf Elektrofahrzeugbrände in Strassentunneln konsequent angewendet werden.

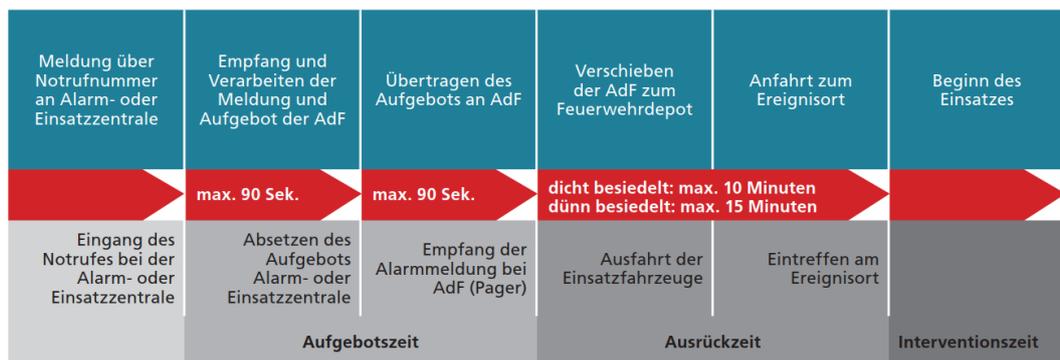


Abbildung 44 Richtzeiten für Einsätze ([39])

Verändert sich die Ereignisbewältigung im Hinblick auf die Sicherheitsmassnahmen und Schutzausrüstung von Einsatzkräften?

Nein. Für Einsatzkräfte bestehen bereits heute ausreichende Empfehlungen für angemessene Sicherheitsmassnahmen und persönliche Schutzausrüstungen für Arbeiten an Hochvoltssystemen von Elektrofahrzeugen (vgl. [32]). Im Falle von Elektrofahrzeugbränden in Strassentunneln und den damit verbundenen toxischen Schadstoffen in unmittelbarer Nähe müssen Einsatzkräfte, wie auch bei konventionellen Fahrzeugbränden, eine umgebungsluftunabhängige Atemschutzausrüstung nutzen. Die im vorliegenden Forschungsprojekt nicht weiter untersuchten elektrischen Gefährdungen (Bsp. durch unter Spannung

stehende Fahrzeugteile) werden vor allem in den späteren Phasen der Bergung und des Abtransports von Fahrzeugwracks relevant und sind den betroffenen Einsatzkräften dank Schulungen und Informationen mittlerweile bewusst.

In Bezug auf die Richtwerte, nach denen Einsatzkräfte entscheiden, ob und wann ein Ereignisort freigegeben werden kann oder ob Fahrzeugüberreste wie auch Ausrüstungsgegenstände der Einsatzkräfte durch chemische Stoffe verunreinigt sind, herrscht aber noch keine Klarheit. Es stellen sich insbesondere die folgenden Fragestellungen, die in weiteren Untersuchungen geklärt und mittels spezifischer Massnahmenempfehlungen beantwortet werden sollten (vgl. Kapitel 6.1):

- Muss die Schutzausrüstung (inkl. Einsatzkleider) nach einem Einsatz vor Ort dekontaminiert werden?
- Auf welche Stoffe müssen der Ereignisort, Fahrzeugwracks und möglicherweise kontaminierte Schutzausrüstungen überprüft werden?
- Sind die bestehenden Messmittel der Feuerwehren hierzu ausreichend?
- In welchem chemischen / elektrischen Zustand müssen Traktionsbatterien sein, damit ein Einsatz vor Ort abgeschlossen werden kann?

6 Ausblick

Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt konnten mit einer systematischen und auf wissenschaftlichen Grundsätzen basierenden Vorgehensweise verschiedene Aspekte im Spannungsfeld Elektromobilität und Tunnelsicherheit untersucht werden. Die Erkenntnisse unterstützen sowohl Einsatzkräfte in der Ereignisbewältigung, sensibilisieren aber auch Betreiber von Strassentunneln auf die mögliche Veränderung der Gefährdungssituation. Auch wenn die ursprüngliche Hypothese über die erhöhte Brandgefährdung durch Elektrofahrzeuge in Strassentunneln nicht belegt werden konnte, so wurden im Verlauf des Experimentes dennoch neue Themenfelder aufgedeckt, die in weiteren Schritten vertiefter untersucht bzw. mittels Sofortmassnahmen bearbeitet werden sollten.

6.1 Weiterer Forschungsbedarf

Potentielle Kontaminationen

Obwohl bisherige Studien (vgl. [25]; [41]; [51]; [63]) darauf hindeuteten, dass in den Versuchen in erster Linie Fluorwasserstoff in erhöhten Konzentrationen gemessen würde, konnten keine signifikanten Mengen an HF festgestellt werden (vgl. Tabelle 20). Durch die Beschädigung der Batteriemodule in den Versuchen hätte das Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat LiPF_6 aber mit den in der Tunnelatmosphäre vorhandenen Spuren von Wasser zu HF reagieren sollen. Der in der Literatur beschriebene theoretische Richtwert von «ca. 150 l gasförmiger Fluorwasserstoff pro kWh Batterieenergie» ([46]) konnte jedoch nicht bestätigt werden; es wurden lediglich knapp 40 g HF/kWh registriert. Es wird deshalb angenommen, dass in den Versuchen zwar beträchtliche Mengen HF gebildet wurden, dieser aber aufgrund seiner stark hygroskopischen Eigenschaft sehr schnell wieder Bindungen mit Feuchtigkeit aus der Umgebung eingegangen ist und auf dem Weg vom Versuchsplatz bis zum Messstandort (ca. 160 m) vermutlich an den Wänden des Versuchsstollens abgelagert ist. Weil die Messeinrichtung während des Experiments auf die Erfassung von HF ausgerichtet waren, wurden allfällige weitere Fluorid-Verbindungen nicht registriert. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass neben HF auch andere Zersetzungsprodukte aus den Batteriebränden im Brandstollen abgelagert sind. Zur Überprüfung dieser Hypothese wird deshalb empfohlen, in einem ersten Schritt die Stollenwände des Versuchsraumes auf mögliche, vom Experiment stammende Schadstoffverunreinigungen zu analysieren. Der Fokus ist dabei in erster Linie auf die zu erwartenden Schwermetalle Co und Mn aber auch auf Li und HF sowie weitere Fluorid-Verbindungen zu richten.

Sofern in diesen ersten Abklärungen tatsächlich erhöhte Konzentrationen festgestellt und kausal auf das vorliegende Forschungsprojekt zurückgeführt werden können, sind weitergehende Untersuchungen zu formulieren und durchzuführen. Diese spezifischen Forschungen sind dann insbesondere, aber nicht ausschliesslich, auf potentielle Schadstoffverunreinigungen in den folgenden Bereichen auszuweiten:

- Löschwasser
- Bausubstanz und technische Einrichtungen in Infrastrukturen
- Fahrzeugteile und Batterieüberreste (Gefahr der Verschleppung)
- Schutzausrüstungen von Einsatzkräften

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, kann unkontrolliert abfliessendes, kontaminiertes Löschwasser mit HF oder den Schwermetallen Co und Mn zu zusätzlichen, noch nicht abschätzbaren Gefährdungen für Menschen oder die Umwelt führen. Gerade im Falle von Co und Mn sind die möglichen Konsequenzen nicht zu unterschätzen: Bodenkontaminationen durch Schwermetalle werden oft als irreversibel eingestuft und beeinträchtigen den Boden nachhaltig in seinen Eigenschaften und Funktionen.

Diese Thematik betrifft neben den Feuerwehren sowohl Betreiber von Strassentunneln und Parkhäusern sowie andere Infrastrukturen, die durch die zunehmende Elektromobilität beeinflusst werden.

Sicherheitsvorgaben für unterirdische Verkehrsinfrastrukturen

Brände von Li-Ionen-Batterien sind nicht löschar. Bei bestimmten Beschädigungen (Bsp. Ladefehler) können jedoch schon vor dem eigentlichen Brand Gase bzw. Gasgemische in ausreichenden Konzentrationen aus dem Gehäuse austreten, die sich mit geeigneten Messgeräten detektieren lassen ([59]). In künstlich belüfteten Infrastrukturen mit einer Ansammlung von nicht bewegten Elektrofahrzeugen (Bsp. unterirdische Parkhäuser), könnten daher entstehende Batteriebrände frühestmöglich detektiert und ein Fahrzeugbrand mit einer potentiellen Ausbreitung auf benachbarte Fahrzeuge möglicherweise verhindert werden. Zurzeit sind in den einschlägigen technischen Vorgaben für Infrastrukturen solche Präventionsmassnahmen nicht vorgesehen. Aufgrund der Versuchsergebnisse scheint es aber naheliegend, dem Thema Sicherheit nicht nur im Zusammenhang mit der zunehmenden Elektromobilität, sondern allgemein für chemische Energiespeicher in unterirdischen Infrastrukturen eine grössere Beachtung zu geben (Bsp. stationäre Speicheranlagen für Solarstrom, [19]).

Auch wenn klar ist, dass technische Sicherheitsmassnahmen wie zum Beispiel Brand- oder Gasmeldeanlagen immer auf die Gegebenheiten in den einzelnen Infrastrukturen anzupassen sind, so ist es dennoch empfehlenswert grundsätzliche Vorgaben (Bsp. Normen, Richtlinien, technische Merkblätter) zu erarbeiten, die deren Umsetzung nach dem aktuellen Stand der Technik und des Wissens beschreiben. Zurzeit scheinen Vorgabedokumente mit den folgenden thematischen Ausrichtungen empfehlenswert:

- Umgang mit potentiell kontaminiertem Löschwasser
- Detektionsmöglichkeiten
- Technische Brandbekämpfungsmöglichkeiten

Sicherheitsvorgaben für unterirdische Verkehrsinfrastrukturen betreffen insbesondere Betreiber von Parkhäusern oder auch anderen Infrastrukturen, die vermehrt in den Einflussbereich von chemischen Speicheranlagen (mobil oder stationär) kommen.

Sichere Übergabe von havarierten Traktionsbatterien

Im Gegensatz zum Versuchsmaterial des vorliegenden Forschungsprojektes, sind Traktionsbatterien nach einem realen mechanischen oder thermischen Beschädigungsereignis, in den meisten Fällen nicht vollständig abreagiert und chemisch inert. Wenn Traktionsbatterien bei einem Fahrzeugbrand beispielsweise von den Einsatzkräften mit Wasser gekühlt wurden, können sich die Batteriezellen möglicherweise in einem vorübergehend supprimierten Zustand befinden – obschon der Prozess des thermischen Durchgehens noch nicht abgeschlossen ist. Versuch 3 hat verdeutlicht, dass ein vorübergehend supprimierter Zustand einer Batterie von aussen betrachtet kaum verlässlich verifiziert werden kann (vgl. Kapitel 4.3). Studien belegen zudem, dass ein scheinbar stabiler Batteriezustand auch Stunden bis Tage nach einer Stresseinwirkung spontan wieder in einen unkontrollierbaren reaktiven Zustand übergehen kann, unter Umständen mit einer erneuten exothermen Reaktion.

Das bedeutet, dass beschädigte aber nicht vollständig abreagierte Zellen einer Lithium-Ionen-Batterie wiederholt und ohne Vorzeichen gesundheitsschädliche Substanzen emittieren oder gar erneut aufflammen können. Im Weiteren besteht nach einem Unfallereignis mit Beteiligung eines Elektrofahrzeuges latent die Gefahr von elektrischer Spannung. Nicht vollständig abreagierte Batteriezellen können durchaus noch relevante Zellspannungen aufweisen, die sich besonders im Verbund mit anderen, möglicherweise noch intakten Batteriezellen, zu lebensgefährlichen Gleichspannungen akkumulieren können. Durch die beschädigte Batterie können diese Gleichspannung auf Fahrzeugteile übertragen werden und so Personen gefährden, die in Kontakt mit den betroffenen Fahrzeugteilen kommen.

Aus Sicht der Einsatzkräfte ist es deshalb eminent wichtig davon ausgehen zu können, dass von beschädigten Traktionsbatterien keine chemischen und elektrischen Gefahren mehr ausgehen. Zurzeit bestehen diesbezüglich aber noch keine einheitlichen Vorgehensweisen zur Risikobegrenzung. Einsatzkräfte aber auch Abschleppdienste und Fahrzeugverwerter werden momentan zur generellen Vorsicht mit havarierten Traktionsbatterien

und Autowracks aufgerufen (vgl. [19]; [23]; [32]; [37]; [38]; [53]). Aufgrund fehlender Erfahrungen und Vorgaben können aktuell unterschiedliche Auffassungen über den korrekten Umgang mit beschädigten chemischen Energiespeichern und ein gewisses Mass an Verunsicherung vorgefunden werden.

Bezüglich der Übergabe und Weiterbehandlung von havarierten Traktionsbatterien und Elektrofahrzeugen ist es ein Bedürfnis der Feuerwehren, mehr Klarheit und Rechtssicherheit zu schaffen. In einer aktuellen Studie der Berner Fachhochschule zur Technologiefolgenabschätzung von lithiumhaltigen Batterien ([70]) wurden zwar bereits Empfehlungen für deren fachgerechten Umgang, auch während der Entsorgung formuliert. Diese sind allerdings allgemeiner Natur und bedürfen je nach Anwendungsfall weitere Abklärungen. Für Einsatzkräfte fehlen somit weiterhin allgemein akzeptierte, praktische Handlungsanweisungen in Form von dokumentierten Prozessabläufen.

Im Zuge der verschiedenen Beschädigungsmethoden während des Experiments haben sich nun Möglichkeiten offenbart, die sich für eine effiziente Unschädlichmachung von beschädigten Traktionsbatterien eignen und damit für Einsatzkräfte von Relevanz sein können. Auf Basis dieser praktischen Erfahrung aus dem Experiment sollen deshalb nun konkrete Abklärungen und weiterführende Untersuchungen mit folgenden Zielen durchgeführt werden:

- Experimentelle Herleitung und Dokumentation einer wirksamen und praktikablen Methode zur Unschädlichmachung von havarierten Traktionsbatterien unter Berücksichtigung des Wirtschaftlichkeitsaspektes
- Formulierung von konkreten Handlungsanweisungen für die vollständige und fachgerechte Entsorgung vom Ereignisort durch Einsatzkräfte
- Definition der dafür erforderlichen Kompetenzen aller Beteiligten

Ein standardisiertes Vorgehen zur endgültigen Unschädlichmachung von beschädigten Traktionsbatterien erhöht die Sicherheit grundsätzlich. Sie hat zudem das Potential Einsatzzeiten zu verkürzen, die Freigabe des Schadenplatzes schneller zu ermöglichen und damit die Verfügbarkeit von beeinträchtigten Strassenabschnitten innert kürzerer Fristen wiederherstellen zu können. Diese weitergehenden Forschungen sind damit in erster Linie für Einsatzkräfte, aber auch für Betreiber von Verkehrsinfrastrukturen relevant.

Wirksamkeit von Hochdruckwassernebelanlagen in unterirdischen Infrastrukturen

Untersuchungen für Hochseefähren haben gezeigt, dass der Einsatz von Hochdruckwassernebel gerade bei Elektrofahrzeugbränden besonders geeignet erscheint, da sich das Löschmittel sehr gut im Raum verteilt und auch die Eigenschaft hat, in verdeckte Räume und Stellen einzudringen [59]. Aufgrund der lokal inertisierenden und kühlenden Wirkung des Wassernebels kann ein Übergreifen und damit eine Ausweitung eines Lithium-Ionen-Batteriebrandes oftmals verhindert werden. Die Wirksamkeit von Hochdruckwassernebelanlagen in Bezug auf Elektrofahrzeugbrände in unterirdischen Infrastrukturen (Bsp. Einstellhallen, Parkhäusern) wurde bislang noch nicht untersucht. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Elektromobilität und aufgrund der Tatsache, dass Hochdruckwassernebelanlagen als wirksame Sicherheitseinrichtung gegenüber Lithium-Ionen-Batteriebrände betrachtet werden, ergibt sich generell ein Forschungsbedarf. Es ist deshalb mit einer strukturierten Untersuchung zu prüfen, ob die angebliche Wirksamkeit von Hochdruckwassernebelanlagen gegen Elektrofahrzeugbrände ihren Einbau in verschiedenen unterirdischen Infrastrukturen aus risikobezogener Sicht rechtfertigt.

Es besteht eine weltweit erkennbare Tendenz, bei besonderen Anforderungen sowohl für neue als auch für bestehende Tunnel zunehmend automatische Löschanlagen als mögliches Ausstattungsmerkmal mit in die Sicherheitsbetrachtungen einzubeziehen. Weil in der Schweiz bislang keine automatischen Löschanlagen für Strassentunnel vorgesehen sind, können Strassentunnel in diese Betrachtungen miteinbezogen werden.

6.2 Mögliche Sofortmassnahmen

Strassenverkehrsunfallstatistik über Elektrofahrzeuge

Der Anteil von Elektrofahrzeugen am Gesamtfahrzeugbestand ist immer noch sehr klein, und so liegen kaum Erfahrungswerte oder entsprechende statistische Daten vor. Die Tatsache der kaum verfügbaren Daten über Unfälle oder Ereignisse mit Beteiligung von Elektrofahrzeugen hat aber im Wesentlichen zwei Gründe: die schwache Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen führt einerseits dazu, dass diese auch verhältnismässig wenig in Strassenverkehrsunfälle verwickelt sind. Andererseits werden die Fahrzeugarten in den statistischen Erhebungen bislang nicht nach Antriebsarten unterschieden, was zur Folge hat, dass elektrifizierte Fahrzeuge statistisch gar nicht erfasst werden, selbst wenn sie in ein Ereignis involviert sind oder dieses gar verursacht haben.

Obschon davon ausgegangen werden kann, dass mit Elektrofahrzeugen nicht mehr Unfälle passieren als mit konventionellen Fahrzeugen, würden Unfallzahlen dennoch Erkenntnisse u.a. für die Einsatzbewältigung liefern und eine Grundlage für eine fundierte Gefährdungsabschätzung bieten. Es wird deshalb empfohlen, die bestehende Strassenverkehrsunfallstatistik der Schweiz¹⁷ mit der Fahrzeugart «Elektrofahrzeug» (als Sammelbegriff für alle Fahrzeuge, die mit elektrischer Energie angetrieben werden, d.h. auch Hybride) zu erweitern. Im Zuge der zunehmenden Elektromobilität wurde bereits einmal eine solche Verfeinerung der Fahrzeugunterscheidung unternommen: in der Unfallstatistik des Bundes werden E-Bikes seit 2011 als eigene Fahrzeugart ausgewiesen.

Mit Blick auf die zunehmenden Ladestationen in Infrastrukturen (Bsp. Parkhäuser, Garagen) und den damit verbundenen potentiellen Brandgefährdungen durch Ladefehler sollten auch bestehende Statistiken und Unfallanalysen von Einsatz- und Rettungskräften (Bsp. kantonale Brandermittlungen) verfeinert werden.

Wissenstransfer: Schulung von Feuerwehren und Information von Betreibern

Aus dem Umfeld der Rettungskräfte werden Unfallereignisse im Zusammenhang mit der zunehmenden Elektromobilität – sofern spezifische Daten vorliegen – laufen analysiert und zur Optimierung der Einsatzbewältigung hinzugezogen. Fachspezialisten aus Technik und Feuerwehr haben aus diesen Erkenntnissen teilweise bereits Merkblätter für das Vorgehen im Einsatz entwickelt (vgl. Kapitel 2.2.2). Diese beruhen jedoch praktisch ausschliesslich auf Erfahrungsberichten und kaum auf wissenschaftlich belegbaren Fakten. Die mit dem vorliegenden Forschungsprojekt erarbeiteten Resultate illustrieren nun die verschiedenen Aspekte der veränderten chemischen Gefährdungssituation in unterirdischen Infrastrukturen. Die damit verbundenen Konsequenzen stellen für die Beteiligten der Einsatzkräfte ein bis anhin kaum beachtetes Risiko dar, bewegen sie sich doch während eines Einsatzes in hoch belasteten Umgebungen.

Aus diesen Gründen wird empfohlen, die vorliegenden Forschungserkenntnisse in die spezifischen Schulungen von Einsatzkräften aber auch des Fachpersonals von Tunnelbetreibern einfliessen zu lassen und damit einen Wissenstransfer aktiv zu fördern.

¹⁷ <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/dokumentation/unfalldaten/statistische-auswertungen/standardstatistik.html>

Anhänge

I	Experiment	71
I.1	Analysierte Aromate.....	71
II	Angaben zur Toxizität der Schadstoffe	73
II.1	IDLH-Werte	73
II.1.1	PH ₃	73
II.1.2	HF.....	74
II.1.4	H ₃ PO ₄	75
II.1.6	Co.....	76
II.1.8	Li.....	77
II.1.10	Mn	78
II.1.12	F-Aerosol.....	79
II.1.14	NO	80
II.1.16	NO ₂	81
II.1.18	CO	82
II.1.20	CO ₂	83
II.1.22	Benzol	84
II.1.24	Toluol.....	85
II.1.26	Xylol.....	86
II.1.28	Styrol	87

I Experiment

I.1 Analyisierte Aromate

Tabelle 23 *Analyisierte Aromate*

Bezeichnung	CAS
Benzol	71 43 2
Toluol	108 88 3
Ethylbenzol	100 41 4
m-/p-Xylol	1330 20 7
o-Xylol	95 47 6
Styrol	100 42 5
1,3,5-Trimethylbenzol	108 67 8
1,2,4-Trimethylbenzol	95 63 6
1,2,3-Trimethylbenzol	526 73 8
i-Propylbenzol	98 82 8
n-Propylbenzol	103 65 1
3-/4-Ethyltoluol	620 14 4/622 96 8
2-Ethyltoluol	611 14 3
1-Methyl-4-Isopropylbenzol	99 87 6
1-Ethyl-3,5-dimethylbenzol	934 74 7
1,2,4,5-Tetramethylbenzol	95 93 2
Indan	496 11 7

II Angaben zur Toxizität der Schadstoffe

II.1 IDLH-Werte

Die Datenblätter der folgenden Kapitel stammen von der Homepage des amerikanischen National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH (<https://www.cdc.gov/niosh/idlh/intrid4.html>).

II.1.1 PH₃

Phosphine

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 7803-51-2

NIOSH REL: 0.3 ppm (0.4 mg/m³) TWA, 1 ppm (1 mg/m³) STEL

Current OSHA PEL: 0.3 ppm (0.4 mg/m³) TWA

1989 OSHA PEL: 0.3 ppm (0.4 mg/m³) TWA, 1 ppm (1 mg/m³) STEL

1993-1994 ACGIH TLV: 0.3 ppm (0.42 mg/m³) TWA, 1 ppm (1.4 mg/m³) STEL

Description of substance: Colorless gas with a fish- or garlic-like odor.

LEL: ... 1.79% (10% LEL, 1,790 ppm)

Original (SCP) IDLH: 200 ppm

Basis for original (SCP) IDLH: The chosen IDLH is based on the statement by Patty [1963] that 290 to 430 ppm is dangerous to life after 1 hour, and 100 to 200 ppm is the maximum amount for 0.5 to 1 hour [Henderson and Haggard 1943].

Short-term exposure guidelines: None developed

ACUTE TOXICITY DATA:

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀ (ppm)	LC ₁₀ (ppm)	Time	Adjusted 0.5-hr LC (CF)	Derived value
Mammal	Flury 1928	1,000	270	5 min	550 ppm (0.55)	55 ppm
Mouse	Izmerov et al. 1982	—	100	2 hr	431 ppm (1.6)	43 ppm
G. pig	Izmerov et al. 1982	—	100	4 hr	200 ppm (2.0)	20 ppm
Cat	Izmerov et al. 1982	—	50	2 hr	80 ppm (1.6)	8.0 ppm
Rabbit	Schulz 1890	—	2,500	20 min	2,400 ppm (0.96)	240 ppm
Human	Tab Biol Per 1933	—	1,000	5 min	550 ppm (0.55)	55 ppm
Rat	Waritz & Brown 1975	11	—	4 hr	22 ppm (2.0)	2.2 ppm

Other human data: Symptoms such as diarrhea, nausea and vomiting, tightness of the chest, cough, headache, and dizziness have been reported in workers exposed intermittently to concentrations up to 35 ppm [Jones et al. 1964]. It has been stated that 290 to 430 ppm is dangerous to life after 1 hour, and 100 to 200 ppm is the maximum amount for 0.5 to 1 hour [Henderson and Haggard 1943].

Revised IDLH: 50 ppm Basis for revised IDLH: The revised IDLH for phosphine is 50 ppm based on acute inhalation toxicity data in humans [Jones et al. 1964; Tab Biol Per 1933]. This may be a conservative value due to the lack of relevant acute toxicity data for workers exposed to concentrations above 35 ppm.

REFERENCES:

- Flury F [1928]. Moderne gewerbliche vergiftungen in pharmakologisch-toxikologischer hinsicht (Pharmacological-toxicological aspects of intoxicants in modern industry). Arch Exp Pathol Pharmacol 1:38:65-82 (translated).
- Henderson Y, Haggard HW [1943]. Noxious gases. 2nd ed. New York, NY: Reinhold Publishing Corporation, p. 243.
- Izmerov NF, Sanotsky IV, Sidorov KK [1982]. Toxicometric parameters of industrial toxic chemicals under single exposure. Moscow, Russia: Centre of International Projects, GKNT, p. 75.
- Jones AT, Jones RC, Longley EO [1964]. Environmental and clinical aspects of bulk wheat fumigation with aluminum phosphide. Am Ind Hyg Assoc J 23:375-379.
- Patty FA, ed. [1963]. Industrial hygiene and toxicology. 2nd rev. ed. Vol. II. Toxicology. New York, NY: Interscience Publishers, Inc., p. 884.
- Schulz H [1890]. Uber phosphorwasserstoff. Arch Exp Pathol Pharmacol 27:314-335 (In German).
- Tab Biol Per [1933]; 3:231 (In German).
- Waritz RS, Brown RM [1975]. Acute and subacute inhalation toxicities of phosphine, phenylphosphine, and triphenylphosphine. Am Ind Hyg Assoc J 36:452-458.

II.1.2 HF

Hydrogen fluoride (as F)

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 7664–39–3

NIOSH REL: 3 ppm (2.5 mg/m³) TWA, 6 ppm (5 mg/m³) 15-minute CEILING

Current OSHA PEL: 3 ppm TWA

1989 OSHA PEL: 3 ppm TWA, 6 ppm STEL

1993-1994 ACGIH TLV: 3 ppm (2.6 mg/m³) CEILING

Description of Substance: Colorless gas or fuming liquid (below 67°F) with a strong, irritating odor.

LEL: . Nonflammable Gas/Noncombustible Liquid

Original (SCP) IDLH: 30 ppm

Basis for original (SCP) IDLH: The chosen IDLH is based on the statement by Patty [1963] that 24 mg/m³ (30 ppm) was tolerated by animals for a total of 41 hours without a fatality [Machle et al. 1934]. A concentration of 50 ppm is obviously too high to be selected as the IDLH, because Deichmann and Gerarde [1969] stated that 50 ppm may be fatal when inhaled for 30 to 60 minutes.

Existing short-term exposure guidelines: National Research Council (NRC) Emergency Exposure Limits (EELs) recommended to military and space agencies [Smyth 1966]

10-minute EEL: 20 ppm

30-minute EEL: 10 ppm

60-minute EEL: 8 ppm

ACUTE TOXICITY DATA:

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀ (ppm)	LC ₁₀ (ppm)	Time	Adjusted 0.5-hr LC (CF*)	Derived value
Rat	Darmer et al. 1972	1,276	—	1 hr	1,799 ppm (1.41)	180 ppm
Monkey	MacEwen & Vernot 1970	1,774	—	1 hr	2,501 ppm (1.41)	250 ppm
Rabbit	Treon et al. 1950	—	313	7 hr	1,171 ppm (3.74)	117 ppm
G. pig	Wohlschlagel et al. 1976	4,327	—	15 min	3,072 ppm (0.71)	307 ppm

*Note: Conversion factor (CF) was determined with "n" = 2.0 [ten Berge et al. 1986].

Other animal data: Guinea pigs and rabbits survived exposures to 30 ppm for 41 hours, but exposures to 300 ppm for 2 hours or more were fatal [Machle et al. 1934].

Human data:

It has been stated that 50 ppm may be fatal when inhaled for 30 to 60 minutes [Deichmann and Gerarde 1969]. Volunteers tolerated concentrations as high as 4.7 ppm for 6 hours per day for 10 to 50 days without severe adverse effects [Largent 1961].

Revised IDLH: 30 ppm [Unchanged] **Basis for revised IDLH:** Based on acute inhalation toxicity data in humans [Deichmann and Gerarde 1969; Largent 1961] and animals [Machle et al. 1934], the original IDLH for hydrogen fluoride (30 ppm) is not being revised at this time.

REFERENCES:

- Darmer KI Jr, Haun CC, MacEwen JD [1972]. The acute inhalation toxicology of chlorine pentafluoride. *Am Ind Hyg Assoc J* 33:661-668.
- Deichmann WB, Gerarde HW [1969]. Hydrofluoric acid (hydrogen fluoride, HF). In: *Toxicology of drugs and chemicals*. New York, NY: Academic Press, Inc., pp. 317-318.
- Largent EJ [1961]. Fluorosis. The health aspects of fluorine compounds. Columbus, OH: Ohio State University Press, pp. 34-39, 43-48.
- MacEwen JD, Vernot EH [1970]. Toxic hazards research unit annual report: 1970. Wright-Patterson Air Force Base, OH: Aerospace Medical Research Laboratory, AMRL-TR-70-77.
- Machle W, Thamann F, Kitzmiller K, Cholak J [1934]. The effects of the inhalation of hydrogen fluoride. I. The response following exposure to high concentrations. *J Ind Hyg Toxicol* 16 (2):129-145.
- Patty FA, ed. [1963]. *Industrial hygiene and toxicology*. 2nd rev. ed. Vol. II. Toxicology. New York, NY: Interscience Publishers, Inc., p. 842.
- Smyth HF Jr [1966]. Military and space short-term inhalation standards. *Arch Environ Health* 72:488-490.
- ten Berge WF, Zwart A, Appelman LM [1986]. Concentration-time mortality response relationship of irritant and systematically acting vapours and gases. *J Haz Mat* 73:301-309.
- Treon JF, Dutra FR, Cappel J, Sigmon H, Younker W [1950]. Toxicity of sulfuric acid mist. *AMA Arch Ind Hyg Occup Med* 2:716-734.
- Wohlschlagel J, Dipasquale LC, Vernot EH [1976]. Toxicity of solid rocket motor exhaust: effects of HCl, HF, and alumina on rodents. *J Combustion Toxicol* 3:61-70.

II.1.4 H₃PO₄

Phosphoric acid

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 7664-38-2

NIOSH REL: 1 mg/m³ TWA, 3 mg/m³ STEL

Current OSHA PEL: 1 mg/m³ TWA

1989 OSHA PEL: 1 mg/m³ TWA, 3 mg/m³ STEL

1993-1994 ACGIH TLV: 1 mg/m³ TWA, 3 mg/m³ STEL

Description of substance: Thick, colorless, odorless, crystalline solid.

LEL: Noncombustible Solid

Original (SCP) IDLH*: 10,000 mg/m³ [*Note: "Effective" IDLH = 2,000 mg/m³ – see discussion below.]

Basis for original (SCP) IDLH: According to MCA [1958], phosphoric acid does not cause any systemic effect, and the chance of pulmonary edema from mist or spray inhalation is very remote. The rat oral LD₅₀ of 1,530 mg/kg [Biofax 1970] cited by NIOSH provides a calculated IDLH of about 10,000 mg/m³. However, for this draft technical standard, respirators have been selected on the basis of the assigned protection factor afforded by each device up to 2,000 "the OSHA PEL (i.e., 2,000 mg/m³); only the "most protective" respirators are permitted for use in concentrations exceeding 2,000 mg/m³.

Short-term exposure guidelines: None developed

ACUTE TOXICITY DATA:

Lethal dose data:

Species	Reference	Route	LD ₅₀ (mg/kg)	LD ₅₀ (mg/kg)	Adjusted LD	Derived value
Rat	Biofax 1970	oral	1,530	---	10,710 mg/m ³	1,071 mg/m ³

Human data: It has been stated that phosphoric acid does not cause any systemic effect and that the chance of pulmonary edema from mist or spray inhalation is very remote [MCA 1958].

Revised IDLH: 1,000 mg/m³ Basis for revised IDLH: The revised IDLH for phosphoric acid is 1,000 mg/m³ based on acute oral toxicity data in animals [Biofax 1970]. This may be a conservative value due to the lack of relevant acute toxicity data for workers.

REFERENCES:

- Biofax [1970]. Data sheet 19-4/70. Northbrook, IL: Biofax Industrial Bio-Test Laboratories, Inc.
- MCA [1958]. Chemical safety data sheet SD-70: properties and essential information for safe handling and use of phosphoric acid. Washington, DC: Manufacturing Chemists Association, pp. 1-13.
- NIOSH [1976]. TB63000. Phosphoric acid. In: Registry of toxic effects of chemical substances, 1976 ed. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Center for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health, DHEW (NIOSH) Publication No. 76-191, p. 879.

II.1.6 Co

Cobalt metal dust and fume (as Co)

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 7440-48-4 (Metal)

NIOSH REL: 0.05 mg/m³ TWA

Current OSHA PEL: 0.1 mg/m³ TWA

1989 OSHA PEL: 0.05 mg/m³ TWA

1993-1994 ACGIH TLV: 0.05 mg/m³ TWA

Description of Substance: Varies

Original (SCP) IDLH: 20 mg Co/m³

Basis for original (SCP) IDLH: Browning [1969] made the statement that "metallic cobalt by inhalation and soluble salts by intratracheal injection act as acute lung irritants, producing oedema, and hemorrhage with a considerable outpouring of fluid from the capillaries in the peritoneal cavity. Many of the animals subjected to intratracheal injection of a suspension of cobalt metal dust developed acute pneumonia, often rapidly fatal as an initial reaction." Because no data on acute inhalation toxicity are available on which to base an IDLH for cobalt metal fume and dust, the chosen IDLH is based on the statement by Patty [1963] that animals chronically exposed to a cobalt-metal blend at a concentration of 20 mg Co/m³ developed lesions in the lungs.

Short-term exposure guidelines: None developed

ACUTE TOXICITY DATA

Lethal dose data:

Species	Reference	Route	LD ₅₀ (mg/kg)	LD ₅₀ (mg/kg)	Adjusted LD	Derived value
Rat	FDRL 1984	oral	6,170	—	43,190 mg Co/m ³	4,319 mg Co/m ³
Rabbit	Simesen 1939	proral	—	—750	5,250 mg Co/m ³	525 mg Co/m ³

Other animal data: It has been reported that animals chronically exposed for 3 years to a cobalt-metal blend at a concentration of 20 mg Co/m³ developed fibrotic lesions in the lungs [Patty 1963].

Human data: None relevant for use in determining the revised IDLH.

Revised IDLH: 20 mg Co/m³ [Unchanged] **Basis for revised IDLH:** Based on chronic toxicity data in animals [Patty 1963], the original IDLH for cobalt metal dust and fume (20 mg Co/m³) is not being revised at this time. This may be a conservative value due to the lack of relevant acute toxicity data for workers.

REFERENCES:

- Browning E [1969]. Toxicity of industrial metals. 2nd ed. New York, NY: Appleton-Century-Crofts, p. 136.
- FDRL [1984]. Acute oral LD50 study of cobalt powder-325 mesh t3N in Sprague Dawley rats. Waverly, NY: Food & Drugs Research Laboratories, Inc., FDRL Study No. 8005B.
- Patty FA, ed. [1963]. Industrial hygiene and toxicology. 2nd rev. ed. Vol. II. Toxicology. New York, NY: Interscience Publishers, Inc., p. 1032.
- Simesen M [1939]. The fate of cobalt after oral administration of metallic cobalt and subcutaneous injection of carbonatotetraminecobalt chloride, with remarks on the quantitative estimation of cobalt in organic materials. Arch Int Pharmac Ther 62(3):347-356.

II.1.8 Li

Lithium hydride

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 7580-67-8

NIOSH REL: 0.025 mg/m³ TWA

Current OSHA PEL: 0.025 mg/m³ TWA

1989 OSHA PEL: Same as current PEL

1993-1994 ACGIH TLV: 0.025 mg/m³ TWA

Description of substance: Odorless, off-white to gray, translucent, crystalline mass or white powder.

LEL: . . . Noncombustible Solid

Original (SCP) IDLH*: 55 mg/m³ [*Note: "Effective" IDLH = 50 mg/m³ — see discussion below.]

Basis for original (SCP) IDLH: The chosen IDLH of 55 mg/m³ is based on the statement by Patty [1963] that "animals exposed to 5 to 55 mg/m³ for periods up to 4 hours experienced intense irritation, coughing and sneezing, inflammation of the conjunctiva, partial sloughing of mucosal epithelium of trachea, and some pulmonary emphysema. No mortality occurred (however) as a result of any level of exposure [Spiegel et al. 1956]." Spiegel et al. [1956], however, found that 2 of 10 animals died from a 4-hour exposure at 22 mg/m³; Spiegel et al. [1956] stated, though, that the mortality among rats, rabbits, guinea pigs, and mice exposed to levels of from 5 to 55 mg/m³ for 1 day was low and probably unrelated to the exposure. A statement by ACGIH [1971] (i.e., that industrial experience has shown that a reduction in atmospheric concentration to 25 µg/m³ is required to attain just a sneezing level). Indicates that 22 mg/m³ is too low to be the IDLH. Respirators have been selected on the basis of the assigned protection factor afforded by each device up to 2,000 OSHA PEL of 0.025 mg/m³ (i.e., 50 mg/m³); only the "most protective" respirators are permitted for use in concentrations exceeding 50 mg/m³.

Short-term exposure guidelines: None developed

ACUTE TOXICITY DATA:

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀	LC ₁₀	Time	Adjusted 0.5-hr LC (CF)	Derived value
Rat	Spiegel et al. 1956	LC ₅₀ : 22 mg/m ³	—	4 hr	44 mg/m ³ (2.0)	4.4 mg/m ³

Human data: It has been recommended that 0.5 mg/m³ is the maximum tolerable concentration for brief period of exposure [AIHA 1964].

Revised IDLH: 0.5 mg/m³ **Basis for revised IDLH:** The revised IDLH for lithium hydride is 0.5 mg/m³ based on acute inhalation toxicity data in humans [AIHA 1964].

REFERENCES:

1. ACGIH [1971]. Lithium hydride. In: Documentation of the Threshold Limit Values for Substances in Workroom Air, 3rd edition. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, p. 147.
2. AIHA [1964]. Lithium hydride. In: Hygienic guide series. Akron, OH: American Industrial Hygiene Association.
3. Patty FA, ed. [1963]. Industrial hygiene and toxicology. 2nd rev. ed. Vol. II. Toxicology. New York, NY: Interscience Publishers, Inc., p. 1070.
4. Spiegel C.J, Scott JK, Steinhardt H, Leach LJ, Hodge HC [1956]. Acute inhalation toxicity of lithium hydride. *AMA Arch Ind Health* 14:468-470.

II.1.10 Mn

Manganese compounds (as Mn)

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 7439-96-5 (Metal)

NIOSH REL: 1 mg/m³ TWA, 3 mg/m³ STELCurrent OSHA PEL: 5 mg/m³ CEILING

1989 OSHA PEL: Same as current PEL

1993-1994 ACGIH TLV: 5 mg/m³ TWA

Description of substance: Varies

Original (SCP) IDLH*: No Evidence [*Note: "Effective" IDLH = 10,000 mg Mn/m³ – see discussion below.]

Basis for original (SCP) IDLH: The available toxicological data do not indicate that exposure to a high concentration of manganese could impede escape within 30 minutes. For this draft technical standard, therefore, respirators have been assigned on the basis of the assigned protection factor afforded by each device up to 2,000. The OSHA PEL (2,000.5 mg Mn/m³) is 10,000 mg Mn/m³; only the "most protective" respirators are permitted for use in concentrations exceeding 10,000 mg Mn/m³.

Short-term exposure guidelines: None developed

ACUTE TOXICITY DATA:

Lethal dose data:

Species	Reference	Route	LD ₅₀ (mg/kg)	LD ₅₀ (mg/kg)	Adjusted LD	Derived value
Mn Rat	Marhold 1972	oral	9,000	—	63,000 mg Mn/m ³	6,300 mg Mn/m ³
Mn ₂ C ₇ O ₄ Rat	Marhold 1977	oral	2,940	—	6,586 mg Mn/m ³	659 mg Mn/m ³
MnCl ₂ Mouse	Gupta et al. 1981	oral	1,715	—	5,282 mg Mn/m ³	528 mg Mn/m ³

Human data: Chronic exposures to workers averaging 47 mg/m³ caused manganese poisoning, while no cases occurred at exposures less than 30 mg/m³ [Flinn et al. 1940]. Chronic exposure to concentrations averaging 210 mg/m³ have been associated with pneumonia [Lloyd-Davies 1946]. Workers chronically exposed to concentrations of manganese dust averaging 20 mg/m³ showed signs of manganism [Smyth et al. 1973].

Revised IDLH: 500 mg Mn/m³
Basis for revised IDLH: The revised IDLH for manganese is 500 mg Mn/m³ based on acute inhalation toxicity data in animals [Gupta et al. 1981]. This may be a conservative value due to the lack of relevant acute toxicity data for workers.

REFERENCES:

1. Flinn RH, Neal PA, Reinhart WH, Dallavalle JM, Fulton WB, Dooley AE [1940]. Chronic manganese poisoning in an ore-crushing mill. Public Health Bulletin 247:1-77.
2. Gupta PK, Murthy RC, Chandra SV [1981]. Toxicity of endosulfan and manganese chloride: cumulative toxicity rating. Toxicol Lett 7:221-227.
3. Lloyd-Davies TA [1946]. Manganese pneumonitis. Br J Ind Med 3:111-135.
4. Marhold JV [1972]. Sbornik vysledku toxologickeho vysetreni latek a pripravku. Czechoslovakia: Institut Pro Vychovu Vedoucicn Pracovniku Chemickeho Prumyclu Praha, p. 21 (in Czechoslovakian).
5. Marhold JV [1977]. Personal communication. Pardubice, Czechoslovakia: VUOS, 539-18, 3/29/77.
6. Smyth LT, Ruhf RC, Whitman NE, Dugan T [1973]. Clinical manganism and exposure to manganese in the production and processing of ferromanganese alloy. J Occup Med 15:101-109.

II.1.12 F-Aerosol

Fluorides (as F)

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: Varies

NIOSH REL: 2.5 mg/m³ TWA

Current OSHA PEL: 2.5 mg/m³ TWA

1989 OSHA PEL: Same as current PEL

1993-1994 ACGIH TLV: 2.5 mg/m³ TWA

Description of Substance: Varies

Original (SCP) IDLH: 500 mg F/m³

Basis for original (SCP) IDLH: No data on acute inhalation toxicity are available on which to base the IDLH for fluorides. The chosen IDLH, therefore, has been estimated from the human acute lethal dose of 5 grams of sodium fluoride [Largent 1961 cited by AIHA 1965]. AIHA [1965] stated that the atmospheric concentration immediately hazardous to life is unknown, but "particulate fluorides are not likely to cause acute health problems among workmen unless large quantities are swallowed, or unless the more toxic decomposition products are involved. Exact concentrations producing immediate illness are unknown, but most likely are very high."

Short-term exposure guidelines: None developed

ACUTE TOXICITY DATA

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀	LC ₁₀	Time	Adjusted 0.5-hrLC (CF)	Derived value
SiF ₄ Rat	Carpenter et al. 1949	---	69,220 mg/m ³	4 hr	101,071 mg F/m ³	10,107 mg F/m ³

Lethal dose data:

Species	Reference	Route	LD ₅₀ (mg/kg)	LD ₁₀ (mg/kg)	Adjusted LD	Derived value
CaF ₂ G. pig Rat	Budavari 1989 Vest Akad Med Nk 1977	oral oral	---	>5,000 4,250	>17,051 mg F/m ³ 14,488 mg F/m ³	>1,705 mg F/m ³ 1,449 mg F/m ³
AlF ₃ ·3Na Rabbit	Largent 1948	oral	---	9,000	34,208 mg F/m ³	3,421 mg F/m ³
F ₂ Si ₂ N ₂ Mouse Rabbit	Gig Tr Prof Zabol 1988 Sine 1993	oral oral	---	70 125	297 mg F/m ³ 530 mg F/m ³	30 mg F/m ³ 53 mg F/m ³
F ₂ Si ₂ Mg ₂ ·6H ₂ O G. pig	Frear 1969	oral	200		581 mg F/m ³	58 mg F/m ³

Human data: Skin rashes and complaints of the gastric, intestinal, circulatory, respiratory, and nervous systems have been reported in workers exposed chronically to concentrations ranging from 11 to 24 mg F/m³ [Roholm 1937]. Chronic exposures at concentrations greater than 24 mg F/m³ have been considered to be "elevated" and a concentration of 10 mg F/m³ was considered "excessive" [Collings et al. 1952]. It has also been stated that the atmospheric concentration immediately hazardous to life is unknown, and particulate fluorides are not likely to cause acute health problems among workers unless large quantities are ingested; concentrations producing immediate illness are unknown, but most likely are very high [AIHA 1965]. It has been stated that 5 grams of sodium fluoride is the probable lethal oral dose [Largent 1961]. [Note: An oral dose of 5 grams is equivalent to a worker being exposed to about 1,500 mg F/m³ for 30 minutes, assuming a breathing rate of 50 liters per minute and 100% absorption.]

Revised IDLH: 250 mg F/m³ **Basis for revised IDLH:** The revised IDLH for fluorides is 250 mg F/m³ based on toxicity data in humans [AIHA 1965; Largent 1961; Roholm 1937]. This may be a conservative value due to the lack of relevant acute toxicity data for workers exposed to concentrations above 250 mg F/m³.

REFERENCES:

- AIHA [1965]. Fluoride-bearing dusts and fumes (inorganic). In: Hygienic guide series. Am Ind Hyg Assoc J 26:426-430.
- Budavari S, ed. [1989]. 1669. Calcium fluoride. In: The merck index. 11th edition. Rahway, NJ: Merck & Co., Inc., p. 253.
- Carpenter CP, Smyth HF Jr, Pozzani UC [1949]. The assay of acute vapor toxicity, and the grading and interpretation of results on 96 chemical compounds. J Ind Hyg Toxicol 31:343-346.
- Collings GH, Fleming RBL, May R, Bianconi WO [1952]. Absorption and excretion of inhaled fluorides. AMA Arch Ind Hyg Occup Med 6:368-373.
- Frear EH, ed. [1969]. Pesticide index. 4th ed. State College, PA: College Science Publishers, p. 265.
- Gig Tr Prof Zabol [1988]; 5:3(11):80 (in Russian).
- Largent EJ [1948]. The comparative toxicity of cryolite for rats and for rabbits. J Ind Hyg Toxicol 30:92-97.
- Largent EJ [1961]. Fluorosis, the health aspects of fluorine compounds. Columbus, OH: Ohio State University Press.
- Roholm K [1937]. Fluorine intoxication. A clinical hygiene study with a review of the literature and some experimental investigations. London, England: H.K. Lewis & Co.
- Sine C, ed. [1993]. Safsan®. In: Farm chemicals handbook '93, p. C302.
- Vest Akad Med Nk [1977]; 2:28-33 (in Russian).

II.1.14 NO

Nitric oxide

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 10102-43-9

NIOSH REL: 25 ppm (30 mg/m³) TWA

Current OSHA PEL: 25 ppm (30 mg/m³) TWA

1989 OSHA PEL: Same as current PEL

1993-1994 ACGIH TLV: 25 ppm (31 mg/m³) TWA

Description of substance: Colorless gas.

LEL: ... Nonflammable Gas

Original (SCP) IDLH: 100 ppm

Basis for original (SCP) IDLH: No useful data on acute inhalation toxicity are available on which to base the IDLH for nitric oxide. The chosen IDLH, therefore, is based on the statement by Sax [1975] that 100 to 150 ppm oxides of nitrogen are dangerous for short exposures of 30 to 60 minutes. The chosen IDLH seems reasonable because NIOSH [1976] cited a rabbit 15-minute LC₅₀ of 315 ppm for nitric oxide [Carson et al. 1962].

Short-term exposure guidelines: None developed

ACUTE TOXICITY DATA:

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀ (ppm)	LC ₁₀ (ppm)	Time	Adjusted 0.5-hr LC (CF)	Derived value
Rabbit	Carson et al. 1962	315	—	15 min	249 ppm (0.79)	25 ppm
Mouse	Flury and Zernik 1931	—	2,500	12 min	1,850 ppm (0.74)	185 ppm
Rat	Ivanov and Szubaev 1979	854	—	4 hr	1,709 ppm (2.0)	171 ppm
Mouse	Pflesser 1935	320	—	?	?	?

Other animal data: Guinea pigs have survived an exposure at 175 ppm for an unstated period [Bodansky 1951].

Human data: It has been stated that exposures to oxides of nitrogen between 100 and 150 ppm are dangerous for exposures of 30 to 60 minutes [Sax 1975].

Revised IDLH: 100 ppm [Unchanged] Basis for revised IDLH: Based on acute inhalation toxicity data in humans [Sax 1975], the original IDLH for nitric oxide (100 ppm) is not being revised at this time.

REFERENCES:

- Bodansky O [1951]. Methemoglobinemia and methemoglobin-producing compounds. *Pharmacol Rev* 3:144-195.
- Carson TR, Rosenholtz MS, Willinski FT, Weeks MH [1962]. The responses of animals inhaling nitrogen dioxide for single, short-term exposures. *Am Ind Hyg Assoc J* 23:457-462.
- Flury F, Zernik F [1931]. *Schädliche gase dämpfe, nebel, rauch- und staubarten*. Berlin, Germany: Verlag von Julius Springer, pp. 157-165 (in German).
- Ivanov NG, Szubaev EN [1979]. About the limitation of the content of nitrogen dioxide in the air of the working zone. *Toksikol Nov Prom Khim Vesh* 15:53-58 (in Russian).
- NIOSH [1976]. QX05250. Nitrogen monoxide. In: Registry of toxic effects of chemical substances, 1976 ed. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Center for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health, DHEW (NIOSH) Publication No. 76-191, p. 780.
- Pflesser G [1935]. The significance of nitric oxide in poisoning by nitrous gases. *Arch Exp Pathol Pharmacol* 179:545-557 (in German).
- Sax NI [1975]. Nitric oxide. In: *Dangerous properties of industrial materials*. 4th ed. New York, NY: Van Nostrand Reinhold Company, pp. 961-962.

II.1.16 NO₂

Nitrogen dioxide

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 10102-44-0

NIOSH REL: 1 ppm (1.8 mg/m³) STELCurrent OSHA PEL: 5 ppm (9 mg/m³) CEILING1989 OSHA PEL: 1 ppm (1.8 mg/m³) STEL1993-1994 ACGIH TLV: 3 ppm (5.6 mg/m³) TWA, 5 ppm (9.4 mg/m³) STEL

Description of substance: Yellowish-brown liquid or reddish-brown gas (above 70°F) with a pungent, acrid odor.

LEL: . . Noncombustible Liquid/Nonflammable Gas

Original (SCP) IDLH: 50 ppm

Basis for original (SCP) IDLH: The chosen IDLH is based on the statement by Patty [1963] that concentrations above 50 ppm are considered dangerous to man for short exposures. Also, NIOSH [1974] cited a rat 4-hour LC₅₀ of 68 ppm [Gray et al. 1954].

Existing short-term exposure guidelines: American Industrial Hygiene Association [AIHA 1964] Emergency Exposure Limits (EELs):

5-minute EEL: 35 ppm

15-minute EEL: 25 ppm

30-minute EEL: 20 ppm

60-minute EEL: 10 ppm

National Research Council [NRC 1985] Short-term Public Emergency Guidance Levels (SPEGLs):

1-hour SPEGL: 1 ppm

2-hour SPEGL: 0.5 ppm

4-hour SPEGL: 0.25 ppm

8-hour SPEGL: 0.12 ppm

16-hour SPEGL: 0.06 ppm

24-hour SPEGL: 0.04 ppm

ACUTE TOXICITY DATA:

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀ (ppm)	LC ₁₀ (ppm)	Time	Adjusted 0.5-hrLC (CF*)	Derived value
G. pig	Buckley & Balchum 1965	30315	---	1 hr	37 ppm (1.22)	258 ppm (0.82)
Rabbit	Carson et al. 1962	---	---	15 min	---	---
Rat	Gray et al. 1954	68	---	4 hr	123 ppm (1.81)	12 ppm
Rat	Gray et al. 1954	138	---	30 min	138 ppm (1.0)	14 ppm
Mouse	Hlalado & Machado 1977	1,000	---	10 min	730 ppm (0.73)	73 ppm
Dog	Steadman et al. 1966	---	64	8 hr	141 ppm (2.21)	14 ppm
Monkey	Steadman et al. 1966	---	64	8 hr	141 ppm (2.21)	14 ppm

*Note: Conversion factor (CF) was determined with "n" = 3.5 [ten Berge et al. 1986].

Human data: It has been reported that 10 to 20 ppm has been mildly irritating [Patty 1963]. Exposure to 150 ppm or more (no time period given) has been reported to cause death from pulmonary edema [NRC 1979]. It has been predicted that 50% lethality would occur following exposure to 174 ppm for 1 hour [Book 1982].

Revised IDLH: 20 ppm
Basis for revised IDLH: The revised IDLH for nitrogen dioxide is 20 ppm based on acute inhalation toxicity data in humans [Patty 1963]. This may be a conservative value due to the lack of relevant acute toxicity data for workers exposed to concentrations above 20 ppm.

REFERENCES:

- American Industrial Hygiene Association, Toxicology Committee [1964]. Emergency exposure limits. Am Ind Hyg Assoc J 25:578-586.
- Book SA [1982]. Scaling toxicity from laboratory animals to people: an example with nitrogen dioxide. J Toxicol Environ Health 9:719-725.
- Buckley RD, Balchum OJ [1965]. Acute and chronic exposures to nitrogen dioxide. Effects on oxygen consumption and enzyme activity on guinea pig tissues. Arch Environ Health 10:220-223.
- Carson TR, Rosenholtz MS, Wilinski FT, Weeks MH [1962]. The responses of animals inhaling nitrogen dioxide for single, short-term exposures. Am Ind Hyg Assoc J 23:457-462.
- Gray E LeB, Patton FM, Goldberg SB, Kaplan E [1954]. Toxicity of the oxides of nitrogen. II. Acute inhalation toxicity of nitrogen dioxide, red fuming nitric acid, and white fuming nitric acid. AMA Arch Ind Hyg Occup Med 10:418-422.
- Hlalado CJ, Machado AM [1977]. Effect of nitrogen dioxide on Swiss albino mice. J Combustion Toxicol 4:246-253.
- NIOSH [1974]. QW98000. Nitrogen dioxide. In: The toxic substances list, 1974 ed. Rockville, MD: U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Center for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health, DHEW (NIOSH) Publication No. 74-134, p. 534.
- NRC [1979]. Nitrogen dioxide: an assessment of the health effects of short-term exposure. Washington, DC: National Academy of Sciences, National Research Council, Committee on Toxicology.
- NRC [1985]. Emergency and continuous exposure guidance levels for selected airborne contaminants. Vol. 4. Washington, DC: National Academy Press, Committee on Toxicology, Board

II.1.18 CO

Carbon monoxide

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 630-08-0

NIOSH REL: 35 ppm (40 mg/m³) TWA, 200 ppm (229 mg/m³) CEILING

Current OSHA PEL: 50 ppm (55 mg/m³) TWA

1989 OSHA PEL: 35 ppm (40 mg/m³) TWA, 200 ppm (229 mg/m³) CEILING

1993-1994 ACGIH TLV: 25 ppm (29 mg/m³) TWA

Description of Substance: Colorless, odorless gas.

LEL: ... 12.5% (10% LEL, 12,500 ppm)

Original (SCP) IDLH: 1,500 ppm

Basis for original (SCP) IDLH: The chosen IDLH is based on the statement by Patty [1963] that a 1-hour exposure to 1,000 to 1,200 ppm would cause unpleasant, but no dangerous symptoms [Henderson et al. 1921]. Patty [1963] also reported that 1,500 to 2,000 ppm might be a dangerous concentration for an exposure of 1 hour [Henderson et al. 1921].

Existing short-term exposure guidelines: National Research Council [NRC 1987] Emergency Exposure Guidance Levels (EEGLs):

10-minute EEGL: 1,500 ppm

30-minute EEGL: 800 ppm

60-minute EEGL: 400 ppm

24-hour EEGL: 50 ppm

ACUTE TOXICITY DATA

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀ (ppm)	LC ₁₀ (ppm)	Time	Adjusted 0.5-hr LC (CF)	Derived Value
Rat	Hartzell et al. 1985	8,636	5,207	15 min	6,822 ppm (0.79)	682 ppm
Rat	Hartzell et al. 1985	8,636	5,207	30 min	5,207 ppm (1.0)	521 ppm
Human	Lefaux 1968	---	4,000	30 min	4,000 ppm (1.0)	400 ppm
Rat	Rose et al. 1970	1,784	---	4 hr	3,568 ppm (2.0)	357 ppm
Mouse	Rose et al. 1970	2,414	---	4 hr	4,828 ppm (2.0)	482 ppm
G. pig	Rose et al. 1970	5,647	---	4 hr	11,294 ppm (2.0)	1,129 ppm
Human	Tab Biol Per 1933	---	5,000	5 min	2,750 ppm (0.55)	275 ppm

Other animal data: The median effective concentrations to produce incapacitation (EC₅₀s) in rats have been determined to be 2,667 ppm and 1,450 ppm in 15 and 30 minutes, respectively [Hartzell et al. 1985].

Other human data: It has been stated that a 1-hour exposure to 1,000 to 1,200 ppm would cause unpleasant but no dangerous symptoms, but that 1,500 to 2,000 ppm might be a dangerous concentration after 1 hour [Henderson et al. 1921a, 1921b]. In general, a carboxyhemoglobin (COHb) level of 10-20% will only cause slight headaches [NIOSH 1972] and a COHb of 11-13% will have no effect on hand and foot reaction time, hand steadiness, or coordination [Stewart and Peterson 1970]. At a COHb of 35%, manual dexterity is impaired [Stewart 1975]. At 40% COHb, mental confusion, added to increasing incoordination, precludes driving an automobile [Stewart 1975]. A 30-minute exposure to 1,200 ppm will produce a COHb of 10-13% [NIOSH 1972].

Revised IDLH: 1,200 ppm Basis for revised IDLH: The revised IDLH for carbon monoxide is 1,200 ppm based on acute inhalation toxicity data in humans [Henderson et al. 1921a, 1921b; NIOSH 1972; Stewart and Peterson 1970].

REFERENCES:

- Hartzell GE, Priest DN, Switzer WG [1985]. Modeling of toxicological effects of fire gases. II. Mathematical modeling of intoxication of rats by combined carbon monoxide and hydrogen cyanide. *J Fire Sci* 3:115-128.
- Henderson Y, Haggard HW, Teague MC, Prince AL, Wunderlich RM [1921]. Physiological effects of automobile exhaust gas and standards of ventilation for brief exposures. *J Ind Hyg* 3(3):79-92.
- Henderson Y, Haggard HW, Teague MC, Prince AL, Wunderlich RM [1921]. Physiological effects of automobile exhaust gas and standards of ventilation for brief exposures. IV. Concordance of the standard here proposed with the observations of other investigators. *J Ind Hyg* 4(4):137-146.
- Lefaux R [1968]. Practical toxicology of plastics. Cleveland, OH: Chemical Rubber Co.
- NIOSH [1972]. NIOSH criteria for a recommended standard: occupational exposure to carbon monoxide. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Center for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health, DHEW (NIOSH) Publication No. HSM 73-11000.
- NRC [1987]. Emergency and continuous exposure guidance levels for selected airborne contaminants. Vol. 7. Ammonia, hydrogen chloride, lithium bromide, and toluene. Washington, DC: National Academy Press, Committee on Toxicology, Board on Toxicology and Environmental Health Hazards, Commission on Life Sciences, National Research Council, pp. 17-38.
- Patty FA, ed. [1963]. Industrial hygiene and toxicology. 2nd rev. ed. Vol. II. Toxicology. New York, NY: Interscience Publishers, Inc., p. 930.
- Rose CS, Jones RA, Jenkins LJ Jr, Siegel J [1970]. The acute hyperbaric toxicity of carbon monoxide. *Toxicol Appl Pharmacol* 17:752-760.
- Stewart RL [1975]. The effect of carbon monoxide on humans. *Am Rev Pharmacol* 75:409-423.
- Stewart RL, Peterson MR [1970]. Experimental human exposure to carbon monoxide. *Arch Environ Health* 72:154-164.

II.1.20 CO₂

Carbon dioxide

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 124–38–9

NIOSH REL: 5,000 ppm (9,000 mg/m³) TWA.

30,000 ppm (54,000 mg/m³) STEL

Current OSHA PEL: 5,000 ppm (9,000 mg/m³) TWA

1989 OSHA PEL: 10,000 ppm (18,000 mg/m³) TWA.

30,000 ppm (54,000 mg/m³) STEL

1993-1994 ACGIH TLV: 5,000 ppm (9,000 mg/m³) TWA.

30,000 ppm (54,000 mg/m³) STEL

Description of Substance: Colorless, odorless gas.

LEL: ... Nonflammable Gas

Original (SCP) IDLH: 50,000 ppm

Basis for original (SCP) IDLH: The chosen IDLH is based on the statements by ACGIH [1971] that a 30-minute exposure at 50,000 ppm produces signs of intoxication, and a few minutes of exposure at 70,000 ppm and 100,000 ppm produces unconsciousness [Flury and Zernik 1931]. AIHA [1971] reported that 100,000 ppm is the atmospheric concentration immediately dangerous to life. In addition, Hunter [1975] noted that exposure to 100,000 ppm for only a few minutes can cause loss of consciousness.

Short-term exposure guidelines: None developed

ACUTE TOXICITY DATA

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀ (ppm)	LC ₁₀ (ppm)	Time	Adjusted 0.5-hr LC (CF)	Derived Value
Human	Tab Biol Per 1933	—	90,000	5 min	49,500 ppm (0.55)	4,950 ppm

Other human data: Signs of intoxication have been produced by a 30-minute exposure at 50,000 ppm [Aero 1953], and a few minutes exposure at 70,000 to 100,000 ppm produces unconsciousness [Flury and Zernik 1931]. It has been reported that submarine personnel exposed continuously at 30,000 ppm were only slightly affected, provided the oxygen content of the air was maintained at normal concentrations [Schaefer 1951]. It has been reported that 100,000 ppm is the atmospheric concentration immediately dangerous to life [AIHA 1971] and that exposure to 100,000 ppm for only a few minutes can cause loss of consciousness [Hunter 1975].

Revised IDLH: 40,000 ppm **Basis for revised IDLH:** The revised IDLH for carbon dioxide is 40,000 ppm based on acute inhalation toxicity data in humans [Aero 1953; Flury and Zernik 1931; Schaefer 1951].

REFERENCES:

1. ACGIH [1971]. Carbon dioxide. In: Documentation of the threshold limit values for substances in workroom air. 3rd ed. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, p. 39.
2. Aero Medical Association [1953]. Committee on Aviation Toxicology. Blakiston, New York.
3. AIHA [1964]. Carbon dioxide. In: Hygienic guide series. Am Ind Hyg Assoc J 25:519-521.
4. Flury F, Zernik F [1931]. Schädliche gase dämpfe, nebel, rauch- und staubarten. Berlin, Germany: Verlag von Julius Springer, pp. 218-219 (In German).
5. Hunter D [1975]. The diseases of occupations. 5th ed. London, England: Hodder and Stoughton, p. 618.
6. Schaefer KE [1951]. Studies of carbon dioxide toxicity. New London, CT: Navy Department, Bureau of Medicine and Surgery, Medical Research Laboratory, U.S. Naval Submarine Base, Vol. 10, Report No. 181, pp. 156-189.
7. Tab Biol Per [1933]: 3:231 (In German).

II.1.22 Benzol

Benzene

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 71-43-2

NIOSH REL: 0.1 ppm TWA, 1 ppm STEL; NIOSH considers benzene to be a potential occupational carcinogen as defined by the OSHA carcinogen policy [29 CFR 1990].

Current OSHA PEL: 1 ppm TWA, 5 ppm STEL

1989 OSHA PEL: Same as current PEL

1993-1994 ACGIH TLV: 10 ppm (32 mg/m³) TWA, A2

Description of substance: Colorless to light-yellow liquid with an aromatic odor.

LEL: 1.2% (10% LEL, 1,200 ppm)

Original (SCP) IDLH: 3,000 ppm

Basis for original (SCP) IDLH: The chosen IDLH is based on the report in Patty [1963] that for man, a single exposure to 3,000 ppm is endurable for 0.5 to 1 hour [Flury 1928].

Existing short-term exposure: National Research Council [NRC 1986] guidelines

Emergency Exposure Guidance Levels (EGLs):

1-hour EGL: 50 ppm

24-hour EGL: 2 ppm

ACUTE TOXICITY DATA

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀ (ppm)	LCLo (ppm)	Time	Adjusted	Derived Value
					0.5-hr LC (CF)	
Rabbit	Carpenter et al. 1944	44,000	30 min	45,000 ppm (1.0)	4,500 ppm	
Dog	Spector 1955	44,923	?	?	?	
Cat	Spector 1955	52,308	?	?	?	
Human	Tab Biol Per 1933	20,000	5 min	11,000 ppm (0.55)	1,100 ppm	

Other human data: It has been stated that 3,000 ppm is endurable for 0.5 to 1 hour [Flury 1928]. It has also been stated that exposure at 19,000 to 20,000 ppm for 5 to 10 minutes is fatal; exposure at 7,500 ppm for 30 minutes is dangerous; exposure at 1,500 ppm for 60 minutes induces serious symptoms; exposure at 500 ppm for 60 minutes leads to symptoms of illness; exposure at 50 to 150 ppm for 5 hours produces headache, lassitude, and weakness; and exposure at 25 ppm for 8 hours has no effect [Gerarde 1960].

Revised IDLH: 500 ppm

Basis for revised IDLH: The revised IDLH for benzene is 500 ppm based on acute inhalation toxicity data in humans [Gerarde 1960]. [Note: NIOSH recommends as part of its carcinogen policy that the "most protective" respirators be worn for benzene at concentrations above 0.1 ppm. OSHA currently requires in 29 CFR 1910.1028 that workers be provided with and required to wear and use the "most protective" respirators in concentrations exceeding 1,000 ppm (i.e., 1,000 x the PEL).]

References:

- Carpenter CP, Shaffer CB, Weil CS, Smyth HF Jr [1944]. Studies on the inhalation of 1:3-butadiene; with a comparison of its narcotic effect with benzol, toluol, and styrene, and a note on the elimination of styrene by the human. *J Ind Hyg Toxicol* 26(3):69-78.
- Flury F [1928]. Moderne gewerbliche vergiftungen in pharmakologisch-toxikologischer hinsicht (Pharmacological-toxicological aspects of intoxicants in modern industry). *Arch Exp Pathol Pharmacol* 138:65-82 (translated).
- Gerarde HW [1960]. Toxicology and biochemistry of aromatic hydrocarbons. New York, NY: Elsevier Publishing Company.
- NRC [1986]. Emergency and continuous exposure guidance levels for selected airborne contaminants. Vol. 6. Benzene and ethylene oxide. Washington, DC: National Academy Press. Committee on Toxicology, Board on Toxicology and Environmental Health Hazards, Commission on Life Sciences, National Research Council, pp. 7-33.
- Patty FA, ed. [1963]. Industrial hygiene and toxicology. 2nd rev. ed. Vol. II. Toxicology. New York, NY: Interscience Publishers, Inc., p. 1221.
- Spector WS, ed. [1955]. Handbook of toxicology. Vol. 1. Acute toxicities of solids, liquids and gases to laboratory animals. Philadelphia, PA: W.B. Saunders Co., p. 324.
- Tab Biol Per [1933]: 3:231 (in German).

II.1.24 Toluol

Toluene

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 108–88–3

NIOSH REL: 100 ppm (375 mg/m³) TWA, 150 ppm (560 mg/m³) STEL

Current OSHA PEL: 200 ppm TWA, 300 ppm CEILING,

500 ppm 10-minute MAXIMUM PEAK

1989 OSHA PEL: 100 ppm (375 mg/m³) TWA, 150 ppm (560 mg/m³) STEL

1993-1994 ACGIH TLV: 50 ppm (188 mg/m³) TWA [skin]

Description of substance: Colorless liquid with a sweet, pungent, benzene-like odor.

LEL: ... 1.1% (10% LEL, 1,100 ppm)

Original (SCP) IDLH: 2,000 ppm

Basis for original (SCP) IDLH: The chosen IDLH seems reasonable based on the statements by Patty [1963] and ANSI [1973]. Patty [1963] reported that with 600 ppm, extreme fatigue, mental confusion, exhilaration, nausea, headache, and dizziness resulted by the end of 3 hours [von Oettingen et al. 1942]. ANSI [1973] reported that exposures to concentrations greater or longer than 4,000 ppm for 5 minutes might limit self-rescue ability.

Existing short-term exposure guidelines: National Research Council [NRC 1987] Emergency Exposure Guidance Levels (EEGLs):

1-hour EEGL: 200 ppm

24-hour EEGL: 100 ppm

ACUTE TOXICITY DATA:

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀ (ppm)	LC ₁₀ (ppm)	Time	Adjusted 0.5-hr LC (CF)	Derived value
Rat	Benignus 1981	>26,700	—	1 hr	>33,375 ppm (1.25)	>3,338 ppm
Mouse	Benignus 1981	400	—	24 hr	1,440 ppm (3.6)	144 ppm
Rabbit	Smyth & Carpenter 1944	—	55,000	40 min	60,500 ppm (1.1)	6,050 ppm

Other animal data: RD₅₀ (mouse), 5,300 ppm [Nielsen and Alarie 1982].

Human data: It has been reported that extreme fatigue, mental confusion, exhilaration, nausea, headache and dizziness resulted from exposures to 600 ppm by the end of 3 hours [von Oettingen et al. 1942]. In addition, the following observations have been made: some workers will tolerate concentrations ranging up to 200 ppm for 6 to 8 hours daily with no demonstrable ill effects; 200 to 500 ppm for 6 to 8 hours will cause tiredness and lassitude in most workers; and concentrations over 500 ppm for 1 to 3 hours are definitely dangerous and will cause symptoms attributable to depression of the central nervous system and the bone marrow [Wilson 1943]. It has also been reported that exposure to concentrations greater than 4,000 ppm for more than 5 minutes might limit self-rescue ability [ANSI 1973]. After 20 minutes, exposures to concentrations at 300, 500, or 700 ppm resulted in significant increases in reaction times; a significant decrease in perceptual speed resulted after a 20-minute exposure to 700 ppm [Gamberale and Hultengren 1972].

Revised IDLH: 500 ppm Basis for revised IDLH: The revised IDLH for toluene is 500 ppm based on acute inhalation toxicity data in humans [Gamberale and Hultengren 1972; von Oettingen et al. 1942; Wilson 1943].

REFERENCES:

- ANSI [1973]. American National Standard, acceptable concentrations of toluene. New York, NY: American National Standards Institute, p. 6.
- Benignus VA [1981]. Health effects of toluene: a review. *Neurotoxicol* 2:567-588.
- Gamberale F, Hultengren M [1972]. Toluene exposure. II. Psychophysiological functions. *Scand J Work Environ Health* 9:131-139.
- Nielsen GD, Alarie Y [1982]. Sensory irritation, pulmonary irritation, and respiratory stimulation by airborne benzene and alkylbenzenes: prediction of safe industrial exposure levels and correlation of their thermodynamic properties. *Toxicol Appl Pharmacol* 65:459-477.
- NRC [1987]. Emergency and continuous exposure guidance levels for selected airborne contaminants. Vol. 7. Ammonia, hydrogen chloride, lithium bromide, and toluene. Washington, DC: National Academy Press, Committee on Toxicology, Board on Toxicology and Environmental Health Hazards, Commission on Life Sciences, National Research Council, pp. 47-61.
- Patty FA, ed. [1963]. Industrial hygiene and toxicology. 2nd rev. ed. Vol. II. Toxicology. New York, NY: Interscience Publishers, Inc., p. 1227.
- Smyth HF Jr, Carpenter CP [1944]. The place of the range finding test in the industrial toxicology laboratory. *J Ind Hyg Toxicol* 26:269-273.
- von Oettingen WF, Neal PA, Donahue DD [1942]. The toxicity and potential dangers of toluene: preliminary report. *JAMA* 118:579-584.
- Wilson RH [1943]. Toluene poisoning. *JAMA* 123:1106-1108.

II.1.26 Xylol

Xylene (o-, m-, p-isomers)

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS numbers: 95-47-6 (o-isomer), 108-38-3 (m-isomer), 106-42-3 (p-isomer)

NIOSH REL: 100 ppm (435 mg/m³) TWA, 150 ppm (655 mg/m³) STELCurrent OSHA PEL: 100 ppm (435 mg/m³) TWA1989 OSHA PEL: 100 ppm (435 mg/m³) TWA, 150 ppm (655 mg/m³) STEL1993-1994 ACGIH TLV: 100 ppm (434 mg/m³) TWA, 150 ppm (651 mg/m³) STEL

Description of substance: Colorless liquid with an aromatic odor.

LEL: ...0.9-1.1% (10% LEL, 900-1,100 ppm)

Original (SCP) IDLH: 1,000 ppm

Basis for original (SCP) IDLH: The chosen IDLH is based on the following statements by ANSI [1971]. "Exposure at 1,000 ppm for 5 minutes or less will probably allow self-rescue with no irreversible injury. Higher concentrations or longer exposure periods can cause eye and respiratory tract irritation, and the beginning of narcotic effects which may limit self-rescue ability. This information is based on human experience and extrapolation from animal data."

Existing short-term exposure guidelines: National Research Council [NRC 1984] Emergency Exposure Guidance Levels (EEGLs):

1-hour EEGL: 200 ppm

24-hour EEGL: 100 ppm

ACUTE TOXICITY DATA:

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀ (ppm)	LC ₁₀ (ppm)	Time	Adjusted 0.5-hr LC (CF)	Derived value
o-Xylene Rat	Cameron et al. 1938	---	6,125	12 hr	73,500 ppm (2.9)	7,350 ppm
o-Xylene Human	Gekkan Yakuji 1980	---	6,125	12 hr	73,500 ppm (2.9)	7,350 ppm
m-Xylene Mouse	Cameron et al. 1938	---	2,010	24 hr	7,236 ppm (3.6)	724 ppm
m-Xylene Rat	Smyth et al. 1962	---	8,000	4 hr	16,000 ppm (2.0)	1,600 ppm
p-Xylene Mouse	Arch Exp Pathol Pharmacol 1929	---	3,401	?	?	?
p-Xylene Rat	Harper et al. 1977	4,550	---	4 hr	9,100 ppm (2.0)	910 ppm
Xylene Human	Morley et al. 1970	---	10,000	18 hr	33,000 ppm (3.3)	3,300 ppm
Xylene Rat	NPIRI 1974	5,000	---	4 hr	10,000 ppm (2.0)	1,000 ppm
Xylene G. pig	Smyth and Smyth 1928	---	450	?	?	?

Other animal data: RD50 (mouse): 1,467 ppm [DeCeaurriz et al. 1981].

Other human data: It has been reported that 1,000 ppm for 5 minutes or less will probably allow self-rescue with no irreversible injury [ANSI 1971]. Volunteers found 200 ppm to be definitely irritating to the eyes, nose, and throat [Nelson et al. 1943]. Reaction time was not affected in 23 volunteers exposed to 100 or 200 ppm for 3 to 7 hours [Ogata et al. 1970]. No noticeable changes in reaction time or short-term memory tests were seen in 15 volunteers exposed to 100 or 300 ppm for 70 minutes [Gamberale et al. 1978].

Revised IDLH: 900 ppm
Basis for revised IDLH: The revised IDLH is 900 ppm based on acute inhalation toxicity data in animals [Cameron et al. 1938; DeCeaurriz et al. 1981; Harper et al. 1977; NPIRI 1974]. Although this may be a conservative value due to the lack of relevant acute toxicity data for workers exposed to concentrations above 300 ppm, this value would have otherwise been selected for safety considerations (i.e., being 10% of the lower explosive limit of 0.9% for o-xylene).

REFERENCES:

- Arch Exp Pathol Pharmacol [1929]. Toxicity of various hydrocarbon vapors; 143:223-233 (in German).
- ANSI [1971]. American national standard, acceptable concentrations of xylene (dimethyl benzene). New York, NY: American National Standards Institute, Inc., ANSI Z37.10-1971, p. 7.
- Cameron GR, Paterson JLH, de Saram GSW, Thomas JC [1938]. The toxicity of some methyl derivatives of benzene with special reference to pseudocumene and heavy coal tar naphtha. J Pathol Bacteriol 46:95-107.
- DeCeaurriz JC, Micillino JC, Bonnet P, Guenier JP [1981]. Sensory irritation caused by various industrial airborne chemicals. Toxicol Lett 9(2):137-143.
- Gamberale F, Annwall G, Hultengren M [1978]. Exposure to xylene and ethylbenzene. III. Effects on central nervous functions. Scand J Work Environ Health 4:204-211.
- Gekkan Yakuji (Pharmaceuticals Monthly) [1980]; 22(5):883-889 (in Japanese).
- Harper C, Drew RT, Fouts JR [1977]. Benzene and p-xylene: a comparison of inhalation toxicities and in vitro hydroxylations. In: Biological reactive intermediates, formulation, toxicity, and inactivation. Proceedings of the International Conference, Twiku, Finland, 1975. New York, NY: Plenum Publishing Corporation, pp. 302-311.
- Morley R, Eccleston DW, Douglas CP, Greville WEJ, Scott DJ, Anderson J [1970]. Xylene poisoning: a report on one fatal case and two cases of recovery after prolonged unconsciousness. Br Med J 3:442-443.
- Nelson KW, Ege JF, Ross M, Woodman LE, Silverman L [1943]. Sensory response to certain industrial solvent vapors. J Ind Hyg Toxicol 25(7):282-285.
- NPIRI [1974]. Raw materials data handbook, physical and chemical properties, fire hazard and health hazard data. Vol. 1. Organic solvents. Bethlehem, PA: National Printing Ink Research Institute, p. 123.
- NRC [1984]. Emergency and continuous exposure limits for selected airborne contaminants. Vol. 2. Washington, DC: National Academy Press, Committee on Toxicology, Board on Toxicology and Environmental Health Hazards, Commission on Life Sciences, National Research Council, pp. 113-123.
- Ogata M, Tomokuni K, Tatatsuka Y [1970]. Urinary excretion of hippuric acid and m- or p-methylhippuric acid in the urine of persons exposed to vapours of toluene and m- and p-xylene as a test of exposure. Br J Ind Med 27:43-50.
- Smyth HF, Smyth HF Jr [1928]. Inhalation experiments with certain lacquer solvents. J Ind Hyg 10(8):261-271.
- Smyth HF, Carpenter CP, Well CS, Pozzani UC, Striegel JA [1962]. Range-finding toxicity data: Ilist VI. Am Ind Hyg Assoc J 23:95-107.

II.1.28 Styrol

Styrene

Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH)

May 1994

CAS number: 100–42–5

NIOSH REL: 50 ppm (215 mg/m³) TWA, 100 ppm (425 mg/m³) STEL

Current OSHA PEL: 100 ppm TWA, 200 ppm CEILING,

600 ppm 5-minute MAXIMUM PEAK IN ANY 3 HOURS

1989 OSHA PEL: 50 ppm (215 mg/m³) TWA, 100 ppm (425 mg/m³) STEL

1993-1994 ACGIH TLV: 50 ppm (213 mg/m³) TWA,

100 ppm (426 mg/m³) CEILING [skin]

Description of substance: Colorless to yellow, oily liquid with a sweet, floral odor.

LEL: ... 0.9% (10% LEL, 900 ppm)

Original (SCP) IDLH: 5,000 ppm

Basis for original (SCP) IDLH: The chosen IDLH is based on the statement by Patty [1963] that rats and guinea pigs exposed to 5,000 ppm become unconscious within 1 hour [Spencer et al. 1942].

Short-term exposure guidelines: None developed

ACUTE TOXICITY DATA:

Lethal concentration data:

Species	Reference	LC ₅₀ (ppm)	LC ₁₀ (ppm)	Time	Adjusted 0.5-hr LC (CF)	Derived value
Mouse	Izmerov et al. 1982	2,194	—	4 hr	4,388 ppm (2.0)	439 ppm
Human	Lefaux 1978	—	10,000	30 min	10,000 ppm (1.0)	1,000 ppm
G. pig	Spencer et al. 1942	—	2,771	14 hr	8,314 ppm (3.0)	831 ppm
Rat	Tiunov et al. 1982	5,543	—	4 hr	11,085 ppm (2.0)	1,109 ppm

Other animal data: RD₅₀ (mouse), 980 ppm [Alarie 1981].

Other human data: Volunteers exposed to 376 ppm for up to 7 hours experienced unpleasant subjective symptoms and objective signs of neurologic impairment [Stewart et al. 1968]. Drowsiness, nausea, headache, fatigue, and dizziness have been reported in workers exposed to 200 to 700 ppm [AIHA 1959].

Revised IDLH: 700 ppm Basis for revised IDLH: The revised IDLH for styrene is 700 ppm based on acute inhalation toxicity data in humans [AIHA 1959; Stewart et al. 1968].

REFERENCES:

1. AIHA [1959]. Styrene monomer. In: Hygienic guide series. Akron, OH: American Industrial Hygiene Association.
2. Alarie Y [1981]. Dose-response analysis in animal studies: prediction of human responses. Environ Health Perspect 42:9-13.
3. Izmerov NF, Sanotsky IV, Sidorov KK [1982]. Toxicometric parameters of industrial toxic chemicals under single exposure. Moscow, Russia: Centre of International Projects, GKNT, p. 106.
4. Lefaux R [1978]. Practical toxicology of plastics. Cleveland, OH: Chemical Rubber Co., p. 77.
5. Patty FA, ed. [1963]. Industrial hygiene and toxicology. 2nd rev. ed. Vol. II. Toxicology. New York, NY: Interscience Publishers, Inc., p. 1230.
6. Spencer HC, Irish DD, Adams EM, Rowe VK [1942]. The response of laboratory animals to monomeric styrene. J Ind Hyg Toxicol 24(10):295-296.
7. Stewart RD, Dodd HC, Baretta ED, Schaffer AW [1968]. Human exposure to styrene vapor. Arch Environ Health 16:656-662.
8. Tiunov LA, Zhuvov VG, et al. [1982]. Toxicity of sulfothreenaphtlenfurane. Gig Tr Prof Zabol 26(8):53-56 (in Russian).

Glossar

Begriff	Bedeutung
ASTRA	Bundesamt für Strassen
Batteriefahrzeug	Elektrofahrzeug, dessen Energie ausschliesslich in Form einer wiederaufladbaren Batterie (auch Akkumulator) gespeichert wird.
Benzin PHEV	Plug-In Hybridfahrzeug, das seine Energie für den Verbrennungsmotor in Form des Brennstoffes «Benzin» gespeichert hat.
BEV	Engl. <i>Battery Electric Vehicle</i> → Batteriefahrzeug
Brennstoffzellenfahrzeug	Elektrofahrzeug, das mit einem Elektromotor angetrieben und dessen Energie in einer Brennstoffzelle erzeugt wird.
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstung
Diesel PHEV	Plug-In Hybridfahrzeug, das seine Energie für den Verbrennungsmotor in Form des Brennstoffes «Diesel» gespeichert hat.
Elektrofahrzeug	Fahrzeug, das mit einem Elektromotor angetrieben wird.
Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung	Elektrofahrzeug, das mit einem Elektromotor angetrieben wird und das über einen zusätzlichen Verbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle zur mobilen Aufladung der Batterie verfügt (eigentlich Hybrid, da 2 Energiewandler und 2 Energiequellen).
Elektromobilität	Personen- und Güterverkehr mittels Fahrzeugen, die mit elektrischer Energie angetrieben werden.
FCHEV	Engl. <i>Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle</i> → Brennstoffzellenfahrzeug
HEV	Engl. <i>Hybrid Electric Vehicle</i> → Hybridfahrzeug
Hybrid Benzin	Hybridfahrzeug, das seine Energie für den Verbrennungsmotor in Form des Brennstoffes «Benzin» gespeichert hat.
Hybrid Diesel	Hybridfahrzeug, das seine Energie für den Verbrennungsmotor in Form des Brennstoffes «Diesel» gespeichert hat.
Hybridfahrzeug	Elektrofahrzeug, das sowohl zwei Energiewandler (Elektromotor und Verbrennungsmotor) beinhaltet als auch über zwei verschiedene Energiespeicher verfügt (Bsp. Batterie und Brennstoff). Die Batterie ist nicht am Netz aufladbar.
IDLH	Engl. <i>Immediately Dangerous to Life or Health</i>
ISO	Engl. <i>International Organization for Standardization</i>
NIOSH	Engl. <i>National Institute for Occupational Safety and Health</i> . Amerikanische Bundesbehörde für arbeitsmedizinische Forschung.
PHEV	Engl. <i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> → Plug-In Hybridfahrzeug
Plug-In Hybridfahrzeug	Elektrofahrzeug, das sowohl zwei Energiewandler (Elektromotor und Verbrennungsmotor) beinhaltet als auch über zwei verschiedene Energiespeicher verfügt (Batterie und Brennstoff). Die Batterie ist am Netz aufladbar.
REEV	Engl. <i>Range Extended Electric Vehicle</i> → Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung
RWS	Rijkswaterstaat. Behörde des niederländischen Ministeriums für Infrastruktur und Umwelt, die mit dem Bau und Unterhalt von Strassen und Wasserwegen beauftragt ist.
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Thermal Runaway	→ Thermisches Durchgehen
Thermisches Durchgehen	Eine sich selbstverstärkende, exotherme Reaktion, während der sich eine Batterie durch chemische Vorgänge selbstständig und schnell (>10°C/min) erwärmt, sodass sie ihren stabilen Betriebsbereich verlässt und ein Batteriebrand mit sehr hoher Energieentfaltung entsteht.
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Literaturverzeichnis

- [1] Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvant-Moynot, V., Huet, F. (2016): Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306, 178-192.
- [2] Anderson, J. Larsson, F., Andersson, P., Mellander, B.-E. (2015): Thermal modeling of fire propagation in lithium-ion batteries. <https://www-esv.nhtsa.dot.gov/Proceedings/24/files/24ESV-000073.PDF> Zugriff: 30.01.2017.
- [3] Andersson, P., Anderson, J, Larsson, F., Mellander, B.-E. (2015): Modelling of thermal events in Lithium-ion batteries. *Proceedings of the 2nd IAFSS European Symposium of Fire Safety Science*.
- [4] ASTRA (2007): Branddetektion in Strassentunneln. Richtlinie, ASTRA 13004. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [5] ASTRA (2008): Lüftung der Strassentunnel. Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung. Richtlinie, ASTRA 13001. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [6] ASTRA (2012): Elektromobilität 2012. Bericht des Bundesamts für Strassen ASTRA. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [7] BAFU (2013): Emissionsmessungen bei stationären Anlagen. Emissions-Messempfehlungen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [8] Baumann, M., Felber, T. (2015): Die beliebtesten E-Autos der Schweiz. In: *NZZ*, 28.10.2015.
- [9] Beckmann, J., Pauli, M. J. (2011): Strassenverkehrssicherheitsanalyse der Elektromobilität (SAELMO). Fonds für Verkehrssicherheit.
- [10] Beckmann, J., Suter-Imesch, S., Pauli, M. J. (2012): Mythbuster Elektroauto. Die bekanntesten zehn Halbwahrheiten zur Elektromobilität auf den Kopf gestellt. *Schweizer Forum Elektromobilität*, Bern.
- [11] Bertoldi, C. (2017): Die Zukunft liegt im Untergrund. *Baublatt*, Nr. 33, 22- 26.
- [12] BFE (2009): Risikoabschätzung zu alternativen Treibstoffen und Antrieben. Möglicher Einfluss auf die Risiken des Strassenverkehrs durch Einsatz neuer Antriebskonzepte. Bundesamt für Energie BFE, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [13] BFE (2015): Bericht in Erfüllung der Motion 12.3652. Elektromobilität. Masterplan für eine sinnvolle Entwicklung. Bundesamt für Energie BFE, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [14] BFS (2017): «Mobilität und Verkehr», Medienmitteilung Nr. 2017-0321-D des Bundesamtes für Statistik. Eidgenössisches Departement des Innern EDI, <https://www.bfs.admin.ch/bfsstatic/dam/assets/1901507/master>, Zugriff: 17.01.2018.
- [15] Biello, D. (2013): Should Battery Fires Drive Electric Cars Off the Road? *Scientific American*, <http://www.scientificamerican.com/article/battery-fires-in-electric-cars-danger/> Zugriff: 14.04.2016
- [16] Biteau, H., Steinhaus, T., Schemel, C., Simeoni, A., Marlair, G., Bal, N., Torero, J. L. (2008): Calculation methods for the heat release rate of materials of unknown composition. *Fire Safety Science*, proceedings of the 9th IAFSS international symposium, 1165-1176.

- [17] Broere, W. (2016): Urban underground space: Solving the problems of today's cities. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 245-248.
- [18] Brohez, S., Delvosalle, C., Marlair, G., Tewarson, A. (1998): Accurate calculations of heat release in fires. CHISA'98, Prague, Czech Republic.
- [19] BSW-Solar (Hrsg.) (2014): Einsatz an stationären Lithium-Solarstromspeichern. Hinweise für die Brandbekämpfung und technische Hilfeleistung. Merkblatt für Einsatzkräfte. Herausgegeben vom Bundesverband Solarwirtschaft BSW-Solar.
- [20] Bullis, K. (2013): Are Electric Vehicles a Fire Hazard? *MIT Technology Review*, <https://www.technologyreview.com/s/521976/are-electric-vehicles-a-fire-hazard/> Zugriff: 15.04.2016.
- [21] Buser, M. (2016): Lithium-Batterien. Effektive Schadenverhütung und wirksame Brandbekämpfung. *Brandschutz*, 3, 4-9.
- [22] Buser, M. (2017): Lithiumbatterien – Risiken und Chancen. *Österreichisches Jahrbuch für Risikomanagement 2017*, TÜV Austria Science, 78-87.
- [23] Buser, M., Gruber, K. (2013): So sorgen Sie für Sicherheit beim Umgang mit Lithium-Batterien. *Praxishandbuch Arbeitssicherheit & Gesundheitsschutz im Betrieb*. L 40/1-24.
- [24] Buser, M., Mahliss, J. (2016): Lithium Batterien. Brandgefahren und Sicherheitsrisiken. Effektive Schadenverhütung und wirksame Brandbekämpfung. https://www.riskexperts.at/fileadmin/downloads/Publikationen/Lithiumbatterien__Sicherheitsratgeber__BUSER__Maehliss__2016.pdf , Zugriff: 30.01.2017.
- [25] Colella, F., Biteau, H., Ponchaut, N. F., Marr, K., Somandepalli, V., Horn, Q., Long, R. (2016): Electric vehicle fires. *Tunnel Safety & Security*, 7th International Symposium, Montréal, 629-639.
- [26] Dambrowski, J. (2013): Methoden der Ladezustandsbestimmung und ihre Eignung für LiFePO₄/Li₄Ti₅O₁₂-Zellen – Teil 1. *Elektronik*, 7, 30-35.
- [27] De Haan, P., Bianchetti, R. (2016): Szenarien der Elektromobilität in der Schweiz – Update 2016. Partielles Update der Studie TA-Swiss 59/2013 „Chancen und Risiken der Elektromobilität“. https://www.ebp.ch/sites/default/files/2016-11/2016-10-31_ebp-ch-szenarien_elektromobilitaet_v161031.pdf , Zugriff: 17.01.2018.
- [28] De Haan, P., Zah, R. (2013): Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung, TA-Swiss 59/2013, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- [29] Dlugogorski, B. Z., Mawhinney, J. R. and Huu Duc, V. (1994): The measurement of heat release rates by oxygen consumption calorimetry in fires under suppression. *Fire Safety Science*, proceedings of the 4th IAFSS international symposium, 877-888.
- [30] Drillkens J., Kowal, J., Sauer, D. U. (2015): Speicherung der elektrischen Energie. Superkondensatoren. In: Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 68-76.
- [31] Ecker, M., Sauer, D. U. (2015): Speicherung der elektrischen Energie. Lithium-Ionen-Batterien. In: Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 60-68.
- [32] EKAS (2015): Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz im Umgang mit Hochvolt-systemen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Informationsbroschüre Eidgenössische Koordinationskommission EKAS.
- [33] EMPA (2017): Batterien der Zukunft. *EMPA Quarterly*, Forschung & Innovation #58, 10-21.

- [34] Enderlein, H., Krause, S., Spanner-Ulmer, B. (2012): Elektromobilität – Abschätzung arbeitswissenschaftlich relevanter Veränderungen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin BAUA, Dortmund, Berlin, Dresden.
- [35] Eriksson, T. (2001): LiMn₂O₄ as a Li-Ion Battery Cathode. From Bulk to Electrolyte Interface. Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 651, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, Sweden.
- [36] Europäische Union (2004): Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im trans-europäischen Strassennetz.
- [37] Fire Protection Research Foundation (2010): Fire fighter safety and emergency response for electric drive and hybrid electric vehicles. Final report.
- [38] Fire Protection Research Foundation (2013): Best practices for emergency response to incidents involving electric vehicles battery hazards: a report on full-scale testing results. Final report.
- [39] FKS (2009): Feuerwehr 2015. Konzeption der FKS. Beschluss der Regierungskonferenz der Feuerwehr Koordination Schweiz FKS vom 5. Juni 2009.
- [40] Gehandler, J. (2015): Road tunnel fire safety and risk: a review. *Fire Science Reviews*, 4(2), 1-27.
- [41] Gehandler, J., Karlsson, Vylund, L. (2017): Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages. SP Technical Research Institute of Sweden.
- [42] Hopp, H. (2016): Thermomanagement von Hochleistungsfahrzeug-Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle. Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- [43] Huo, H., Xing, Y., Pecht, M., Züger, B. J., Khare, N., Vezzini, A. (2017): Safety requirements for transportation of lithium batteries. *Energies*, 10(6):793, 1-38.
- [44] Karle, A. (2017): Elektromobilität: Grundlagen und Praxis. Carl Hanser Verlag, München.
- [45] Kowal, J., Sauer, D. U. (2015): Speicherung der elektrischen Energie. Grundlagen und Überblick über die Batterietechnik. In: Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 52-60.
- [46] Kunkelmann, J. (2015): Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen. Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. Forschungsbericht Nr. 175. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik.
- [47] Lam, C., MacNeil, D., Kroeker, R., Loughheed, G., Lalime, G. (2016): Full-scale fire testing of electric and internal combustion engine vehicles. 4th International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2016, Baltimore, USA, 95-106.
- [48] Larsson, F., Anderson, J., Andersson, P., Mellander, B.-E. (2016): Thermal Modeling of Cell-to-Cell Fire Propagation and Cascading Thermal Runaway Failure Effects for Lithium-Ion Battery Cells and Modules Using Fire Walls. *Journal of the Electrochemical Society*, 163(14), A2854-A2865.
- [49] Larsson, F., Andersson, P., Mellander, B. E. (2014): Battery aspects on fires in electrified vehicles. 3rd International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2014, Berlin, Germany, 209-220.
- [50] Larsson, F., Andersson, P., Mellander, B. E. (2016): Lithium-Battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2(9), 1-13.

- [51] Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B., Marlair, G. (2012): Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. 2nd International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2012, Chicago, United States, 183-194.
- [52] Leuthner, S. (2013): Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 13-19.
- [53] LFS (2011): Einsatzhinweise für Elektrofahrzeuge. Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz im Umgang mit Hochvoltssystemen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Landesfeuerwehrschule (LFS) Baden-Württemberg, Bruchsal.
- [54] Liu, X., Wu, Z., Stoliarov, S. I. (2016): Analysis of energy release during thermally-induced failure of lithium ion batteries: Implications for vehicle fire safety. 4th International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2016, Baltimore, USA, 83-94.
- [55] Nedjalkov, A., Meyer, J., Köhring, M., Doering, A., Angelmahr M., Dahle, S., Sander, A., Fischer, A., Schade, W. (2016): Toxic Gas Emissions from Damaged Lithium Ion Batteries - Analysis and Safety Enhancement Solution. Batteries, 2(5), 1-10.
- [56] Rahimzei, E., Sann, K., Vogel, M. (2015): Kompendium: Li-Ionen-Batterien. BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. VDE Verband der Elektrotechnik.
- [57] Roman, J. (2016): The new NFPA Journal explores the fast-emerging technology of big battery energy storage. Are we ready? National Fire Protection Association Blog, National Fire Protection Association (NFPA), <http://nfpato-day.blog.nfpa.org/electric-vehicles/> Zugriff: 14.04.2016.
- [58] Schäper, C., Sauer, D. U. (2015): Batteriesystemtechnik. In: Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 85-93.
- [59] Securius, P., Kähler, N. (2013): Studie zum Brandschutz bei der Beförderung von Fahrzeugen mit Elektroaggregaten oder mit Elektroantrieb auf RoRo- und RoPax-Schiffen. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Deutschland. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Wasser/brandschutz-roro-schiffen.pdf?__blob=publicationFile Zugriff: 30.01.2017.
- [60] SIA (2004): Projektierung Tunnel. Strassentunnel. Norm SIA 197/2, Zürich.
- [61] Sieber, M., Stoiber, T., Haefeli, U., Matti, D. (2015): Forschungspaket Verkehr der Zukunft (2060): Initialprojekt. Forschungsprojekt SVI 2011/021 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI). Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [62] Stülzle, W., Weidmann, U., Klaas-Wissing, T., Kupferschmid, J., Riegel, B. (2015): Vision Mobilität Schweiz 2050. ETH Zürich, Universität St.Gallen.
- [63] Truchot, B., Leroy, G., Marlair, G. (2016): CDF and engineering method coupling for evaluating the fire relative to battery transportation. Conference Paper, 8th International Conference on Tunnel Safety and Ventilation, Graz, 132-140.
- [64] Tschöke, H. (2015): Elektrifizierte Antriebssysteme mit Verbrennungsmotoren. In: Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2-17.
- [65] Tschöke, H. (Hrsg.) (2015): Die Elektrifizierung des Antriebstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- [66] United Nations (2014): World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352). Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York.

- [67] Wawzyniak, M., Wiebelt, A. (2015): Thermomanagement. In: Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 93-103.
- [68] Wisch, M., Ott, J., Thomson, R., Léost, Y., Abert, M., Yao, J. (2014): Recommendations and guidelines for battery crash safety and post-crash safe handling. Everyday Safety for Electric Vehicles (EVERSAFE), ERA-Net collaborative project, work programm "Electromobility+".
- [69] Ziegert, S. (2016): Wettlauf um die beste Batterie. In: NZZ am Sonntag, 17.04.2016.
- [70] Züger, B. J. (2017): Studie: Technologiefolgenabschätzung und Prüfrichtlinien von Li-haltigen Batterien. armasuisse, Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS, Schlussbericht V1.1.
- [71] Zumsteg, F., Steinemann, U., Eisenlohr, M. (2016): On the road to safer tunnels. Conference Paper, 8th International Conference on Tunnel Safety and Ventilation, Graz, 1-8.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 16.03.2018

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2016/221

Projekttitel: Elektromobilität und Tunnelsicherheit - Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände

Enddatum: 31.03.2018

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die vorliegende Studie belegt, dass starke mechanische und thermische Beschädigungen von Elektrofahrzeugbatterien augenblicklich zu unkontrollierbaren Bränden mit hoher Energieentfaltung, starker Rauchentwicklung sowie neuen Schadstoffemissionen führen können. Insgesamt betrachtet, wird die zunehmende Elektromobilität nicht zu einer Verschlechterung der Tunnelsicherheit führen; in bestimmten Aspekten wird sie aber die Gefährdungssituation in Strassentunneln verändern und insbesondere Auswirkungen auf die Ereignisbewältigung haben.

Die Erkenntnisse wurden experimentell hergeleitet, wobei die Versuche in den unterirdischen Anlagen der VersuchsStollen Hagerbach AG durchgeführt wurden, die eine reale Umgebung für Brandversuche mit einem Bezug zu Strassentunneln bieten. Da die Gefährdungen eines Elektrofahrzeugbrandes massgeblich durch die chemische Energiespeicherung beeinflusst werden, wurde der Fokus ausschliesslich auf die Batterie gerichtet. Das Experiment konzentrierte sich auf die maximale Beschädigung einer Lithium-Ionen-Batterie, die in einem rein elektrisch betriebenen und für den Verkehr zugelassenen Fahrzeug verwendet wird (Stand 2017). Es wurden weder Brand- oder Crashtests mit vollständigen Elektrofahrzeugen durchgeführt noch wurden Analysen zur Eintretenswahrscheinlichkeit unternommen.

Die Hypothese, dass sich die Brandgefährdung in Strassentunneln aufgrund von hochkapazitiven Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen generell erhöhen wird, kann aufgrund der Resultate nicht bestätigt werden. Die Studie kommt zum Schluss, dass die thermischen Brandgefährdungen von Elektrofahrzeugen mit jenen von konventionellen Fahrzeugen vergleichbar sind. In unmittelbarer Nähe und bei ungünstigen Lüftungssituationen führen Elektrofahrzeugbrände hingegen zu neuen und potentiell stärkeren chemischen Gefährdungen. Die Schadstoffanalysen deuten auf kritische Konzentrationen der Schwermetalle Kobalt, Lithium und Mangan in Form staubgebundener Aerosole hin. Diese Schadstoffe treten bei konventionellen Fahrzeugbränden nicht in solch erhöhten Mengen auf und sind sowohl für Menschen als auch für die Umwelt toxisch. Es wird angenommen, dass die bestehenden Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen in Strassentunneln für die Bewältigung dieser neuen Gefährdungen ausreichend sind, weshalb keine direkten technischen Anpassungen empfohlen werden.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die aufgeworfenen Fragestellungen wurden mit diesem Forschungsprojekt systematisch und mit einer wissenschaftlichen Vorgehensweise beantwortet. Die folgenden Projektziele wurden dabei erreicht:

1. Experimentelle Analyse der Auswirkungen eines Elektrofahrzeugbrandes in einem Strassentunnel
2. Aufzeigen der tunnelspezifischen Gefährdungsunterschiede eines Elektrofahrzeugbrandes und einem konventionellen Fahrzeugbrand aufgrund der unterschiedlichen Energiespeicherungen
3. Skizzierung der erwarteten risikobezogenen Auswirkungen auf den zukünftigen Betrieb von Strassentunneln und Formulierung möglicher Massnahmen

Folgerungen und Empfehlungen:

Im Kontext der sich verändernden Mobilität unterstützen die nun vorliegenden Erkenntnisse sowohl Sicherheits- und Rettungskräfte in der zukünftigen Ereignisbewältigung; sie vermögen aber auch Betreiber von weiteren unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen (Bsp. Parkhäuser) auf die Veränderung der Gefährdungssituation zu sensibilisieren.

In den Analysen wurden zudem neue Themenfelder aufgedeckt, die in weiteren Schritten vertiefter untersucht bzw. mittels Sofortmassnahmen bearbeitet werden sollten. In diesem Zusammenhang erscheint die Problematik potentieller Schadstoffkontaminationen durch Schwermetalle und Fluorwasserstoff besonders relevant. Weil diesbezüglich im vorliegenden Experiment keine spezifischen Messungen durchgeführt wurden, sind weitergehende Untersuchungen zur Einschätzung der potentiellen Gefährdungslage sehr empfehlenswert.

Publikationen:

Mellert, L. D., Welte, U., Hermann, M., Kompatscher, M., Ponticq, X., Tesson, M., Beckbissinger, J. (2018): Elektromobilität und Tunnelsicherheit. Forschungsprojekt VSS 2016/221 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Bundesamt für Strasse ASTRA, Bern.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Welte Vorname: Urs

Amt, Firma, Institut: Amstein + Walthert Progress AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Im Rahmen der frühzeitig geplanten BK-Sitzungen wurde jeweils der aktuelle Stand des Forschungsprojektes sowie die Ressourcensituation (Budget und Termine) transparent präsentiert und anschliessend protokolliert. Während den Diskussionen hatten die Mitglieder der BK die Möglichkeit, Anmerkungen einzubringen sowie auf allfälligen Anpassungsbedarf hinzuweisen. Die Planung und Durchführung des Experiments sowie der anschliessenden Analysen wurden dadurch optimiert.

Das Projektmanagement insgesamt sowie die erfolgreiche Planung und Durchführung des Experiments und die Aufbereitung der Ergebnisse werden von der BK positiv beurteilt.

Umsetzung:

Die angewandten Methoden zur Untersuchung der Hypothese waren angemessen und vermochten alle Fragestellungen zu beantworten. Sämtliche gesetzten Meilensteine wurden dabei fristgerecht erreicht und der BK an den entsprechenden Terminen präsentiert. Der Schlussbericht führt den Leser systematisch durch die theoretischen Grundlagen der Studie und ermöglicht aufgrund der detaillierten Beschreibung des Versuchsaufbaus die Reproduzierbarkeit der Experimente. Die Messungen und Analysen erfolgten nach wissenschaftlichen Grundsätzen und werden im Bericht in verständlicher Art und Weise wiedergegeben. Der Bezug zwischen den Ergebnissen und den Forschungsfragen wird zum Schluss erneut hergestellt.

weitergehender Forschungsbedarf:

Der weitergehende Forschungsbedarf ergibt sich direkt aus den Messergebnissen. Es wird empfohlen, die Problematik potentieller Schadstoffkontaminationen durch Schwermetalle und Fluorwasserstoff vertiefter zu analysieren. Weil diesbezüglich im vorliegenden Experiment keine spezifischen Messungen durchgeführt wurden, sind weitergehende Untersuchungen zur Einschätzung der potentiellen Gefährdungslage sehr empfehlenswert.

Einfluss auf Normenwerk:

Keiner.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Rogner

Vorname: Arnd

Amt, Firma, Institut: Securiton AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Jolli Efer, 20.3.18 

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.