

# Großbrandtests mit Elektrofahrzeugen für den Transport gefährlicher Güter

Hannes Soderer, Tobias Gleim, Nils Böttcher, Rico Tschirschwitz, Frank Wille,  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Germany  
Kontakt: hannes.soderer@bam.de

## Abstract

Der zunehmende Einsatz von batterieelektrischen Transportfahrzeugen (Battery Electric Transport Vehicles – BETVs) im Verkehrswesen wirft Sicherheitsfragen beim Transport gefährlicher Güter auf. Obwohl Batteriebrände auf Zell-, Modul- und Fahrzeugebene umfassend untersucht wurden, fehlen systematische Daten zu deren thermischen Auswirkungen auf Gefahrgutverpackungen. Um diese Lücke zu schließen, führt die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) auf ihrem Testgelände Technische Sicherheit (BAM-TTS) groß angelegte Brandtests durch, in denen konservative Unfallszenarien mit unterschiedlichen Zellchemien und -kapazitäten nachgestellt werden. Die Tests kombinieren fahrzeugbedingte Brandlasten mit standardisierten Propan-Referenzbränden und erfassen mittels hochauflösender Instrumente zentrale Messgrößen wie Wärmefluss, Temperatur und Strahlung. Der daraus entstehende Datensatz liefert erstmals eine direkte Quantifizierung der thermischen Auswirkungen von BETV-Bränden auf Verpackungen und unterstützt Expertengremien bei der Bewertung, ob bestehende regulatorische Anforderungen für alternative Antriebssysteme weiterhin angemessen sind.

## 1 Motivation

Die sicherheitstechnische Bewertung des Transports gefährlicher Güter ist eine zentrale Aufgabe der BAM. Um diesen Auftrag zu erfüllen, betreibt die BAM umfangreiche wissenschaftliche Forschung und fungiert als verantwortliche Behörde für diesbezügliche Genehmigungsverfahren in Deutschland. Gleichzeitig bringt sich die BAM in verschiedene Gremien ein, um sicherzustellen, dass die laufende Weiterentwicklung der Vorschriften für den Transport gefährlicher Güter den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik reflektiert und somit die Sicherheit bei der Beförderung gewährleistet ist.

Die BAM befasst sich derzeit mit neuen Antriebstechnologien wie batterie- und wasserstoffbetriebenen Transportfahrzeugen. Es werden eine Vielzahl von Fragen, die für die Sicherheitsbewertung relevant sind, sowohl analytisch als auch experimentell untersucht. Beide Antriebstechnologien wurden in den letzten Jahren von der Industrie weiterentwickelt und befinden sich auch derzeit in einem permanenten Optimierungsprozess, sodass noch keine jahrzehntelangen Betriebserfahrungen wie beispielsweise bei Verbrennungsmotoren vorliegen. Infolgedessen sind potenzielle Unfallszenarien noch nicht vollständig identifiziert und aufgrund ihrer Komplexität schwer zu beschreiben, zu modellieren und einzuschätzen. Um diesem Problem zu begegnen, führt die BAM regelmäßig Experimente auf dem BAM-TTS durch, um realistische Unfallszenarien zu analysieren.

In einem aktuellen Forschungsprojekt wird untersucht, ob BETVs für den Transport gefährlicher Güter eingesetzt werden können und welche möglichen Einschränkungen oder Randbedingungen erfüllt sein müssen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Für Transporte mit radioaktiven Stoffen oder explosiven Substanzen hat die BAM potenzielle Gefahrenszenarien identifiziert, in denen ein Batteriebrand die Ladung beeinträchtigen könnte.

Es gibt zahlreiche Studien zu potenziellen Batteriebränden und deren Ursachen, beispielsweise thermisches Durchgehen und mögliche Ausbreitungseffekte über verschiedene

Batteriesysteme hinweg. Dazu gehören Untersuchungen zu eigenständigen Batteriesystemen, Fahrzeugbatteriebränden in offener Umgebung und Tunnelbrandszenarien. Die BAM hat jedoch eine zentrale Wissenslücke identifiziert: Derzeit gibt es keine systematischen Studien, die Batteriebrände speziell im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf den Transport gefährlicher Güter untersuchen. Diese Lücke schränkt sowohl die Arbeit der Ausschüsse als auch die Möglichkeit umfassender behördlicher Genehmigungsverfahren ein, da die Wechselwirkung zwischen Batteriebränden und gefährlicher Fracht bisher nicht im Mittelpunkt der experimentellen Forschung stand.

## 2 Aktueller Stand von Wissenschaft und Technik für Batterieunfallszenarien

Der Anteil von Elektrofahrzeugen in Deutschland im Privat- und Transportverkehr steigt aufgrund politischer und ökologischer Anforderungen stetig an [1]. Infolgedessen ist die Sicherheit von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) und BETVs Gegenstand zahlreicher Untersuchungen geworden [2, 3, 4]. Um Daten über das charakteristische Verhalten dieser Fahrzeuge bei einem Brand zu sammeln, wurden verschiedene groß angelegte Experimente durchgeführt. Das Verfahren ist bei den meisten sehr ähnlich: Ein BEV-Brand wird ausgelöst, entweder durch eine externe Flammenquelle, z. B. eines Propangasbrenners, an das Fahrzeug, oder durch Beschädigung der Batterie, wodurch ein thermisches Durchgehen ausgelöst wird. Der Brand wird dann durch Berechnung der Wärmefreisetzungsrates (HRR) über die Zeit charakterisiert. Dies geschieht häufig durch Sauerstoffverbrauchskalorimetrie, vgl. [5].

Beim Vergleich der HRR von BE(T)Vs mit Verbrennungsmotorfahrzeugen (ICEVs) besteht der Hauptunterschied in lokalen Spitzenwerten (bis zu 10 MW) in der HRR für

BE(T)V's aufgrund der hohen Energiemenge, die in kurzer Zeit durch das Auftreten eines thermischen Durchgehens freigesetzt wird, vgl. [6]. Abgesehen davon unterscheidet sich die gesamte Wärmeabgabe nicht wesentlich, vgl. [7]. Weitere Phänomene, die das Handling unfallgefährdeter BE(T)V's stark beeinflussen, sind die spontane Wiederentzündung beschädigter Batterien und die Fähigkeit von Batterien, in Abwesenheit von Sauerstoff zu brennen, da während eines Brandes chemisch gebundener Sauerstoff aus den Batteriematerialien freigesetzt wird.

Obwohl die HRR das Hauptmerkmal zur Beschreibung eines Fahrzeugbrandes ist, liefert sie keine Informationen über lokale Wärmeflüsse, z. B. in die Ladung. Das aktuelle Forschungsprojekt zielt darauf ab, eine geeignete Datenbasis zu erhalten.

### 3 BAM Testgelände Technische Sicherheit (BAM-TTS)

Für Tests in Realmaßstab bzw. gefährliche, explosive und lärmintensive Experimente betreibt die BAM das Testgelände Technische Sicherheit südlich von Berlin im Bundesland Brandenburg. Das BAM-TTS umfasst eine Vielzahl spezialisierter Testbereiche, darunter verschiedene Wasserstoffversuchsanlagen, ein Sprengstoffversuchsgelände, verschiedene Fallversuchs- und Brandversuchsanlagen. Diese Testanlagen ermöglichen es, ein breites Spektrum an Themen zu behandeln und wichtige Sicherheitsfragen zu beantworten.

#### 3.1 Brandversuchsanlagen

Die BAM betreibt verschiedene Brandversuchsanlagen, die zur Untersuchung und Bewertung einer Vielzahl von Szenarien ausgelegt sind, darunter Poolfeuer, Propanbrände, Wasserstoffbrände, Holzbrände sowie Brandversuche für zerstörende und zerstörungsfreie Untersuchungen. Abbildung 1 zeigt die derzeit aktiven Versuchsanlagen auf dem Brandprüfplatz, versehen mit einer Kurzbeschreibung.

Unter den zahlreichen Brandprüfständen zeigt Abbildung 2 die zerstörungsfreie Brandprüfung mit zwei Brennerringen und einem Feuerreferenzbauteil für eine 30-minütige Brandprüfung mit Propangasflammen, vgl. [8].

#### 3.2 Batterietestanlagen

Die Batterietestanlagen sind über mehrere Standorte auf dem BAM-Gelände verteilt. So werden beispielsweise Batterietests auf Zellebene am Hauptsitz in Berlin Steglitz durchgeführt, wo vollständige Testumgebungen und Messtechnologien zur Verfügung stehen, um Verfahren wie standardisierte Penetrationstests durchzuführen (siehe Abbildung 3). Dort werden eine Vielzahl von Batteriezellen mit unterschiedlichen Kathodenchemien untersucht und verschiedene Aspekte wie Leistung, Energiedichte, Sicherheit und Lebensdauer untersucht. Ein Team aus dem Tätigkeitsbereich Elektrische Energiespeicherung und -umwandlung analysiert den Sicherheitszustand (State-of-Safety) von Batterien.

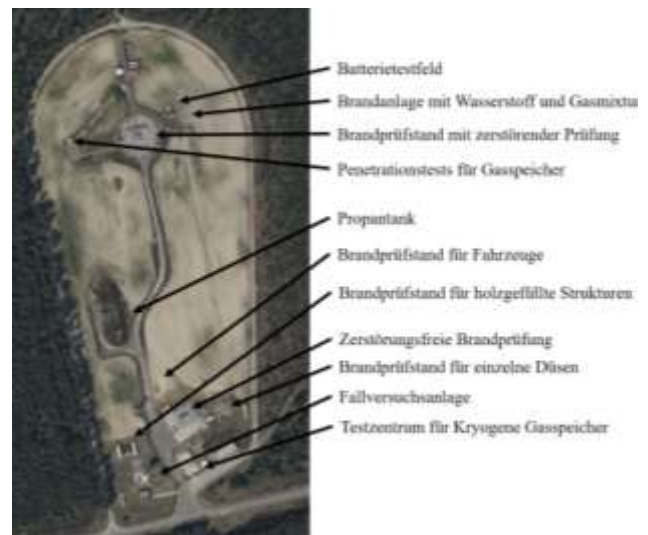


Abbildung 1 Brandprüfplatz mit momentan aktiven Versuchsanlagen



Abbildung 2 Feuerreferenzbehälter in einem Brandprüfstand mit zwei Brennerringen, vgl. [8].

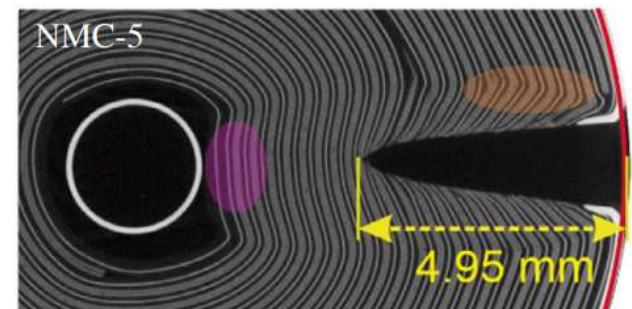


Abbildung 3 Hochpräzises Nageltest Setup zum kontrollierten Erzwingen des thermischen Durchgehens, vgl. [10].

Untersuchungen von großen Batteriezellen [11], Batteriemodulen [12] und großen Batteriesystemen werden auf dem BAM-TTS auf einer speziellen Plattform durchgeführt, die es ermöglicht, eine Vielzahl von Batterietypen unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Diese Anordnung (vgl. Abbildung 4) ermöglicht es, das Verhalten von Batterien in verschiedenen Betriebs- und Fehlerszenarien zu untersuchen, wie z. B. Laden und Entladen, Überladen (vgl. Abbildung 5) oder interne Ausfälle. Darüber hinaus wurde bereits das Ausbreitungsverhalten von thermischen Durchgangsreaktionen zwischen Modulen untersucht, um verschiedene Materialien als Barriere gegen

thermisches Durchgehen zu qualifizieren. Der verwendete Prüfstand ist bereits mit einem Hochdruck-Wasserebel-Löschsystem ausgestattet. Dies ermöglicht Tests zum thermischen Durchgehen mit Löschintervention unter dem Gesichtspunkt eines sparsamen Wasserverbrauchs.



**Abbildung 4** Batterieprüfstand für Module und reale Batterien mit 1) Module ausgestattet mit Thermoelementen, 2) Versuchstisch, 3) - 4) Diodenlaser-Spektrometer für HF-Konzentration (Flusssäure), 5) Nahfeld-Thermoelemente, 6) Abzugshaube, 7) Hochdruck-Wasserebelanlage und 8) Kamerasystem, vgl. [9, 16].

Ein zentraler Schwerpunkt ist die Lebensdauer der Batterien, insbesondere im Hinblick auf Second-Life-Anwendungen, bei denen Batterien aus BEVs als stationäre Energiespeichersysteme wiederverwendet werden. Das BAM-TTS ermöglicht realistische Testbedingungen zur Bewertung sicherheitskritischer Faktoren wie thermische Instabilität, Gasfreisetzung und potenzielle Explosionsrisiken (vgl. Abbildung 6), insbesondere bei alternden Zellen, die für den weiteren Gebrauch vorgesehen sind.



**Abbildung 5** Thermisches Durchgehen durch Überladen eines 6,85kWh-Moduls [13].

## 4 Versuchsaufbau auf den Brandversuchsanlagen

Der Versuchsaufbau basiert auf konservativen, praxisorientierten Unfallszenarien, die potenzielle Brandereignisse mit BETVs darstellen, die sich auf ein Paket oder eine Ladung mit gefährlichen Gütern auswirken können (siehe Abbildung 7). Diese Szenarien werden aus Analysen möglicher Schadensverläufe abgeleitet, wobei die Art und Kapazität der Batterien (z. B. NMC, LFP, NCA/LTO), ihre Einbaulage im Fahrzeug, zusätzliche brennbare Komponenten, Umgebungsbedingungen wie Tunnel, Brücken oder offene Flächen sowie das zeitabhängige Brandverhalten einschließlich Brandausbreitung und potenzieller Wiederentzündung berücksichtigt werden. Die resultierenden

Szenarien werden so ausgewählt, dass sie sowohl realistisch als auch ausreichend konservativ sind, um behördliche Bewertungen gemäß den relevanten Normen zu unterstützen.



**Abbildung 6** Gasexplosion infolge des Ausgasens verursacht durch thermisches Durchgehen eines 2,65kWh-Moduls [14].

Für fahrzeugbezogene Brandversuche, wie in Abbildung 7 dargestellt, ist das TTS, insbesondere der in Abbildung 1 dargestellte Brandprüfplatz, ideal geeignet. In Kombination mit dem Batterieteststand für stationäre Batterien (siehe Abbildung 4) werden verschiedene Unfallszenarien mit Gefahrstoffen analysiert, bewertet, definiert und anschließend in einer realistischen Testumgebung untersucht, beispielsweise unter Verwendung eines BETV und einer Transportverpackung. Ein spezielles Feuerreferenzpaket, wie in Abbildung 2 dargestellt, wird verwendet, um Experten aus verschiedenen Disziplinen standardisierte Messdaten zur Verfügung zu stellen.



**Abbildung 8** Schematischer experimenteller Aufbau mit BETV, Feuerreferenzbehälter [18, 19], und Batterie als Brandlast.

Auf der Grundlage dieser Randbedingungen werden unter Verwendung der vorhandenen Brandprüfstände und der kalorimetrischen Infrastruktur auf dem BAM-TTS realmaßstäbliche Versuchsaufbauten konzipiert. Der Versuchsaufbau umfasst definierte Brandquellen sowie zusätzliche Brandlasten aus BETV-Komponenten wie Holz, Reifen, Öl, Kunststoffen oder Zusatzbatterien, um repräsentative thermische Bedingungen zu reproduzieren. Feuerreferenzbehälter werden innerhalb des Versuchsaufbaus positioniert, um standardisierte Messungen der Wärmezufuhr und der thermischen Auswirkungen zu ermöglichen, vgl. [15].

Umfassende Brandversuche werden unter kontrollierten und vollständig dokumentierten Bedingungen durchgeführt, wobei die drei Batterietypen systematisch über verschiedene Kapazitätsbereiche (z. B. 90 - 220 kWh) variiert werden. Während jedes Experiments werden wichtige physikalische Größen wie Temperaturverteilungen, Wärmefluss und Wärmestrahlung aufgezeichnet. Hochauflösende Messgeräte, unterstützt durch Video- und Wärmebildaufnahmen, gewährleisten eine umfassende und zuverlässige Datenerfassung.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der zunehmende Einsatz von BETVs für den Transport gefährlicher Güter bringt neue Herausforderungen mit sich, denen die aktuellen Sicherheitsanforderungen und Prüfnormen noch nicht ausreichend Rechnung tragen. So müssen beispielsweise die bestehenden thermischen Anforderungen der IAEO, wie die 30-minütige Brandprüfung bei 800°C [17] und die damit verbundenen Bewertungskriterien, unter Berücksichtigung der spezifischen Risiken, die mit diesen neuen Antriebstechnologien verbunden sind, detailliert überprüft werden.

Derzeit gibt es keine experimentellen Studien, die die Wärmeflüsse auf Verpackungen während Bränden mit Fahrzeugen mit alternativen Antrieben systematisch quantifizieren. Die verfügbaren Daten stammen fast ausschließlich aus Batterietests auf Zell- oder Modulebene und spiegeln nicht die realen Transportszenarien wider, in denen die thermischen Auswirkungen auf eine Verpackung oder deren Inhalt von zentraler Bedeutung sind. Bestehende groß angelegte BEV-Brandtests befassen sich mit anderen Fragestellungen und können nicht auf BETVs für den Transport gefährlicher Güter übertragen werden.

Das geplante Forschungsprojekt zielt darauf ab, diese Lücke durch realmaßstäbliche Brandversuche mit BETVs im Gefahrgutkontext zu schließen, unterstützt durch numerische Analysen zur Darstellung realistischer thermischer Belastungsszenarien. Es werden verschiedene Hochvolt-Batterietypen mit unterschiedlichen Kapazitäten und Zellchemien (z. B. NMC, LFP, NCA/LTO) untersucht, um technologiespezifische Unterschiede und Skalierungseffekte zu erfassen. Die Ergebnisse werden den verschiedenen Ausschüssen und Gremien helfen, die Auswirkungen der Wärmezufuhr im Zusammenhang mit der Ladung zu bewerten und gegebenenfalls geeignete Maßnahmen einzuleiten.

## 6 Literatur

- [1] KBA: Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen mit alternativem Antrieb im Oktober 2025: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz28/fz28\\_gentab.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz28/fz28_gentab.html)
- [2] M. Neske et. al.: Evaluierung von technischen Verfahren zur Löschmitteleinbringung in Hochvoltspeicher, Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr, Forschungsbericht, 2025
- [3] R. Tschirschwitz et. al.: BEV Accidents-Consequences in Case of a Battery Thermal Runaway, Proceedings of the 31st Annual Congress of the European Association for Accident Research and Analysis (EVU), 2023
- [4] A. Lecocq et. al.: Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle, 2. International Conference on Fire in Vehicles - FIVE 2012, Chicago 2012
- [5] C. Huggett: Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements, Fire and Materials, 1980
- [6] M. Siemon, M. Rupp: Brandszenarien bei E-PKW – Stand der Wissenschaft, KSI Brandschutz AG, 2022
- [7] P.-J. Sturm et al.: BRAFA – Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen, TU Graz, 2021
- [8] T. Quercetti et. al.: A FIRE TEST STAND FOR THERMAL TESTING OF EXTRA-LARGE PACKAGES, Proceedings of the ASME 2025 Pressure Vessels & Piping® Conference, 2025.
- [9] SEE 2L Project (BAM, OVGU & vfdb), Safety of Electrochemical Energy Storage in Second Life Applications, 2023
- [10] N. Böttcher et. al.: High Precision Nail-Penetration Setup for the Controlled Thermal Runaway Initiation of Lithium-Ion Cells at Very Low Temperatures, Energy Technology, DOI: 10.1002/ente.20230137, 2024
- [11] T. Rappsilber et. al.: Hazard classification of different lithium-ion battery types after triggering thermal runaway, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2025
- [12] R. Tschirschwitz et. al.: Harmful effects of lithium-ion battery thermal runaway: scale-up tests from cell to second-life modules, RSC advances, 2023
- [13] <https://www.youtube.com/watch?v=0hIzS-0Ajgo>
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=QwXTTxLQ9mA>
- [15] M. Feldkamp, T. Gleim, F. Wille: Evaluation of heat fluxes in Fire Reference Test conducted in BAM propane gas Fire Test Facility, presented at the 27th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Yokohama, Japan, 04.03.2024, 2024.
- [16] S.-K. Hahn et. al.: Forschung zur Sicherheit von Elektroenergiespeichern, Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlichen Versicherer e.V. (IFS), 2025
- [17] IAEA: Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material - Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev.1), IAEA, 2018
- [18] M. Feldkamp, T. Quercetti, F. Wille: Outcomes of three large scale fire reference tests conducted in BAM fire test facility, Proceedings of the ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conference, 2020.
- [19] M. Feldkamp et. al.: R&D Activities by BAM Related to Transport Package Fire Testing, Proceedings of the 20th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, 2022.