



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 09.11.2024

Untersuchung der Wirksamkeit von herkömmlichen Sprinkleranlagen und von einer innovativen Löscheinrichtung zur Verlangsamung des thermischen Durchgehens von Batterien in Elektroautos und zur Vermeidung des Brandüberschlags zwischen Fahrzeugen in Tiefgaragen



Quelle: FASR - Foto des ersten Brandversuchs



Datum: 09.11.2024



Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS
Armasuisse Immobilien
Guisanplatz 1, CH-3003 Bern
www.vbs.admin.ch

Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKG)
Bundesgasse 20, CH-3001 Bern
www.vkg.ch

AFC AG
Technoparkstrasse 1
8005 Zürich
www.afc.ch

LiBaService24 GmbH
Obere Spichermatt 61
6370 Stans
www.libaservice24.com

VersuchsStollen Hagerbach AG
Polistrasse 1
8893 Flums
<https://hagerbach.ch>

Flammex AG
Tösstalstrasse 12
8360 Wallenwil
www.flammex-ag.ch

Subventionsempfänger/innen:

FASR Full automatic sprinkler robot, Zanon
Bibenlosstrasse 12
5620 Bremgarten
www.fasr.ch



EMPA
Ueberlandstrasse 129
8600 Dübendorf
www.empa.ch

OST – Ostschweizer Fachhochschule
Oberseestrasse 10
8640 Rapperswil
www.ost.ch

Autoren:

Davide Zanon, FASR Full automatic sprinkler robot, Zanon, davide.zanon@fasr.ch
Alexander Kagermanov, XDEEA, xdeea.software@gmail.com
Marcel Held, EMPA. Marcel.held@empa.ch

BFE-Projektbegleitung:

Dr. Luca Castiglioni, luca.castiglioni@bfe.admin.ch

Begleitkommission:

Thomas Goetschi, Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen
Dr. Jan Bauke, Schutz und Rettung Zürich
Dr. Viktor Häfeli, Smart Resources GmbH
Frank Ritter, AFC AG
Gregor Plett, Bau-und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt
Kurt Friderich, Friderich Chemiewehrschule
Jules Pikali, OekoWatt AG

BFE-Vertragsnummer: SI/502718-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt ECAFIS untersucht die potenzielle Gefahr von Bränden bei Elektrofahrzeugen in geschlossenen Räumen wie Tiefgaragen. Die Forschung zielt darauf ab, die Wirksamkeit von Sprinkleranlagen und eines neuen automatischen Brandbekämpfungssystems (FASR-Pyrosense) zu testen, um die Ausbreitung von Bränden einzudämmen und die Sicherheit in Tiefgaragen mit Elektrofahrzeugen zu verbessern.

Das Forschungsprojekt umfasste zwei Grossbrandversuche mit insgesamt sechs Fahrzeugen, die in den unterirdischen Anlagen der Versuchsstollen Hagerbach AG durchgeführt wurden, um eine reale Umgebung für Brände in Tiefgaragen zu schaffen. Die Bedingungen der beiden Versuche blieben unverändert, um die Ergebnisse vergleichen zu können: Der Brand wurde durch die punktuelle Überhitzung eines Batteriemoduls in einem Tesla Model S Fahrzeug verursacht und es wurde untersucht, ob sich das Feuer auf zwei seitlich aufgestellte Fahrzeuge (ein weiteres kleines Elektroauto und ein Auto mit Verbrennungsmotor) ausbreiten konnte. Die Temperaturen wurden von Sensoren überwacht und mit Kameras wurden die wichtigsten Phasen des Brandes aufgezeichnet. Zwischen den Elektroautos wurde eine Betonstütze aufgestellt, um die Auswirkungen des Feuers auf die Stahlbetonstrukturen zu beurteilen. Die Daten aus den Simulationen wurden durch statische Simulationsrechnungen vervollständigt.

Im ersten Test reichte es aus, ein Modul mit zwei Heizpatronen zu überhitzen, um den Thermal Runaway in der ganzen Batterie auszulösen. Unmittelbar nach der Zündung der Heizpatronen war nur Rauch aus dem Wagenboden zu sehen und ein Temperaturanstieg in der Batterie zu messen. Nach etwa einer Stunde kam es zu einer starken Deflagration, in deren Folge Flammen freigesetzt wurden, die den Fahrgastraum in Brand setzten und die Sprinkleranlage sofort auslösten. Das Feuer dauerte etwa eineinhalb Stunden und schwankte in seiner Intensität in Abhängigkeit von der Ausbreitung des thermischen Durchgehens in der Batterie. Während des Tests wurde die Sprinkleranlage in bestimmten Phasen abgeschaltet, um ihre Wirkung auf das Feuer zu testen. Am Ende des Tests wurde der Tesla durch das Feuer vollständig zerstört. Die beiden anderen Fahrzeuge waren praktisch unversehrt: nur an den dem Tesla zugewandten Seiten der Karosserie waren Schäden zu sehen. Die anderen Karosserieteile und die Kunststoffe im Fahrgastraum waren unbeschädigt.

Im zweiten Test konnte der Thermal Runaway nicht durch die zwei Heizpatronen verursacht werden, sondern eine Gruppe von Batteriezellen wurde durch ein Eisenoxid- und Aluminium-Granulat-Gemisch überhitzt. Nach einer anfänglichen Phase, in der Rauch vom Autoboden zu sehen war, kam es zu einer starken Deflagration, welche heftige Flammen im Fahrgastraum auslöste. Das FASR-Pyrosense System ist ein Hochdrucklöschesystem, das Wassernebel durch drei Düsen versprüht, von denen sich zwei an den Seiten des Fahrzeugs und eine unterhalb des Fahrzeugbodens befinden. Das System wurde unmittelbar nach der Verpuffung aktiviert. Auch im zweiten Test schwankte die Feuerintensität in Abhängigkeit des Thermal Runaway in der Batterie. Am Ende des zweiten Tests waren ähnliche Schäden wie beim ersten Test festzustellen: Der Tesla war durch das Feuer zerstört und die anderen Fahrzeuge praktisch unversehrt, mit Schäden nur an den dem Tesla zugewandten Seiten.

Bei den Tests wurde festgestellt, dass sowohl die Sprinkleranlage als auch das FASR-Pyrosense-System die Brandausbreitung auf andere Fahrzeuge in geschlossenen Parkhäusern verhindern können. Die Temperaturen werden unter Kontrolle gehalten, so dass ein Einsturz der tragenden Struktur ausgeschlossen werden kann. Das FASR-Pyrosense-System hat zudem den Thermal Runaway in der Batterie verlangsamt. In Bezug auf den Brand von Elektroautos haben die Tests gezeigt, dass die



punktuelle Überhitzung eines Batteriemoduls zur Brandpropagation und zur Zerstörung der ganzen Batterie führen kann. Während dieses Prozesses kommt es zu einer Deflagration durch die Entzündung der brennbaren Gase, die durch die chemische Zersetzung der Zellen entstehen.

Nach Abschluss dieses Forschungsprojekts werden die Feuerwehren über die mit der Deflagration verbundenen Risiken informiert. Das FASR-Pyrosense System wird für die kommerzielle Anwendung und für die Markteinführung weiterentwickelt.

Take-home messages

- Die punktuelle Überhitzung eines Batteriemoduls kann sowohl zum Thermal Runaway der Batteriezellen als auch zur Brandpropagation und zur Zerstörung der ganzen Batterie führen
- Der Thermal Runaway kann eine Deflagration verursachen, die eine potenzielle Gefahr insbesondere für die Feuerwehr darstellt.
- Die Sprinkleranlage hat im Test den Überschlag des Brandes des Elektroautos auf die benachbarten Autos verhindert und die Temperaturen unter Kontrolle gehalten, so dass der Einsturz von Stahl-Beton-Tragwerken ausgeschlossen werden kann.
- Das FASR-Pyrosense System hat im Test den Überschlag des Brandes des Elektroautos auf die benachbarten Autos verhindert und den Thermal Runaway in der Batterie verlangsamt. Der Einsturz von Stahl-Beton-Tragwerken konnte auch ausgeschlossen werden.



Résumé

Le projet de recherche ECAFIS examine le risque potentiel d'incendie des véhicules électriques dans les espaces confinés tels que les parkings souterrains. La recherche vise à tester l'efficacité des sprinklers et d'un nouveau système de lutte automatique contre les incendies (FASR-Pyrosense) afin de limiter la propagation des incendies et d'améliorer la sécurité dans les parkings souterrains abritant des véhicules électriques.

Le projet de recherche comprenait deux tests d'incendie à grande échelle avec six véhicules au total, réalisés dans les installations souterraines de la société Versuchsstollen Hagerbach AG, afin de créer un environnement réel pour les incendies dans les garages souterrains. Les conditions des deux tests n'ont pas été modifiées afin de pouvoir comparer les résultats : L'incendie a été provoqué par la surchauffe ponctuelle d'un module de batterie dans un véhicule Tesla Model S et on a cherché à savoir si le feu pouvait se propager à deux véhicules placés sur le côté (une autre petite voiture électrique et une voiture à moteur à combustion). Des sondes ont surveillé les températures et des caméras ont enregistré les principales phases de l'incendie. Un pilier en béton a été placé entre les voitures électriques afin d'évaluer l'impact du feu sur les structures en béton armé. Les données issues des simulations ont été complétées par des calculs de simulation statique.

Lors du premier test, il a suffi de surchauffer un module avec deux cartouches chauffantes pour déclencher le Thermal Runaway dans toute la batterie. Immédiatement après l'allumage des cartouches chauffantes, on ne voyait que de la fumée s'échapper du plancher du wagon et on mesurait une augmentation de la température dans la batterie. Après environ une heure, une forte déflagration s'est produite, à la suite de laquelle des flammes ont été libérées, mettant le feu à l'habitacle et déclenchant immédiatement le système d'extinction automatique. L'incendie a duré environ une heure et demie et son intensité a varié en fonction de la propagation de la fuite thermique dans la batterie. Au cours du test, le système de sprinklers a été désactivé à certaines phases afin de tester son effet sur l'incendie. A la fin du test, la Tesla a été entièrement détruite par le feu. Les deux autres véhicules étaient pratiquement intacts : seuls les côtés de la carrosserie faisant face à la Tesla présentaient des dommages. Les autres parties de la carrosserie et les plastiques de l'habitacle n'ont pas été endommagés.

Lors du deuxième test, le Thermal Runaway n'a pas pu être causé par les deux cartouches chauffantes, mais un groupe de cellules de batterie a été surchauffé par un mélange d'oxyde de fer et de granulés d'aluminium. Après une phase initiale au cours de laquelle de la fumée était visible depuis le plancher de la voiture, une forte déflagration s'est produite, provoquant de violentes flammes dans l'habitacle. Le système FASR-Pyrosense est un système d'extinction à haute pression qui vaporise de l'eau par trois buses, dont deux sont situées sur les côtés du véhicule et une sous le plancher du véhicule. Le système a été activé immédiatement après la déflagration. Lors du deuxième test, l'intensité du feu a également varié en fonction de l'emballage thermique de la batterie. À la fin du deuxième test, des dommages similaires à ceux du premier test ont été constatés : La Tesla était détruite par le feu et les autres véhicules étaient pratiquement intacts, avec des dommages uniquement sur les côtés faisant face à la Tesla.

Les tests ont permis de constater que le système de sprinklers et le système FASR Pyrosense peuvent tous deux empêcher la propagation de l'incendie aux autres véhicules dans les parkings fermés. Les températures sont maintenues sous contrôle, ce qui permet d'exclure tout risque d'effondrement de la structure porteuse. Le système FASR-Pyrosense a également permis de ralentir l'emballage thermique de la batterie. En ce qui concerne l'incendie des voitures électriques, les tests ont montré que la surchauffe ponctuelle d'un module de batterie peut entraîner la propagation du feu et la destruction de la batterie entière. Au cours de ce processus, une déflagration se produit en raison de l'inflammation des gaz inflammables produits par la décomposition chimique des cellules de la batterie.



Une fois ce projet de recherche terminé, les pompiers seront informés des risques associés à la déflagration. Le système FASR-Pyrosense sera développé en vue d'une application commerciale et d'une mise sur le marché.

Take-home messages

- La surchauffe ponctuelle d'un module de batterie peut conduire à un emballage thermique des cellules de la batterie, à la propagation d'un incendie et à la destruction de la batterie entière.
- L'emballement thermique peut provoquer une déflagration, ce qui représente un danger, en particulier pour les pompiers.
- Lors du test, le système sprinkler a empêché l'incendie de la voiture électrique de se propager aux voitures voisines et a maintenu les températures sous contrôle, ce qui exclut l'effondrement des structures en béton.
- - Lors du test, le système FASR-Pyrosense a empêché l'incendie de la voiture électrique de se propager aux voitures voisines et a ralenti l'emballement thermique dans la batterie. L'effondrement des structures porteuses en béton a également été exclu.



Summary

The ECAFIS research project is investigating the potential risk of fires in electric vehicles in enclosed spaces such as underground car parks. The research aims to test the effectiveness of sprinkler systems and a new automatic firefighting system (FASR-Pyrosense) to contain the spread of fires and improve safety in underground car parks with electric vehicles.

The research project comprised two large-scale fire tests with a total of six vehicles, which were carried out in the underground facilities of Versuchsstollen Hagerbach AG in order to create a real environment for fires in underground car parks. The conditions of the two tests remained unchanged so that the results could be compared: The fire was caused by the localised overheating of a battery module in a Tesla Model S vehicle and it was investigated whether the fire could spread to two vehicles placed to the side (another small electric car and a car with an internal combustion engine). The temperatures were monitored by sensors and cameras were used to record the most important phases of the fire. A concrete column was placed between the electric cars to assess the effects of the fire on the reinforced concrete structures. The data from the simulations were supplemented by static simulation calculations.

In the first test, it was sufficient to overheat a module with two heating cartridges to trigger the thermal runaway in the entire battery. Immediately after ignition of the cartridge heaters, only smoke could be seen coming from the floor of the car and a temperature rise could be measured in the battery. After about an hour, a strong deflagration occurred, as a result of which flames were released that set fire to the passenger compartment and immediately triggered the sprinkler system. The fire lasted around one and a half hours and fluctuated in intensity depending on the spread of the thermal runaway in the battery. During the test, the sprinkler system was switched off in certain phases to test its effect on the fire. At the end of the test, the Tesla was completely destroyed by the fire. The other two vehicles were practically undamaged: damage was only visible on the sides of the bodywork facing the Tesla. The other body parts and the plastics in the passenger compartment were undamaged.

In the second test, the thermal runaway could not have been triggered by the two heating cartridges, but a group of battery cells was overheated by a mixture of iron oxide and aluminium granules. After an initial phase in which smoke could be seen coming from the floor of the car, a strong deflagration occurred, triggering violent flames in the passenger compartment. The FASR Pyrosense system is a high-pressure extinguishing system that sprays water mist through three nozzles, two of which are located on the sides of the vehicle and one underneath the floor. The system was activated immediately after the deflagration. In the second test, the intensity of the fire also fluctuated depending on the thermal runaway in the battery. At the end of the second test, the damage was similar to that of the first test: The Tesla was destroyed by the fire and the other vehicles were practically undamaged, with damage only on the sides facing the Tesla.

The tests showed that both the sprinkler system and the FASR Pyrosense system can prevent the spread of fire to other vehicles in closed car parks. Temperatures are kept under control so that collapse of the load-bearing structure can be ruled out. The FASR Pyrosense system has also slowed down the thermal runaway in the battery. With regard to electric car fires, tests have shown that localised overheating of a battery module can lead to fire propagation and the destruction of the entire battery. During this process, deflagration occurs due to the ignition of the flammable gases produced by the chemical decomposition of the cells.



Once this research project has been completed, the fire departments will be informed about the risks associated with deflagration. The FASR-Pyrosense system will be further developed for commercial application and market launch.

Take-home messages

- The localised overheating of a battery module can lead to thermal runaway of the battery cells as well as to fire propagation and the destruction of the entire battery
- Thermal runaway can cause deflagration, which represents a potential danger, especially for the fire brigade.
- In the test, the sprinkler system prevented the electric car fire from spreading to the neighbouring cars and kept the temperatures under control, so that the collapse of steel-concrete structures can be ruled out.
- In the test, the FASR-Pyosense system prevented the electric car fire from spreading to neighbouring cars and slowed down the thermal runaway in the battery. The collapse of steel-concrete structures was also ruled out.



Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Zusammenfassung | 4 |
| Take-home messages | 5 |
| Résumé | 6 |
| Take-home messages | 7 |
| Summary | 8 |
| Take-home messages | 9 |
| Inhaltsverzeichnis | 10 |
| 1 Einleitung | 13 |
| 1.1 Ausgangslage und Hintergrund | 13 |
| 1.2 Motivation des Projektes | 13 |
| 1.3 Projektziele | 13 |
| 2 Anlagenbeschrieb | 15 |
| 2.1 Fahrzeuge..... | 15 |
| 2.2 Batterie | 16 |
| 2.3 Versuchsort..... | 17 |
| 2.4 Löschtruppe | 18 |
| 2.5 Betonstützen..... | 18 |
| 2.6 Messtechnik..... | 19 |
| 2.7 Videotechnik | 22 |
| 2.8 Weitere Messungen..... | 23 |
| 2.8.1 Rauchmelder | 23 |
| 2.8.2 Battery Management System | 23 |
| 3 Brandversuch mit Sprinkleranlage | 24 |
| 3.1 Fahrzeuge..... | 24 |
| 3.2 Sprinkleranlage..... | 25 |
| 3.3 Logbuch des ersten Versuchs | 27 |
| 3.4 Bilder des ersten Versuchs..... | 28 |
| 4 Brandversuch mit dem System FASR-Pyrosense | 29 |
| 4.1 Fahrzeuge..... | 29 |
| 4.2 Das System FASR-Pyrosense | 30 |
| 4.3 Logbuch des zweiten Versuchs..... | 32 |
| 4.4 Bilder des zweiten Versuchs | 33 |
| 5 Ergebnisse und Diskussion | 34 |
| 5.1 Gemessene Temperaturen, Brandversuch mit Sprinkleranlage | 34 |
| 5.1.1 Temperaturen in der Batterie..... | 34 |



| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.1.2 | Temperaturen über dem Auto | 36 |
| 5.1.3 | Temperaturen unter dem Auto | 37 |
| 5.1.4 | Temperaturen an E-Auto | 38 |
| 5.1.5 | Temperaturen am Auto mit Verbrennungsmotor..... | 39 |
| 5.2 | Gemessene Temperaturen, Brandversuch mit FASR-Pyrosense System | 40 |
| 5.2.1 | Temperaturen in der Batterie..... | 40 |
| 5.2.2 | Temperaturen über dem Auto | 42 |
| 5.2.3 | Temperaturen unter dem Auto | 43 |
| 5.2.4 | Temperaturen an E-Auto | 44 |
| 5.2.5 | Temperaturen am Auto mit Verbrennungsmotor..... | 45 |
| 5.3 | Vergleich der Temperaturen, Test mit Sprinkler und Test mit dem System FASR-Pyrosense | 46 |
| 5.3.1 | Temperaturen in der Batterie..... | 46 |
| 5.3.2 | Temperaturen über dem Auto | 47 |
| 5.3.3 | Temperaturen unter dem Auto | 48 |
| 5.3.4 | Temperaturen an E-Auto | 48 |
| 5.3.5 | Temperaturen am Auto mit Verbrennungsmotor..... | 49 |
| 5.4 | Deflagration nach der Erhitzung der Batterie, Ursachenermittlung..... | 49 |
| 5.5 | Brand im Fahrgastraum, Ursachenermittlung | 51 |
| 5.6 | Fotodokumentation: Qualitativer Vergleich der Schäden | 52 |
| 5.6.1 | Brandschaden am Tesla, erster Versuch mit Sprinkleranlage | 52 |
| 5.6.2 | Brandschaden am Tesla, zweiter Versuch mit FASR-Pyrosense-System..... | 53 |
| 5.6.3 | Brandschaden am E-Auto, erster Versuch mit Sprinkleranlage..... | 53 |
| 5.6.4 | Brandschaden am E-Auto, zweiter Versuch mit FASR-Pyrosense-System | 56 |
| 5.6.5 | Brandschaden am Auto mit Verbrennungsmotor, erster Versuch mit Sprinkleranlage..... | 58 |
| 5.6.1 | Brandschaden am Auto mit Verbrennungsmotor, zweiter Versuch mit FASR-Pyrosense-System..... | 59 |
| 6 | Schlussfolgerungen und Fazit | 62 |
| 6.1 | Erkenntnis Nr. 1: Der Thermal Runaway in der Batterie eines E-Autos kann durch die punktuelle Erhitzung eines Moduls verursacht werden..... | 62 |
| 6.1 | Erkenntnis Nr. 2: Der Thermal Runaway in der Batterie kann eine Deflagration verursachen | 62 |
| 6.1 | Erkenntnis Nr. 3: Die Sprinkleranlage konnte beim Test den Brandüberschlag auf andere Fahrzeuge verhindern | 63 |
| 6.1 | Erkenntnis Nr. 4: Das FASR-Pyrosense-System konnte beim Test den Brandüberschlag auf andere Fahrzeuge verhindern und den Thermal Runaway verlangsamen | 63 |
| 6.2 | Erkenntnis Nr. 5: Bei den Tests haben die beiden Brandbekämpfungsanlagen (Sprinkler und FASR-Pyrosense) die Brandtemperaturen so weit gesenkt, dass ein Einsturz der Tragstruktur nicht möglich war..... | 63 |
| 7 | Ausblick und zukünftige Umsetzung | 64 |
| 7.1 | Weitentwicklung des Systems FASR-Pyrosense | 64 |
| 7.2 | Weiterer Forschungsbedarf | 64 |



| | | |
|-----------|--|-----------|
| 8 | Nationale und internationale Zusammenarbeit | 64 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 65 |
| 10 | Anhang | 66 |
| 10.1 | Bericht der Firma XDEEA, Untersuchungen an Tragwerk und numerischen Brandsimulationen, Stand Mai 2024 | 66 |
| 10.2 | Bilder des ersten Versuchs – Sprinkleranlage | 66 |
| 10.3 | Bilder des zweiten Versuchs – FASR-Pyrosense-System | 66 |



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Mit der steigenden Anzahl neu zugelassener Elektrofahrzeuge stellt sich die Frage, ob diese im Falle eines Brandes gefährlicher sind als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICE). Insbesondere bei Elektroautos in geschlossenen Räumen soll untersucht werden, ob sich ein Brand schneller ausbreiten und die Strukturen stärker belasten kann als bei einem ICE-Fahrzeug.

Aktuell gibt es noch keine verlässlichen statistischen Daten über die Anzahl von Bränden von Elektrofahrzeugen in Tiefgaragen. Die Ermittlung der Brandursache gestaltet sich oft schwierig. Zudem sind Elektroautos noch eine kleine Teilmenge der Fahrzeugflotte auf dem Markt. Es ist jedoch plausibel anzunehmen, dass die Anzahl von Bränden durch Elektrofahrzeuge in Zukunft zunehmen wird.

Die in anderen Ländern durchgeföhrten Forschungsprojekte zeigen, dass die Gesamtenergiemenge, die bei einem Brand eines konventionellen Autos und eines Elektroautos freigesetzt wird, vergleichbar ist [1].

Ein aktuelles Forschungsprojekt in Korea hat gezeigt, dass Flammen, die sich an den Seiten eines brennenden Elektrofahrzeugs entwickeln, die Ausbreitung des Feuers auf benachbarte Fahrzeuge beschleunigen können [2].

Die Wirksamkeit von Sprinkleranlagen bei der Verhinderung der Ausbreitung von Bränden, die durch Batterien in Elektrofahrzeugen verursacht werden, ist noch Forschungsgegenstand.

1.2 Motivation des Projektes

Das Forschungsprojekt wurde initiiert, um:

1. die Wirksamkeit von Sprinkleranlagen in der Bekämpfung von Bränden zu überprüfen, die von der Batterie eines Elektrofahrzeugs verursacht werden. Objekt der Versuche sind nach den Schweizer Richtlinien (SES-Richtlinien) dimensionierten Sprinkleranlagen.
2. die Wirksamkeit einer neuen automatischen Brandbekämpfungsanlage (FASR-Pyrosense-System) zu überprüfen, das auf der Früherkennung des Temperaturanstiegs bei einer Batteriefehlfunktion und der gezielten Löschung und Kühlung durch Wassernebel beruht.

1.3 Projektziele

Das Forschungsprojekt besteht aus zwei Grossbrandversuchen mit Elektrofahrzeugen, mit denen die notwendigen Informationen zur Beantwortung der folgenden Fragen gesammelt werden:

1. Wann nach Beginn des thermischen Durchgehens in der Batterie eines Elektrofahrzeugs werden herkömmliche Sprinkleranlagen aktiviert?
2. Können Sprinkleranlagen verhindern, dass sich das Feuer von einem Elektrofahrzeug auf benachbarte Fahrzeuge ausbreitet?
3. Kann die Brandbekämpfungsanlage FASR-Pyrosense das thermische Durchgehen verlangsamen und die Ausbreitung des Feuers von einem Elektrofahrzeug auf benachbarte Fahrzeuge verhindern?



4. Wie verteilen sich die Temperaturen und Dehnungen in den tragenden Betonbauteilen (Stützen und Decke)? Entstehen höhere Beanspruchungen am Stützenfuss infolge des Thermal Runaway?
5. Wie hoch sind die Bauteiltemperaturen im Vergleich zu normierten Temperatur-Zeit-Kurven und welcher Einfluss hat das auf den Feuerwiderstand?
6. Kann die Brandbekämpfungsanlage FASR-Pyrosense die Tragwerksicherheit von Tiefgaragen mit Elektrofahrzeugen verbessern?



2 Anlagenbeschrieb

Bei den beiden Experimenten handelte es sich um zwei Brandversuche in Originalgröße. Im ersten Test wurde die Wirksamkeit von Sprinkleranlagen beim Löschen und Eindämmen des durch das thermische Durchgehen der Batterien des Elektrofahrzeugs verursachten Brandes getestet. Der Test wurde dann wiederholt, wobei die Sprinkleranlage durch das FASR-Pyrosense-Löschesystem ersetzt wurde. Beide Tests wurden unter ähnlichen Bedingungen und mit ähnlichen Fahrzeugen durchgeführt, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Dieses Kapitel beschreibt die Testvorbereitung im Hinblick auf die Aspekte, die in beiden Tests unverändert geblieben sind.

In den Kapiteln 3 und 4 werden die zusätzlichen und spezifischen Aspekte beschrieben, die die beiden Tests voneinander unterscheiden.

2.1 Fahrzeuge

Der Brand wurde in beiden Tests in der Batterie eines Fahrzeugs des Modells Tesla S ausgelöst. Das Modell wurde aufgrund seiner hohen elektrischen Kapazität von 85 kWh und der Geometrie der Batterien ausgewählt. Der amerikanische Hersteller verwendet zylindrische Batterien, die das Verhältnis zwischen der Batteriekapazität und dem belegten Raum maximieren. Zudem ist das Model S ein weit verbreitetes Modell auf den Schweizer Strassen. Für den Test wurden Unfallfahrzeuge verwendet, deren Batterien noch voll funktionsfähig war.

Auf beiden Seiten des Tesla-Autos wurden ein kleines Elektroauto und ein Auto mit Verbrennungsmotor aufgestellt. Diese Konfiguration wurde festgelegt, um eine typische Situation in einer Tiefgarage darzustellen. Der seitliche Abstand zwischen Fahrzeugen betrug in beiden Tests ca. 50 cm.

Aufgrund von Auflagen der kantonalen Umweltbehörden mussten die Autositze, der Dachhimmel und die Bodenverkleidung durch Materialien ersetzt werden, die im Brandfall keine giftigen Gase über die zulässigen Grenzwerte hinaus freisetzen.

Die Autositze wurden durch Holzsitze ersetzt und die Polsterung durch Kissen, die mit gehäckseltem und trockenem Schilfrohr gefüllt waren.

Alle anderen Kunststoffteile in den Fahrzeugen wurden beibehalten.



Abbildung 1: Foto des Innenraums des Elektroautos im ersten Brandversuch



2.2 Batterie

Die Batterie eines Tesla Model S besteht aus 7104 Zellen, die in 16 Module unterteilt sind. Das folgende Foto zeigt die Batterie, von der die obere Abdeckplatte entfernt wurde



Abbildung 2: Foto der Batterie des Teslas Model S

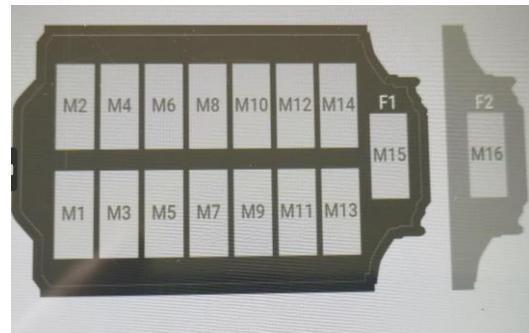


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Module

Um ein thermisches Durchgehen in der Tesla Autobatterie zu verursachen, wurden zwei Zellen in den Modulen 8 und 10 durch zwei Heizpatronen ähnlicher Grösse ausgetauscht:



Abbildung 4: Zwei Zellen wurden entfernt

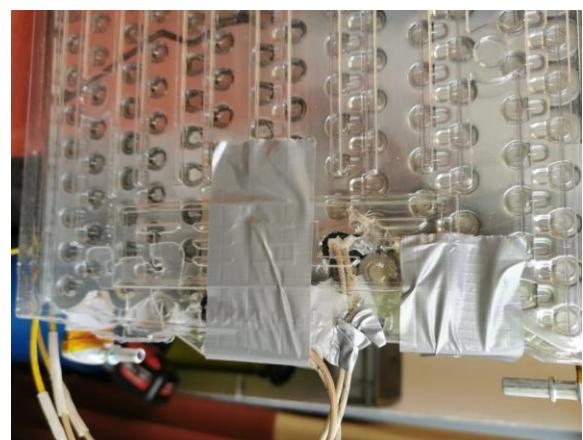


Abbildung 5: Und mit Heizpatronen ausgetauscht



Für den Fall, dass der thermische Runaway nicht durch Überhitzung der Heizpatronen erreicht wurde, wurde eine kleine Menge eines Gemisches aus Eisenoxid- und Aluminium-Granulat (Handelsname: Thermit) in denselben Modulen in zwei kleinen Beuteln platziert.



Abbildung 6: Beuteln mit Gemisch aus Eisenoxid- und Aluminium-Granulat

Nach der Vorbereitung wurde die Batterie wieder verschlossen und in das Elektrofahrzeug eingebaut. Bei der Vorbereitung wurde darauf geachtet, dass keine Änderungen vorgenommen wurden, die das Verhalten des Fahrzeugs im Brandfall verändern könnten.

2.3 Versuchsort

Beide Tests wurden in einem Stollen im Versuchsstollen Hagerbach (Polistrasse 1, 8893 Flums) durchgeführt.

Der Stollen, der für die Tests verwendet wurde, hat eine Breite von 6 m und eine Höhe von 4 m. Im Inneren des Tunnels wurde in dem Bereich, in dem sich die Autos befanden, eine Zwischendecke in einer Höhe von 2,40 m über dem Boden angebracht. Die Decke wurde aus wasserabweisenden und feuerfesten Platten gefertigt. Der Testbereich im Tunnel wurde mit zwei Vorhängen aus feuerfestem Faserfilz abgesperrt. An der Rückseite des Tunnels war ein Ventilator angebracht, der während der Tests aktiviert werden konnte, um Rauch anzusaugen. Der Ventilator war wiederum über eine Lutte mit einem Filter verbunden, der den Verbrennungsräuch wusch. Nach der Rauchwäsche war noch ein zweiter Sicherheitsraum für den Löschtrupp eingerichtet, der während der Versuche nur mit Sicherheitsausrüstung betreten wurde. Die Rauchgase in diesem Bereich wurden nach Vorgabe der Behörden zusätzlich über einen Aktivkohlefilter abgezogen und so Emissionsminimiert an den Frischluftdurchfluteten Lüftungsstollen freigesetzt.

Sämtliche anfallende Wassermengen des Versuches wurden getrennt gefasst und fachgerecht entsorgt.

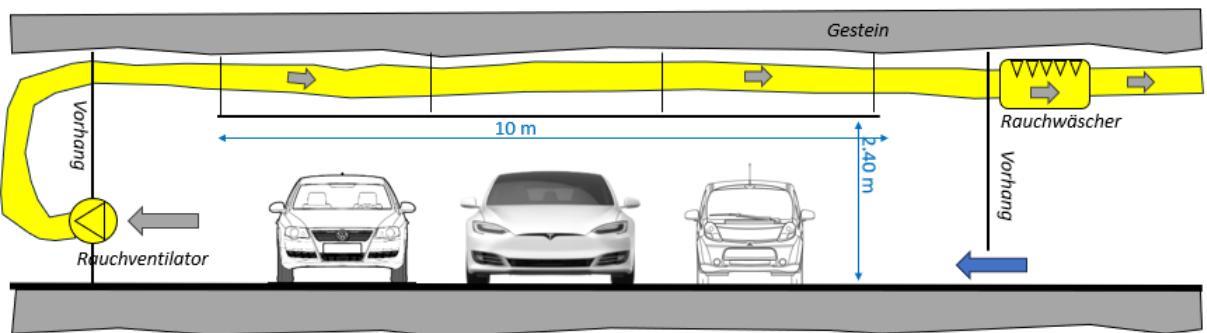


Abbildung 7: Versuchsaufbau

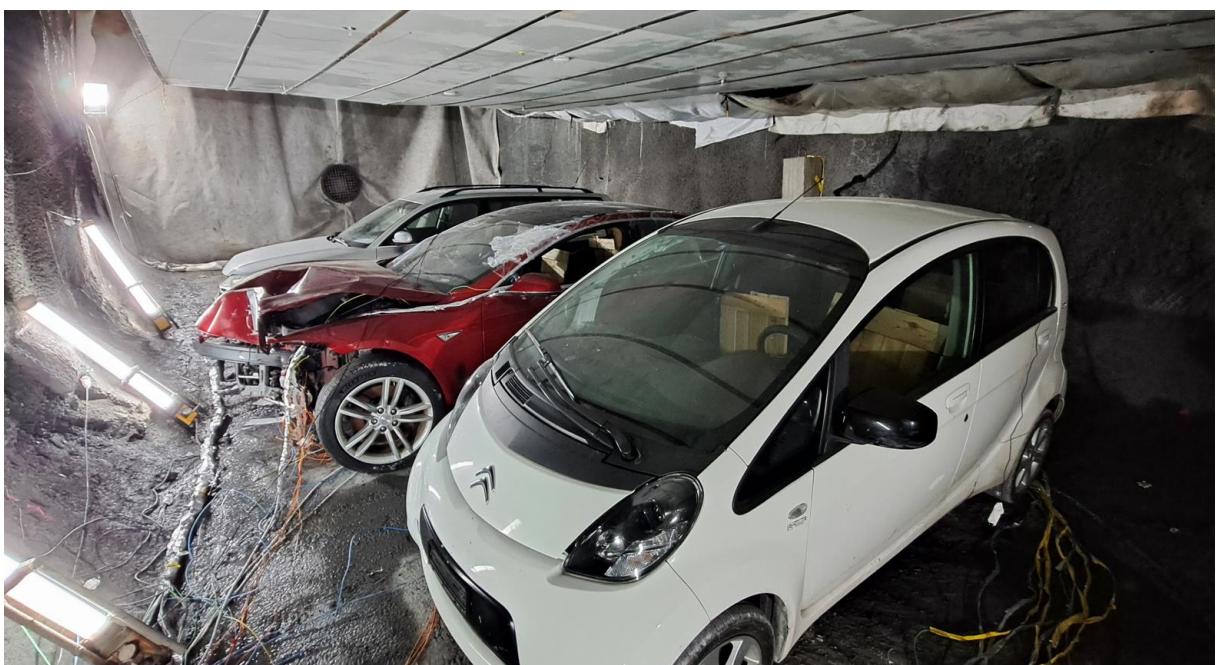


Abbildung 8: Foto des Versuchsbereichs

2.4 Löschtruppe

Eine Löschtruppe mit Wasserwerfern begleitete die Tests. Ein Eingreifen der Löschtruppe war für den Fall geplant, dass das Feuer außer Kontrolle gerät und die Sicherheit im Tunnel gefährdet.

2.5 Betonstützen

Um die Auswirkungen eines Brandes eines Elektrofahrzeugs auf die tragenden Strukturen zu testen, wurde in jedem Versuch ein Betonpfeiler zwischen die beiden Elektroautos gestellt.

Die Stützen hatten einen quadratischen Querschnitt von $20 \times 20 \text{ cm}^2$ und eine Gesamthöhe inklusive Betonfundament von 1.75m.

Die Betonklasse entsprach gemäss SIA262 einem Beton C30/37 mit einer charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit von mindestens $f_{ck}=30 \text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen der Betonierung.

Die Stützen wurden einfach auf den Boden gestellt, sie waren nicht fest mit dem Boden verbunden.



Abbildung 9: Betonierung der Stützen

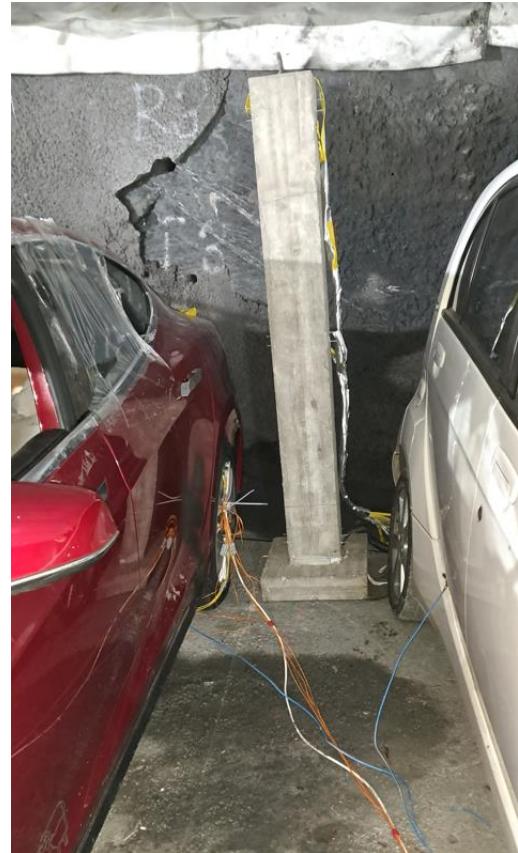


Abbildung 10: Position der Stützen im Versuch

2.6 Messtechnik

Die Temperaturen wurden mit K-Sensoren gemessen (Datenblatt im Anhang). Für jeden Test wurden insgesamt 29 Sensoren verwendet:

- 5 Sensoren im Inneren der Batterie des Tesla-Fahrzeugs
- 12 Sensoren zur Messung der Temperaturen in der Umgebung
- 12 Sensoren zur Messung der Temperaturen im Inneren des Betonpfeilers

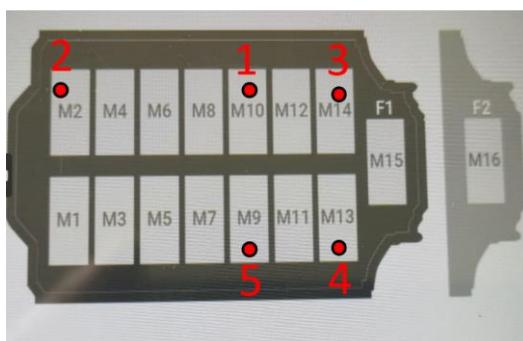


Abbildung 11: Übersicht der Sensoren in der Batterie

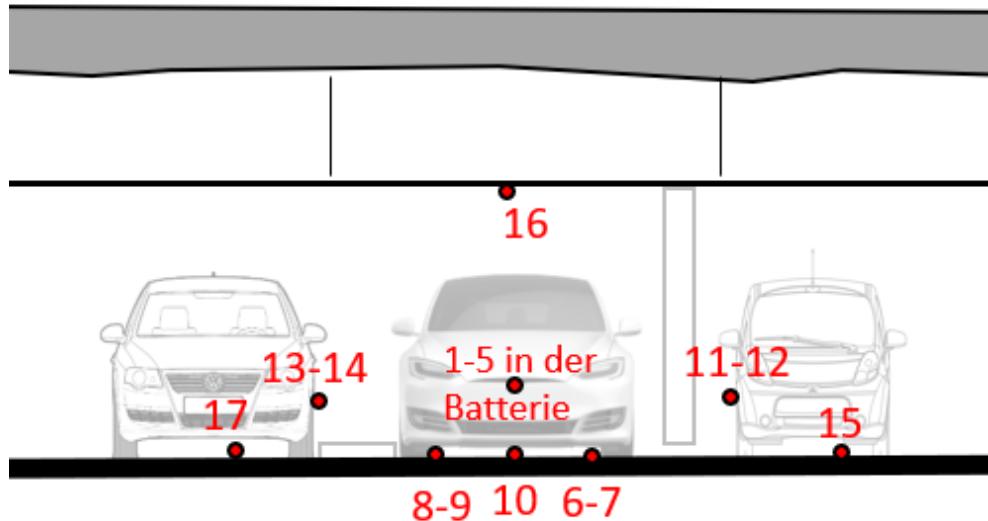


Abbildung 12: Ansicht, Position der Sensoren in der Umgebung

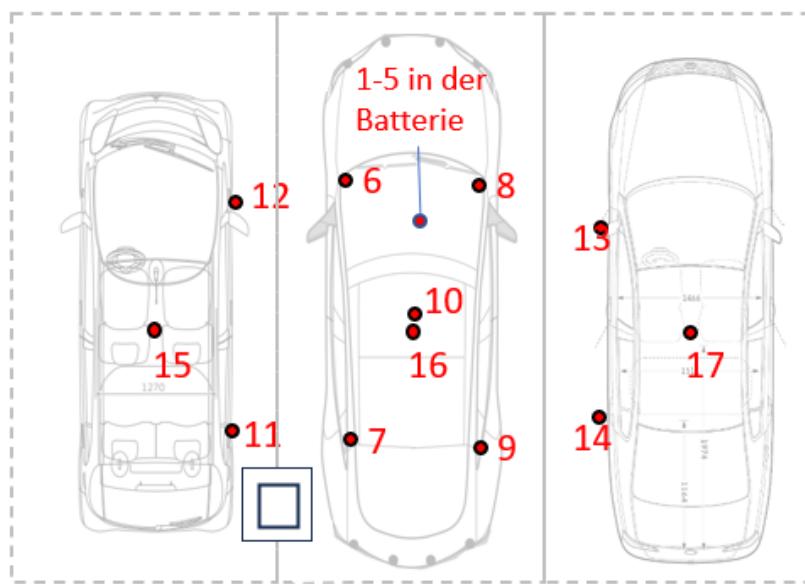


Abbildung 13: Grundriss, Position der Sensoren in der Umgebung

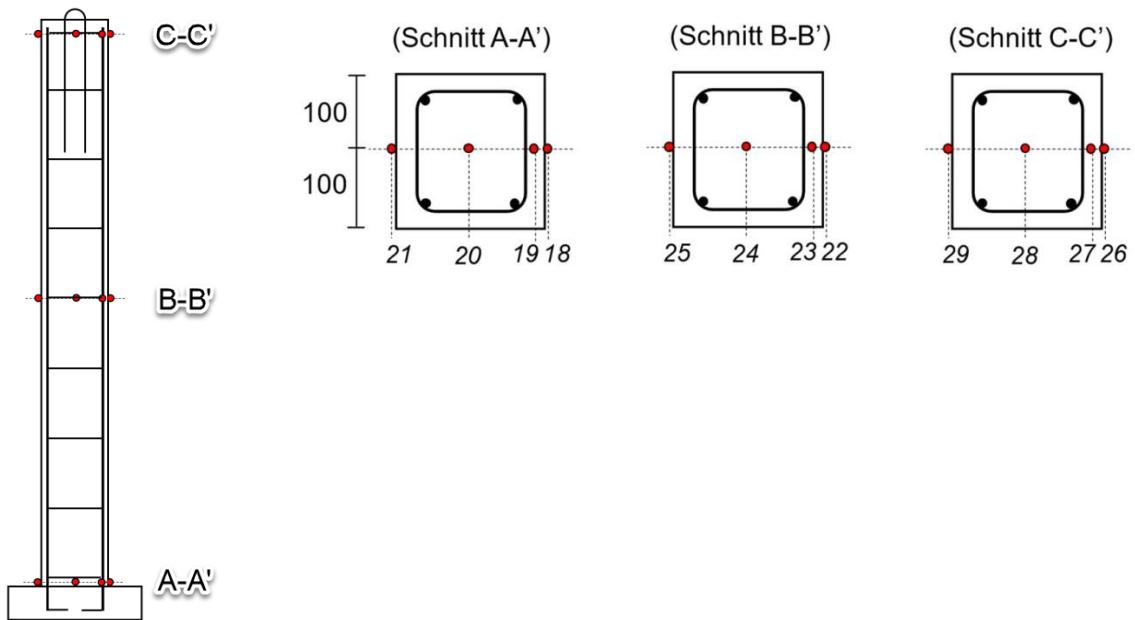


Abbildung 14: Position der Sensoren in der Betonstütze

Die Sensoren im Inneren der Batterie wurden oberhalb der Zellen und unterhalb der Schutzplatte angebracht.

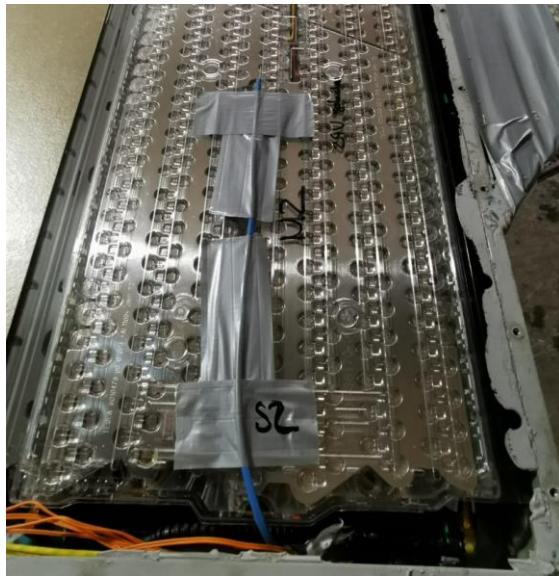


Abbildung 15: Position des Sensors 2 im Modul 2



Abbildung 16: Schutzplatten vor dem Wiederaufbau der Batterie



Die Sensoren im Boden und an den Karosserien der Autos wurden mit Metallprofilen befestigt.



Abbildung 17: Befestigung der Sensoren an der Karosserie



Abbildung 18: Befestigung der Sensoren am Boden

Die Sensoren an der Oberfläche der Betonstütze wurden mit Metallprofilen befestigt. Die Sensoren in den Stützen wurden einbetoniert.

2.7 Videotechnik

Der Versuchsbereich wurde mit mehreren Web-Cams überwacht. Bei den Kameras handelte es sich um das Modell LOGITECH C270 HD, das an verschiedenen Stellen im Tunnel und im Inneren der Autos angebracht war.

Das folgende Bild zeigt die Position der Kameras:

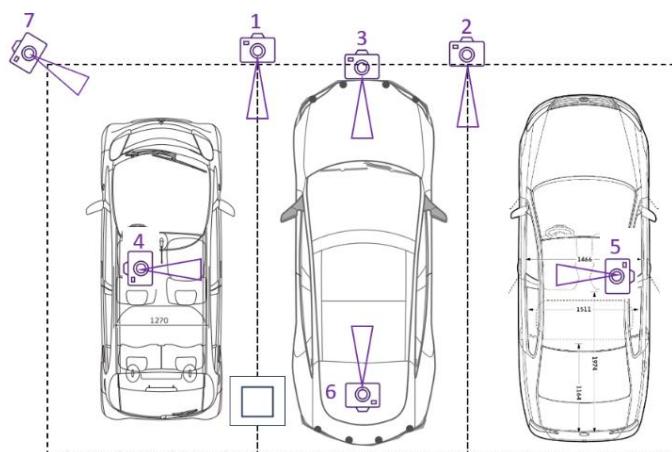


Abbildung 19: Grundriss, Position der Kameras



Kamera 1 und 2: Aufnahme zwischen den Autos

Kamera 3: Aufnahme unter dem Tesla

Kamera 4, 5 und 6: Aufnahme in den Autos

Kamera 7: Umgebung

2.8 Weitere Messungen

2.8.1 Rauchmelder

Drei Rauchmelder des Modells THERMOPTEK ST-622-DET wurden über den Autos in der Abhangdecke installiert (technisches Blatt im Anhang).

2.8.2 Battery Management System

Über ein Peripheriegerät, das an einem sicheren Ort platziert wurde, war es möglich, auf Informationen aus dem Batteriemanagementsystem des Tesla-Fahrzeugs zuzugreifen. Für jedes Modul konnten Temperatur, Spannung und Ladezustand gemessen werden.

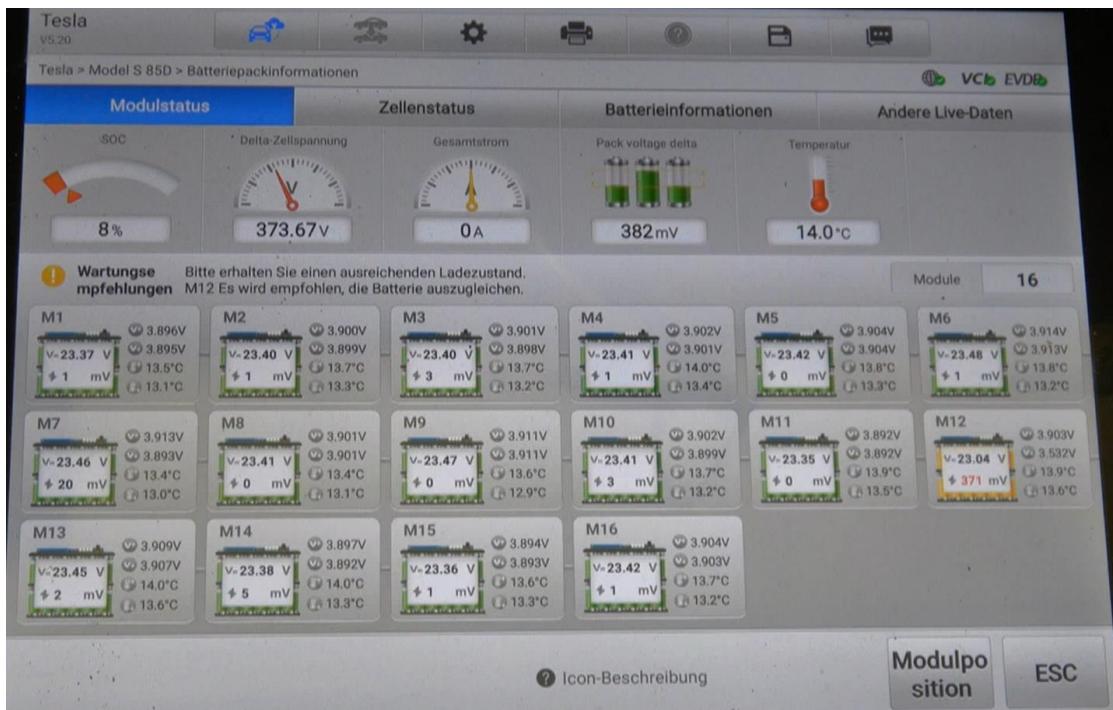


Abbildung 20: Bildschirmaufnahme, Battery Management System



3 Brandversuch mit Sprinkleranlage

Der erste Brandversuch fand am 12.02.2024 statt.

3.1 Fahrzeuge

Der erste Brandversuch wurde an folgende Fahrzeugen durchgeführt:

- Tesla Modell S, Baujahr 2015, Elektroauto
- Citroen C0, Baujahr 2012, Elektroauto
- Volkswagen Passat, Baujahr 2002, Auto mit Verbrennungsmotor

Sowohl der Tesla als auch der Volkswagen Passat waren Unfallfahrzeuge. Die Schäden an der Karosserie waren jedoch nicht so schwerwiegend, dass sie das Verhalten der Autos im Falle eines Brandes hätten verändern können.



Abbildung 21: Volkswagen Passat



Abbildung 22: Citroen C0



Abbildung 23: Tesla Model S

3.2 Sprinkleranlage

Im Inneren des Versuchsbereichs wurde eine Sprinkleranlage installiert.

Das System wurde gemäß den Schweizer SES-Richtlinien dimensioniert und von einem zertifizierten Unternehmen ausgeführt.

Unter der Abhangdecke wurden 6 Sprinklerdüsen an den folgenden Stellen eingebaut:

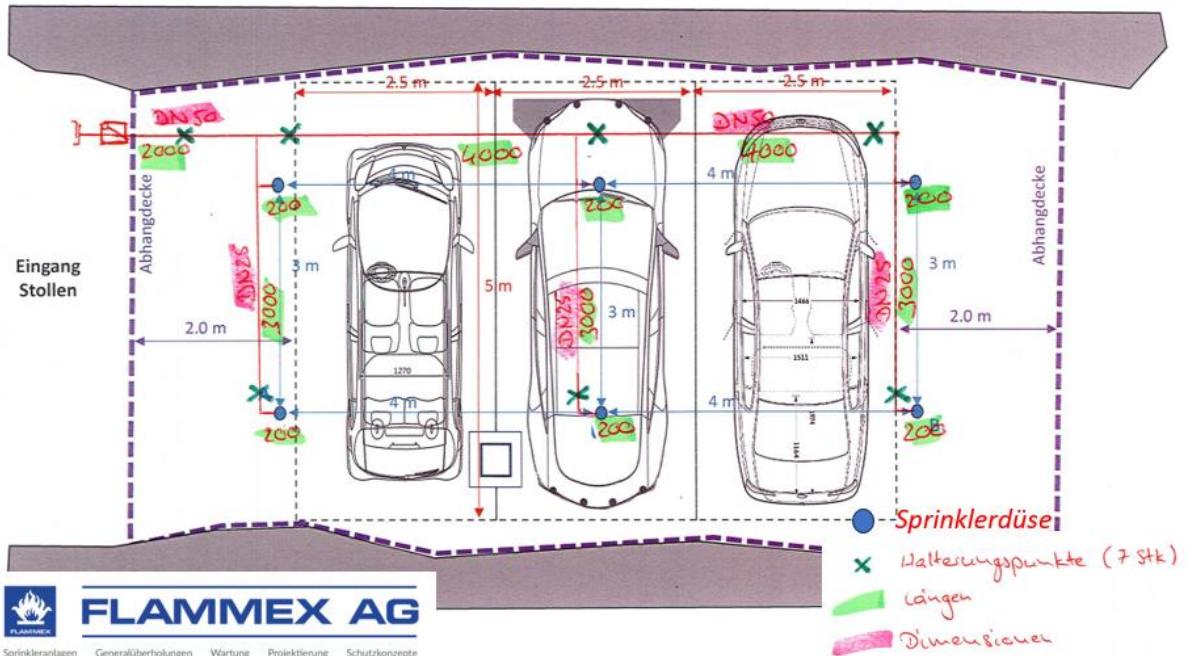


Abbildung 24: Sprinklernetz im Versuchsstollen

Die Düsen hatten die folgenden Eigenschaften:

- RTI Normal
- K 80
- Hängend
- Auslösungstemperatur 68°C

Die Düsen waren über ein Rohrsystem miteinander verbunden, das mit einer Pumpe und einem Wasserreservoir gekoppelt war.

Mit Hilfe eines Coriolis-Massendurchflussmessers war es möglich, die Wasserdurchflussmenge und den Druck während des Tests zu messen.

Die Veränderung der Wasserdurchflussmenge während des Tests wurde aufgezeichnet.

Vor Beginn des Tests wurde das System getestet, um sicherzustellen, dass sowohl der Druck als auch die Wasserdurchflussmenge den von den SES-Richtlinien geforderten Werten entsprachen.



Abbildung 25: Abnahme der Sprinkleranlage



Abbildung 26: Druck- und Durchflussmessung

3.3 Logbuch des ersten Versuchs

Der erste Versuch wurde um 13:42 Uhr gestartet.

Raumtemperatur: 12°C.

Die wichtigsten Ereignisse, die durch die Videokameras im Stollen aufgenommen wurden, sind in der folgenden Tabelle beschrieben:

| Uhrzeit | Sprinkler | Ereignis |
|---------|-----------|---|
| 13:42 | AUS | Die Heizpatronen im Modul 8 der Tesla Batterie werden eingeschaltet |
| 13:46 | AUS | Rauch entweicht aus den Ventilen unter dem Tesla |
| 13:51 | AUS | Ein Rauchmelder detektiert den Rauch |
| 14:10 | AUS | Der Versuchsbereich ist stark verraucht. |
| 14:37 | AUS | Starker Knall |
| 14:38 | EIN | Heftige Flammen sind im Inneren des Tesla zu sehen, die Sprinkleranlage löst aus. Durchfluss 190 l / min |
| 14:45 | EIN | Die Sprinkleranlage bringt das Feuer unter Kontrolle. Der Brand beschränkt sich nur auf den Fahrgastrraum des Tesla |
| 14:53 | AUS | Um die Wirkung der Sprinkleranlage auf den Brand zu testen, wird die Anlage zum ersten Mal abgestellt |



| | | |
|-------|-----|---|
| 14:57 | AUS | Ohne Sprinkleranlage nimmt die Intensität des Feuers stark zu. Durch die Hitze im Inneren des Fahrgastraums schmilzt das Polykarbonatdach des Teslas. Weitere Knalle |
| 15:05 | AUS | Brandüberschlag auf das seitliche E-Auto: Der Lack der Autotüren fängt Feuer. Die Glasscheiben bersten |
| 15:08 | EIN | Die Sprinkleranlage wird wieder eingeschaltet, durch den Brand sind alle Sprinklerköpfe geborsten. Wasserfluss 400 l/min. |
| 15:18 | AUS | Die Sprinkleranlage wird abgeschaltet. Die Löschtruppe interveniert und löscht den Brand. Im Versuchstollen ist es dunkel. |
| 15:30 | AUS | Trotz des Eingreifens der Löschtruppe sind weitere Knalle zu hören. Die Temperaturen in der Umgebung steigen schnell an. Flammen im vorderen Teil des Tesla |
| 15:40 | EIN | Die Sprinkleranlage wird wieder eingeschaltet |
| 16:00 | AUS | Die Sprinkleranlage bringt den Brand unter Kontrolle. Es sind keine Flammen mehr zu sehen. Die Temperaturen sowohl in der Batterie als auch in der Umgebung sinken. Ende des Tests Nach dem Test wurde die Batterie für das Recycling zerlegt. Bei der Sichtprüfung der Batterie wurde festgestellt, dass alle Module durch den Thermal Runaway beschädigt waren. |

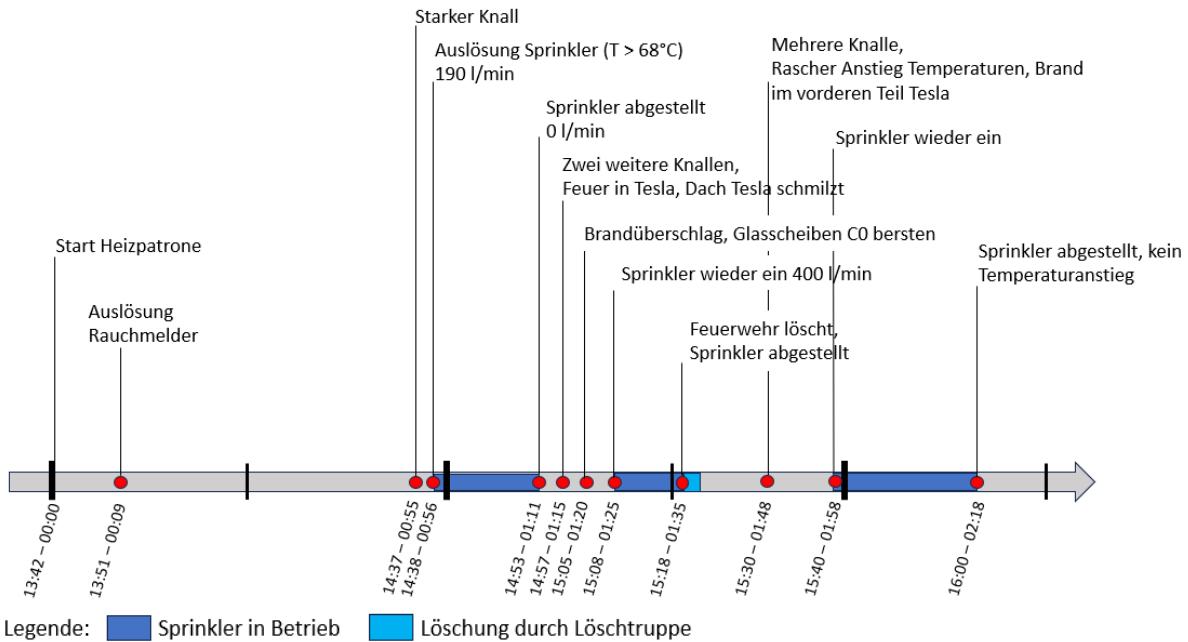


Abbildung 27: Tabelle und Zeitlinie der wichtigsten Ereignisse

3.4 Bilder des ersten Versuchs

Siehe Anhang 10.2.



4 Brandversuch mit dem System FASR-Pyrosense

Der zweite Versuch fand am 14.02.2024 statt.

4.1 Fahrzeuge

Der zweite Brandversuch wurde an drei Fahrzeugen durchgeführt:

- Tesla Modell S, Baujahr 2014
- Mitsubishi i-MiEV, Baujahr 2012
- Peugeot 206 cc, Baujahr 2004

Der Tesla war Unfallfahrzeuge. Die Schäden an der Karosserie waren jedoch nicht so schwerwiegend, dass sie das Verhalten der Autos im Falle eines Brandes hätten verändern können.



Abbildung 28: Peugeot 206 cc



Abbildung 29: Tesla Model S



Abbildung 30: Mitsubishi i-MiEV

4.2 Das System FASR-Pyrosense

Das FASR-System ist ein innovatives Brandbekämpfungssystem für Elektrofahrzeuge. Das System ist Eigentum der Pyrosense GmbH und ist durch ein internationales Patent geschützt.



Das System basiert auf zwei Prinzipien:

1. Im Falle einer Batteriefehlfunktion kommt es zu einem Temperaturanstieg unterhalb des Fahrzeugbodens. Das System überwacht die Temperaturen unterhalb des Fahrzeugs und aktiviert das Löschsystem in einem frühen Stadium des Thermal Runaway.
2. Das Löschsystem basiert auf einem Hochdruck-Hydrauliksystem (Druck von mehr als 80 bar). Das Wasser wird durch drei Düsen an der Vorderseite der Fahrzeuge zerstäubt. Zwei Düsen befinden sich an den Seiten des zu schützenden Fahrzeugs in einer Höhe von 30 Zentimetern und eine Düse ist unter dem Fahrzeug angebracht. Die hydraulische Verbindung zwischen Pumpen und Düsen erfolgt über Edelstahlrohre.

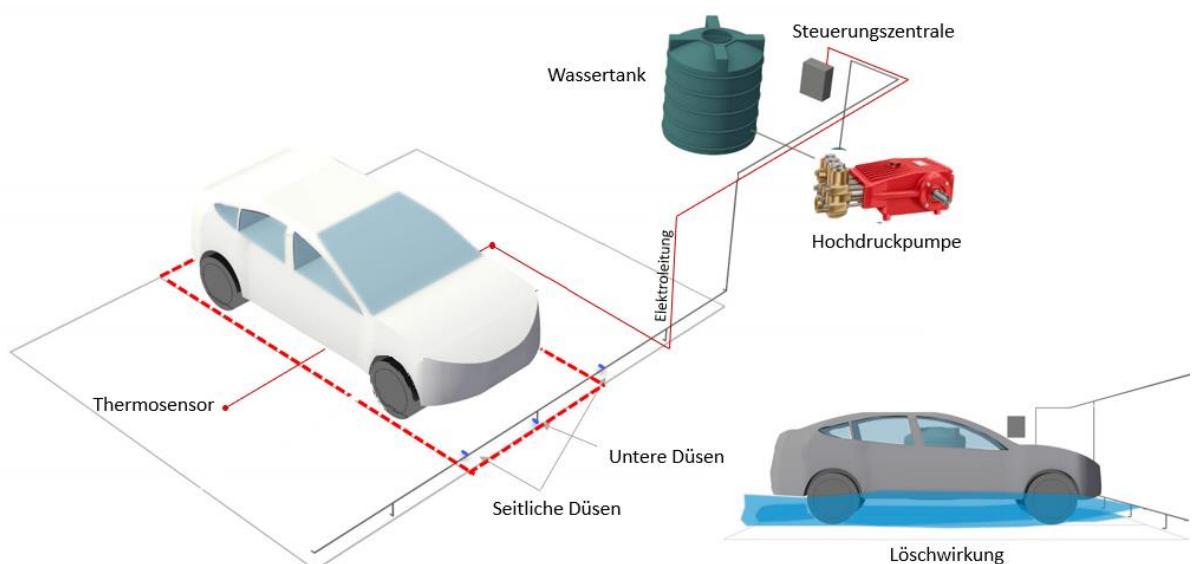


Abbildung 31: Funktion des Systems FASR-Pyrosense

Für den Test wurden die Düsen mit Metallstangen am Boden befestigt. Jede Düse war über einen Schlauch statt über ein Edelstahlrohr mit einer Hochdruckpumpe verbunden. Die Pumpe wiederum war mit einem Wassertank durch einen Schlauch verbunden.



Abbildung 32: Position und Befestigung der seitlichen und unteren Düsen

4.3 Logbuch des zweiten Versuchs

Der zweite Versuch wurde um 13:42 Uhr gestartet.

Raumtemperatur 13°C.

Die wichtigsten Ereignisse, die durch die Videokameras im Stollen aufgenommen wurden, sind in der folgenden Tabelle beschrieben:

| Uhrzeit | FASR-Pyrosense | Ereignis |
|---------|-------------------|--|
| 14:55 | AUS | Die zwei Heizpatronen im Modul 8 der Tesla Batterie werden eingeschaltet |
| 14:56 | AUS | Rauch entweicht aus den Ventilen unter dem Tesla |
| 14:58 | AUS | Die Sicherung der zwei Heizpatronen schaltet aus |
| 15:05 | AUS | Der Rauchmelder detektiert den Rauch |
| 15:07 | AUS ^{*1} | Die für die Auslösung des FASR-Pyrosense Systems definierte Temperatur wird überschritten ^{*1} . |
| 15:56 | AUS | Die zwei Heizpatronen im Modul 10 der Tesla Batterie werden eingeschaltet |
| 15:58 | AUS | Die Sicherung der zwei Heizpatronen schaltet aus |
| 16:11 | AUS | Die Temperaturen in der Batterie bleiben tief. Das Gemisch aus Eisenoxid- und Aluminium-Pulver im Modul 8 wird angezündet. |
| 16:23 | AUS | Es ist kein dauerhafter Anstieg der Temperaturen festzustellen. Das Gemisch aus Eisenoxid- und Aluminium-Pulver im Modul 10 wird angezündet. |



| | | |
|-------|-----|--|
| 16:47 | AUS | Starker Knall, heftige Flammen sind im Inneren des Tesla zu sehen |
| 16:49 | EIN | Das FASR-Pyrosense System wird eingeschaltet |
| 16:52 | EIN | Durch die Hitze im Inneren des Fahrgastraums schmilzt das Polykarbonatdach des Tesla. Weitere Knalle |
| 17:19 | EIN | Die Temperaturen sind tief, der Brand scheint unter Kontrolle |
| 17:39 | EIN | Weitere Knalle, heftige Flammen im vorderen Teil des Teslas Der Brand nimmt an Intensität zu. |
| 18:13 | EIN | Die Temperaturen sinken überall |
| 18:53 | AUS | Ende des Tests. Nach dem Test wurde die Batterie für das Recycling zerlegt. Bei der Sichtprüfung der Batterie wurde festgestellt, dass alle Module durch Thermal Runaway beschädigt waren. |

*1 Das FASR-Pyrosense System wird planmäßig ausgelöst, sobald der Temperaturanstieg unter dem Auto einen vordefinierten Wert überschreitet.

Dadurch werden der Autoboden und die Batterie frühzeitig gekühlt, so dass wahrscheinlich das Thermal Runaway unterbrochen werden kann.

Aufgrund des Verhaltens der Batterien lässt sich nicht im Voraus sagen, ob die Erwärmung der Zellen zum Thermal Runaway und zur heftigen Kettenreaktion in der Batterie führen wird.

Um die Funktion des Systems auch im Falle eines Vollbrandes der Batterie zu testen, wurde das System erst eingeschaltet, nachdem die heftigen Flammen aus der Batterie festgestellt worden waren.

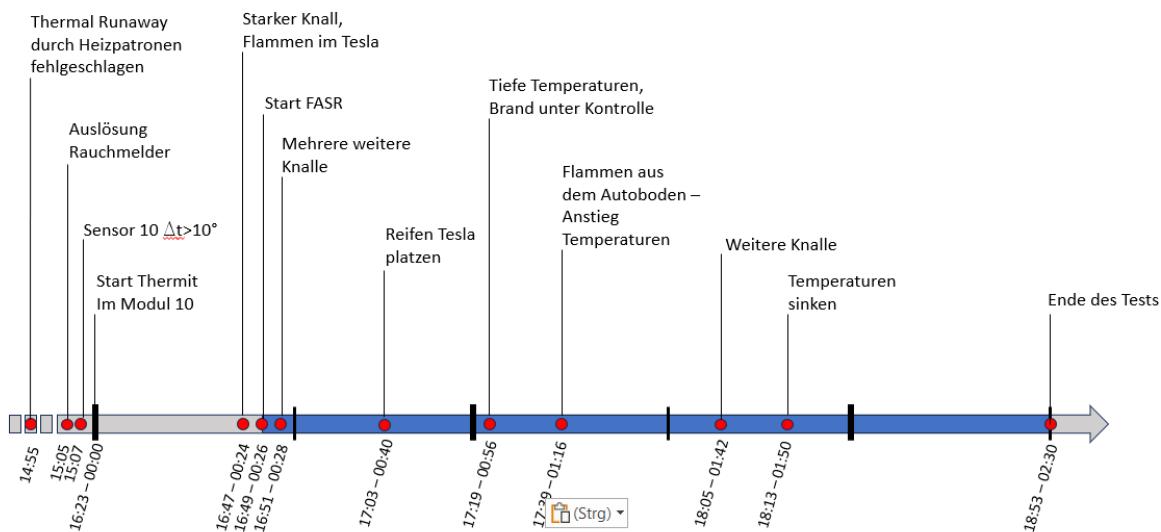


Abbildung 33: Tabelle und Zeitlinie der wichtigsten Ereignisse

4.4 Bilder des zweiten Versuchs

Siehe Anhang 10.3.



5 Ergebnisse und Diskussion

Während der Brandversuche wurde eine grosse Menge an Daten zu den Temperaturen in den Batterien, der Umgebung und den Betonpfeilern aufgezeichnet.

In diesem Kapitel werden diese Daten in grafischer Form dargestellt, das Verhalten der Temperaturen wird ausgewertet und interpretiert.

Die Temperaturen im Inneren der Stahlbetonstützen wurden in dem Dokument "Untersuchungen an Tragwerk und numerischen Brandsimulationen" der Firma XDEEA analysiert, das diesem Bericht beigefügt ist

Obwohl die Testbedingungen einen direkten Vergleich der Tests nicht zulassen, werden im Kapitel 5.3 die Unterschiede zwischen den zwei Brandversuchen und den zwei Brandbekämpfungsanlagen (Sprinkler und FASR-Pyrosense) analysiert und ausgewertet.

Am Ende der Brandversuche wurden die Fahrzeuge fotografiert, um die durch den Brand verursachten Schäden zu dokumentieren

Anhand der Fotos werden im Kapitel 5.6 die Schäden qualitativ bewertet.

5.1 Gemessene Temperaturen, Brandversuch mit Sprinkleranlage

5.1.1 Temperaturen in der Batterie

Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturverläufe in der Tesla-Batterie:

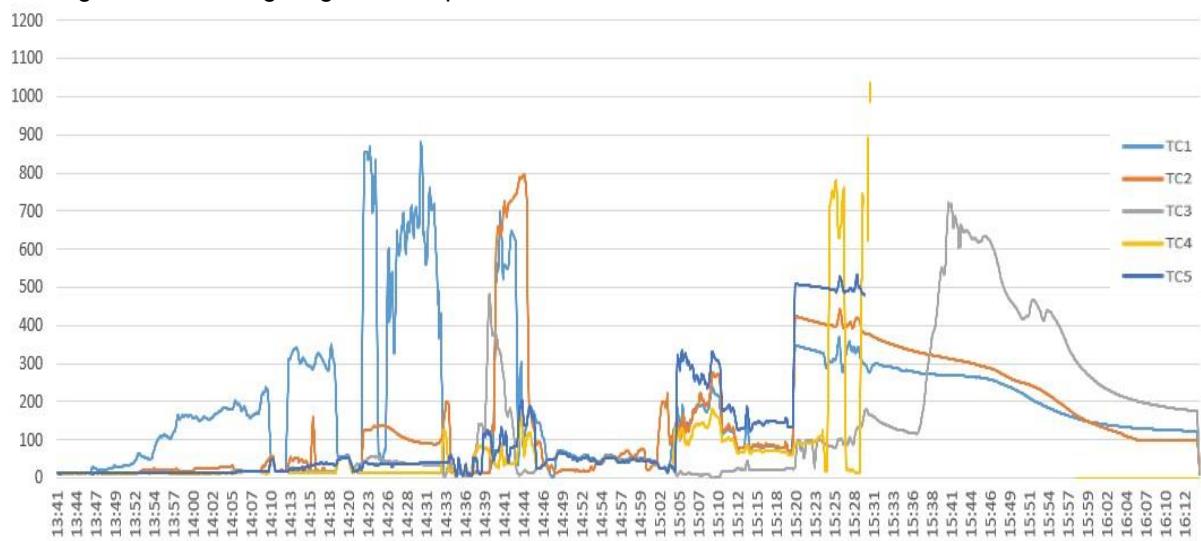


Abbildung 34: Temperaturen in der Batterie

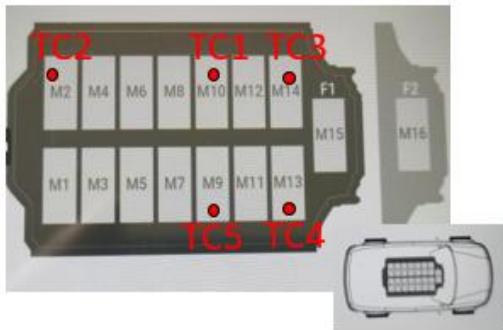


Abbildung 35: Position der Sensoren (siehe Abbildung 11)

Die Grafik zeigt mehrere Schwankungen bei der Messung der Temperaturen. Diese Schwankungen wurden wahrscheinlich durch die elektrischen Spannungen verursacht, die von der Batterie des Tesla-Fahrzeugs während des Brandes erzeugt wurden (das Auto wurde vor dem Test als Sicherheitsmaßnahme geerdet).

Um die Lesbarkeit der Grafik zu verbessern, wurden dem folgenden Bild weitere Kurven hinzugefügt, um die von den Schwankungen bereinigten Temperaturen darzustellen:

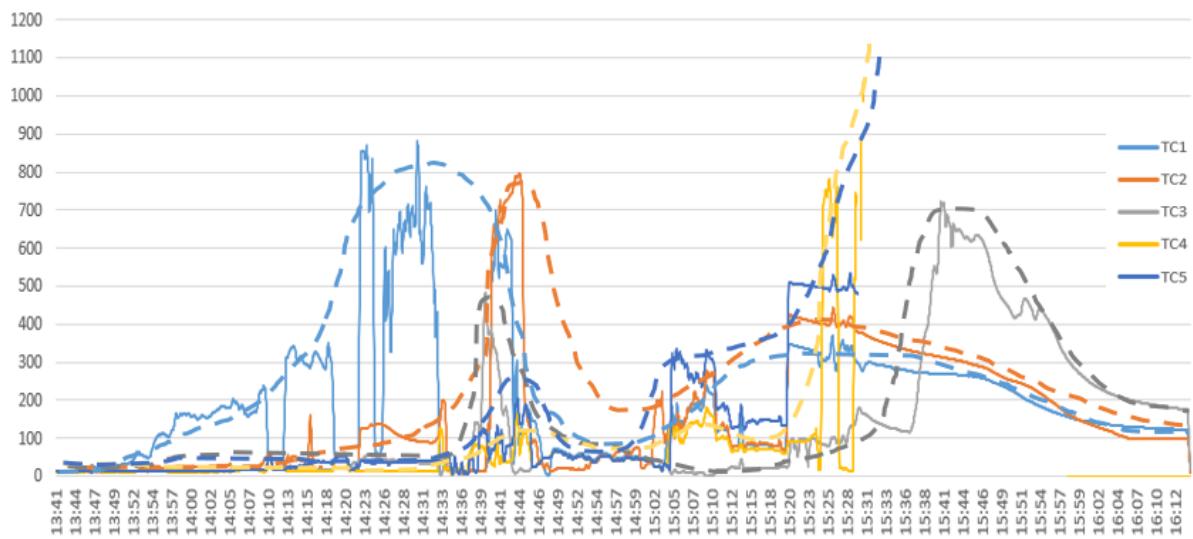


Abbildung 36: Temperaturen in der Batterie

Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ableSEN:

- Von dem Moment an, als die Heizpatrone in Modul 8 eingeschaltet wurde, stieg die Temperatur im Modul 10 stetig bis auf 800°C an.
- Nach der ersten Deflagration um 14:37 Uhr war ein Temperaturanstieg in den Modulen in der Nähe des Moduls 8 festzustellen.
- Um 14:44 Uhr lagen die Temperaturen in Modul 2 über 800 °C. Aus diesen Temperaturen kann abgeleitet werden, dass sich der Thermal Runaway von Modul 10 auf Modul 2 ausbreitete.



- Ab 15 Uhr begannen auch die Module an der Vorderseite des Fahrzeugs zu reagieren. In den Modulen 9 und 13 wurden sehr hohe Temperaturen ($> 1000^{\circ}\text{C}$) erreicht, die die Sensoren beschädigten
- Um 15:46 Uhr wurde auch in Modul 14 die Höchsttemperatur erreicht. Der Thermal Runaway breitete sich auf alle Module aus. Von diesem Moment an fielen alle Temperaturen in der Batterie

5.1.2 Temperaturen über dem Auto

Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturkurve, die der Sensor über dem Tesla aufzeichnete:

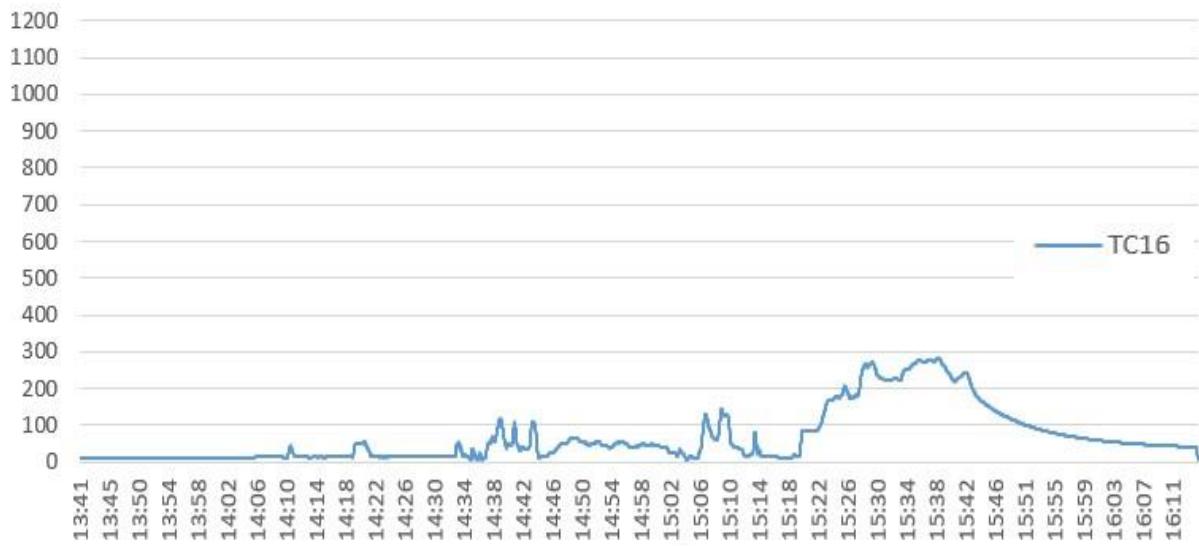


Abbildung 37: Temperaturen über dem Tesla

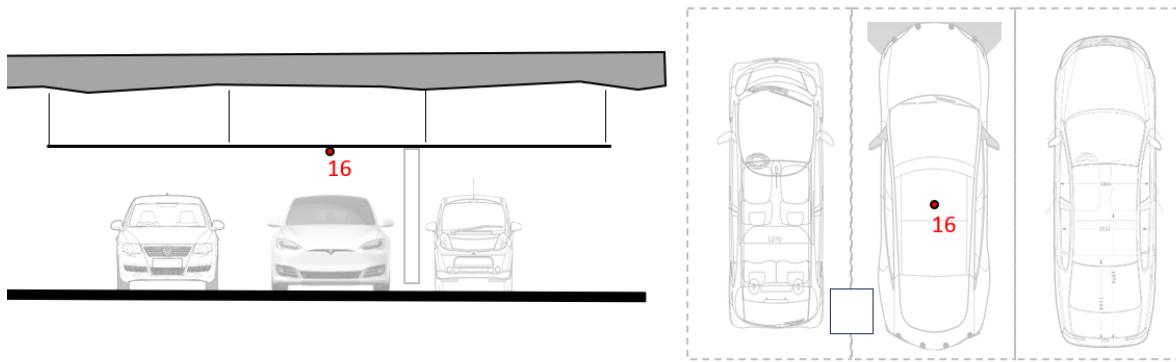


Abbildung 38: Position des Sensors

Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ablese:

- Ab 14:37 Uhr (Zeit der ersten Deflagration) stieg die Temperatur an.
- Die erhöhte Temperatur führte zur Auslösung der Sprinkleranlage (Die Sprinklerköpfe bersten ab 68°C)
- Die Sprinkleranlage kühlte das Auto von oben und sank die Temperaturen im Deckenbereich.



- Als die Sprinkleranlage zum ersten Mal abgeschaltet wurde (zwischen 14:53 und 15:08 Uhr), war der Brand auf den Fahrgasträum begrenzt und das Polycarbonatdach des Tesla noch intakt. Aus diesen Gründen blieben die Temperaturen an der Decke niedrig.
- Als die Sprinkleranlage zum zweiten Mal abgeschaltet wurde (zwischen 15:18 und 15:40 Uhr) reagierten die vorderen Module der Batterie. Die hohen Flammen breiteten sich an der Decke aus und erhöhten die Temperaturen.
- Ab 15:40 Uhr wurde die Sprinkleranlage wieder eingeschaltet. Die Temperaturen sanken sofort.

5.1.3 Temperaturen unter dem Auto

Die folgende Abbildung zeigt die von den Sensoren unter dem Tesla aufgezeichneten Temperaturkurven:

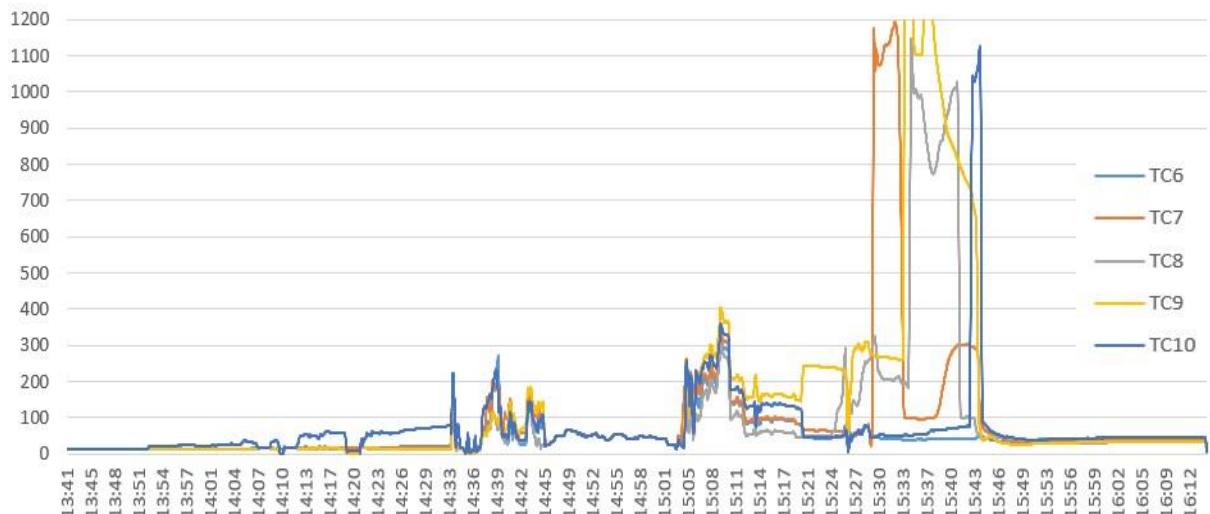


Abbildung 39: Temperaturen unter dem Tesla

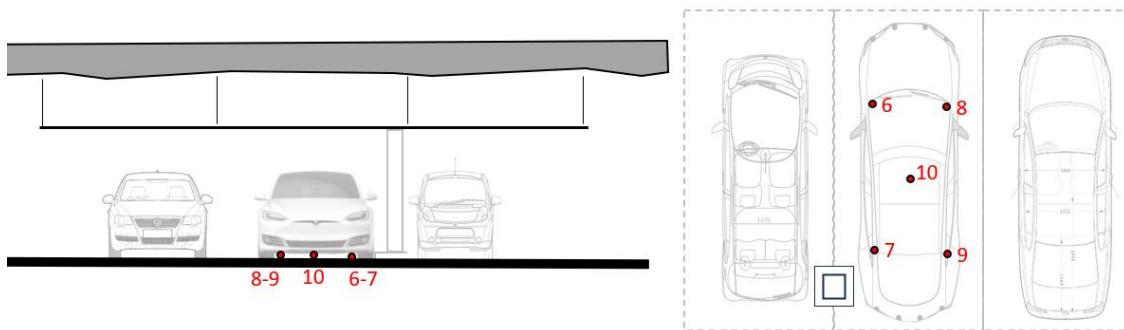


Abbildung 40: Position der Sensoren

Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ablesen:

- Kurz nach dem Einschalten der Heizpatrone in der Batterie (13:51 Uhr) stellte der Sensor in der Mitte (Sensor 10) einen Temperaturanstieg fest.
- Nach der Deflagration (14:37 Uhr) traten etwa 10 Minuten lang Flammen aus dem Überdruckventil aus, wodurch die Temperaturen unter dem Fahrzeugboden anstiegen.



- Zwischen 14:47 und 15:02 Uhr blieben die Temperaturen niedrig. Es kann davon ausgegangen werden, dass in dieser Phase keine Flammen aus den Überdruckventilen austraten. Das Wasser aus der Sprinkleranlage floss über den Boden und trug dazu bei, die Temperaturen unter dem Auto zu senken
- Ab 15:03 Uhr führte das Thermal Runaway in den Modulen dazu, dass Flammen aus den Überdruckventilen austraten.
- Ab 15:30 Uhr kam es zu einem exponentiellen Anstieg der Temperaturen, der durch die Reaktion der vorderen Module der Batterie verursacht wurde.
- Nach der Aktivierung der Sprinkleranlage ab 15:43 Uhr sanken die Temperaturen aufgrund des über die Sensoren fliessenden Wassers.

5.1.4 Temperaturen an E-Auto

Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturkurven, die von den Sensoren an der linken Seite und unter dem kleinen E-Auto aufgezeichnet wurden:

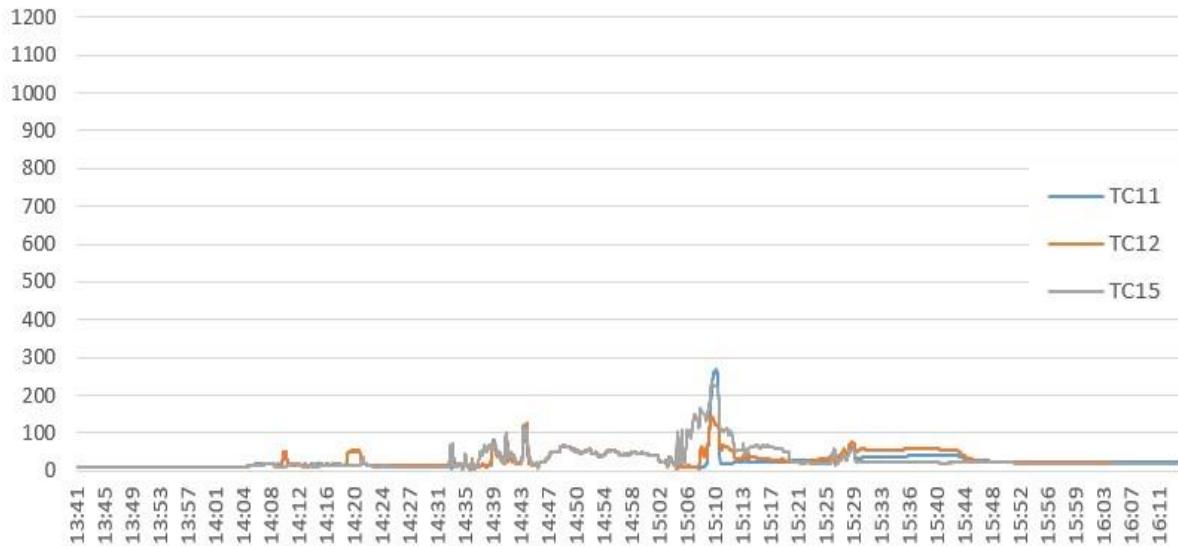


Abbildung 41: Temperaturen an E-Auto

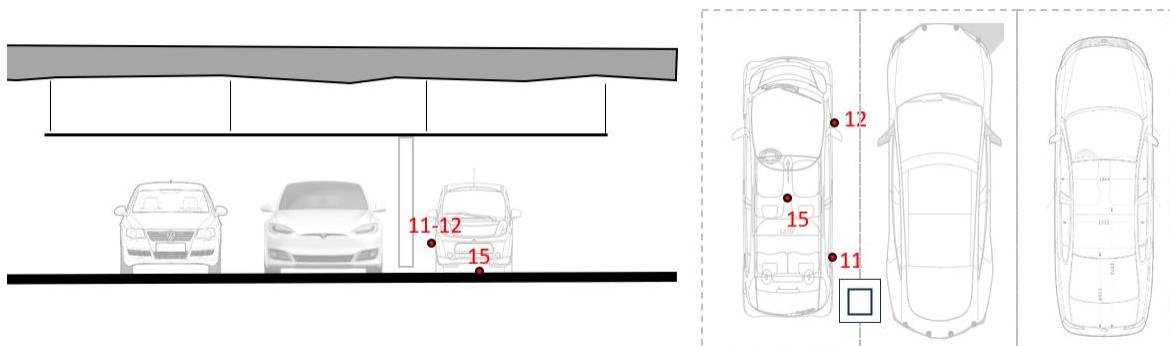


Abbildung 42: Position des Sensors

Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ableSEN:

- Im Allgemeinen blieben die Temperaturen während des gesamten Tests niedrig



- Um 15:05 Uhr war die Sprinkleranlage abgeschaltet.

Das Video des Versuchs zeigt, dass der Lack des Autos Feuer fang. Der Brandüberschlag wird durch den plötzlichen Temperaturanstieg der beiden Sensoren auf der Seite des Autos bestätigt

5.1.5 Temperaturen am Auto mit Verbrennungsmotor

Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturkurven, die von den Sensoren an der linken Seite und unter dem Auto mit Verbrennungsmotor aufgezeichnet wurden:

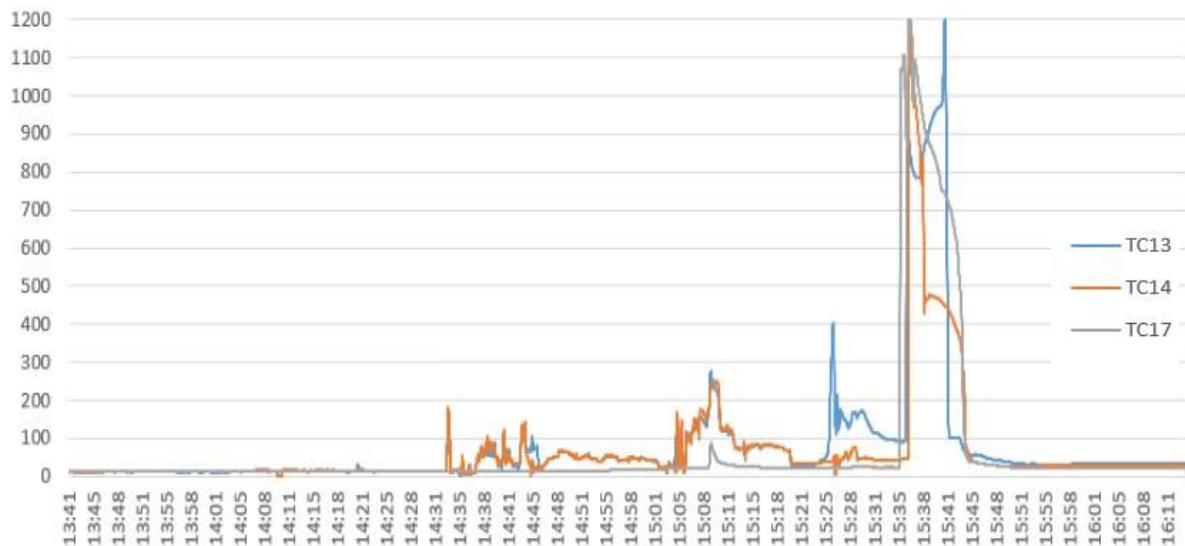


Abbildung 43: Temperaturen am Auto mit Verbrennungsmotor

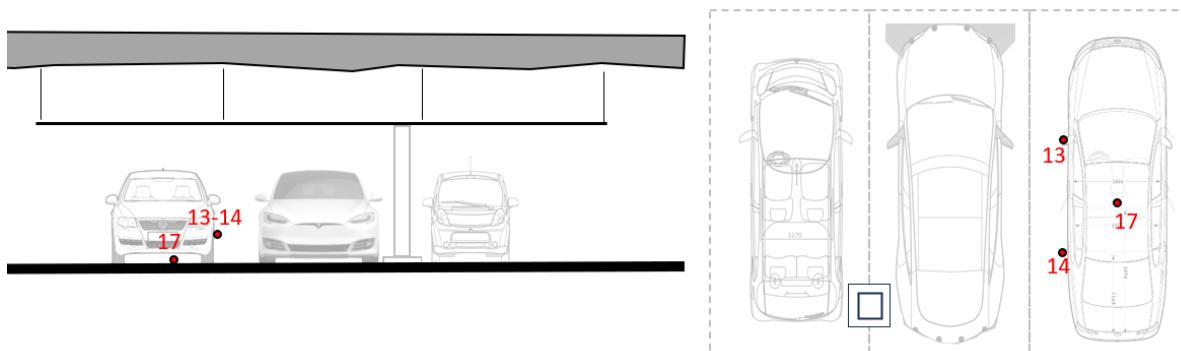


Abbildung 44: Position des Sensors

Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ablesen:

- Wenn die Sprinkleranlage in Betrieb war, blieben die Temperaturen niedrig
- Die Sprinkleranlage wurde zwischen 14:53 und 15:08 Uhr zum ersten Mal abgeschaltet. Ab 15:03 Uhr führte das Thermal Runaway in den Modulen dazu, dass Flammen aus den Überdruckventilen austraten. Dies führte wiederum zum Anstieg der Temperaturen an der Autoseite. Ab 15:08 Uhr sanken die Temperaturen dank der Kühlung durch die Sprinkleranlage
- Als die Sprinkleranlage zum zweiten Mal abgeschaltet wurde (zwischen 15:18 und 15:40 Uhr), reagierten die vorderen Batteriemodule. Durch die heftigen Flammen stiegen die Temperaturen



an der Autoseite auf bis zu 1200 °C an. Nach dem erneuten Einschalten der Sprinkleranlage sanken die Temperaturen wieder.

5.2 Gemessene Temperaturen, Brandversuch mit FASR-Pyrosense System

Anders als beim Test mit dem Sprinkler waren beim Test mit dem FASR-Pyrosense System mehrere Versuche erforderlich, um das Thermal Runaway in der Batterie auszulösen. Der Ablauf zur Auslösung des Thermal Runaway ist im Kapitel 4.3 beschrieben.

Alle Temperaturen sowohl in der Batterie als auch in der Umgebung blieben praktisch unverändert bis 16.11 Uhr, als das Gemisch aus Eisenoxid- und Aluminium-Pulver angezündet wurde.

Um die Daten des Experiments besser zu veranschaulichen, werden in den folgenden Tabellen nur die Temperaturen ab 16.11 Uhr dargestellt.

5.2.1 Temperaturen in der Batterie

Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturverläufe in der Tesla-Batterie:

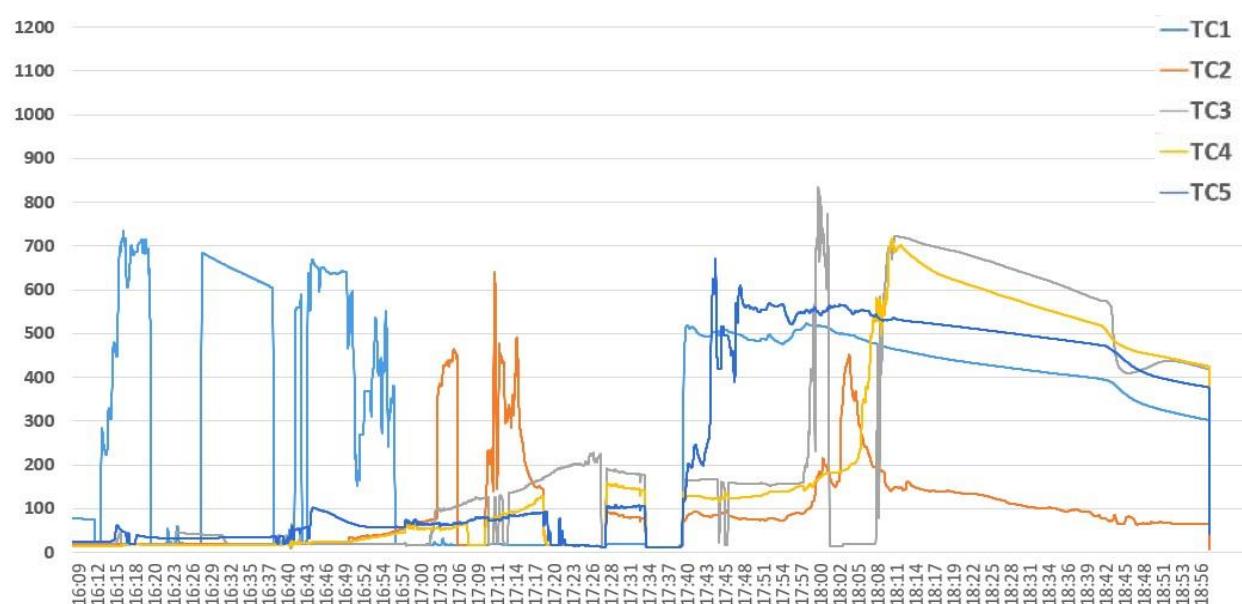


Abbildung 45: Temperaturen in der Batterie

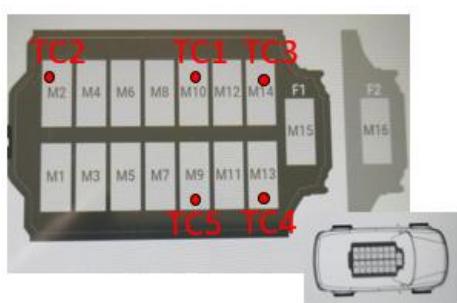


Abbildung 46: Position der Sensoren (siehe Abbildung 11)



Auch im zweiten Test zeigt die Grafik mehrere Schwankungen bei der Messung der Temperaturen.

Um die Lesbarkeit der Grafik zu verbessern, wurden dem folgenden Bild weitere Kurven hinzugefügt, um die von den Schwankungen bereinigten Temperaturen darzustellen:

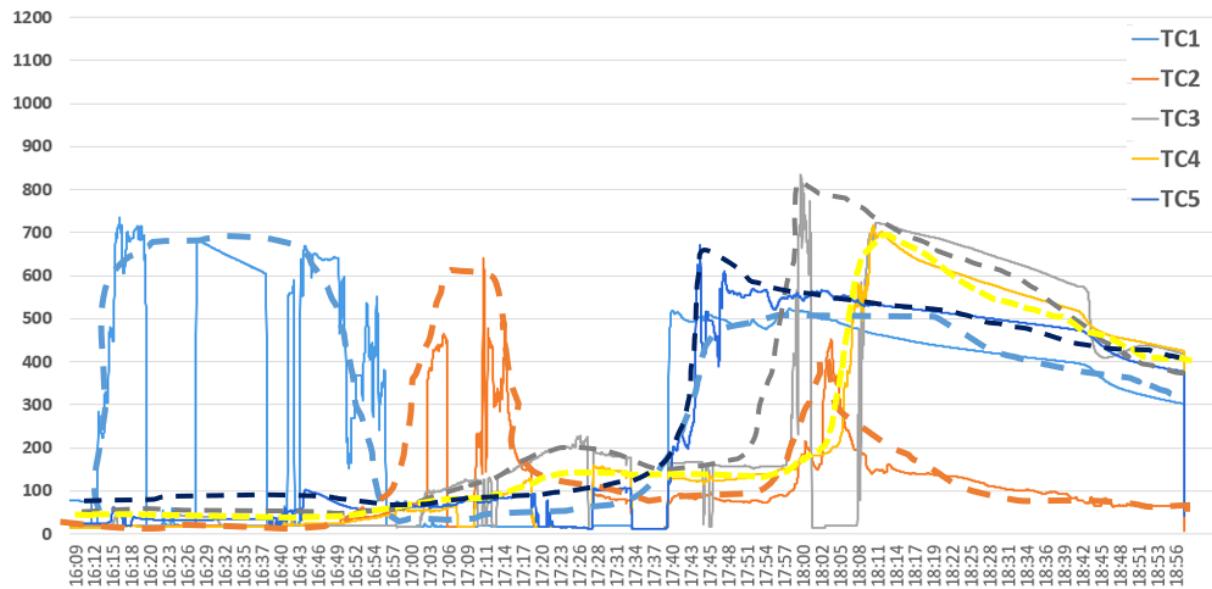


Abbildung 47: Temperaturen in der Batterie

Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ablesen:

- Von dem Moment an, als das Gemisch aus Eisenoxid- und Aluminium-Pulver angezündet wurde, stieg die Temperatur im Modul 10 stetig bis auf 700°C an.
- Nach der ersten Deflagration um 16:47 Uhr kam es zu einem Temperaturabfall in Modul 10 und einem Temperaturanstieg in Modul 2. Daraus kann abgeleitet werden, dass zu diesem Zeitpunkt alle Zellen in Modul 10 reagiert hatten und sich der Thermal Runaway auf die linken Module ausbreitete.
- Ab 17:30 Uhr begannen auch die Module an der Vorderseite des Fahrzeugs zu reagieren. In den Modulen 9 und 13 werden Temperaturen bis 800°C erreicht.
- Um 18:11 Uhr wurde auch in Modul 13 die Höchsttemperatur erreicht. Der Thermal Runaway hat sich auf alle Module ausgebreitet. Von diesem Moment an fallen alle Temperaturen in der Batterie



5.2.2 Temperaturen über dem Auto

Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturkurve, die der Sensor über dem Tesla aufzeichnete:

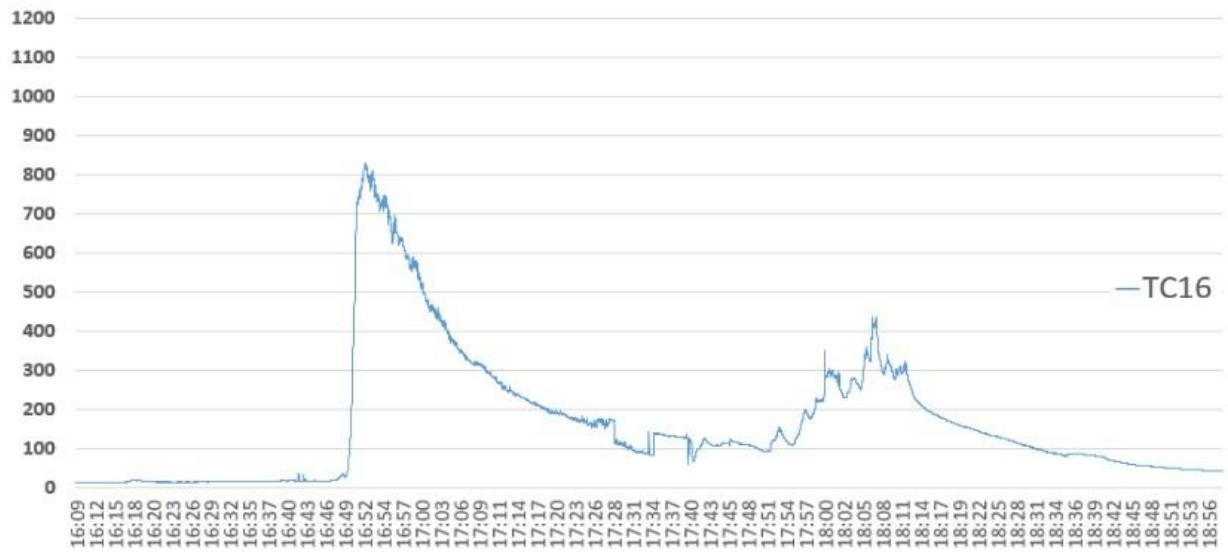


Abbildung 48: Temperaturen über dem Tesla

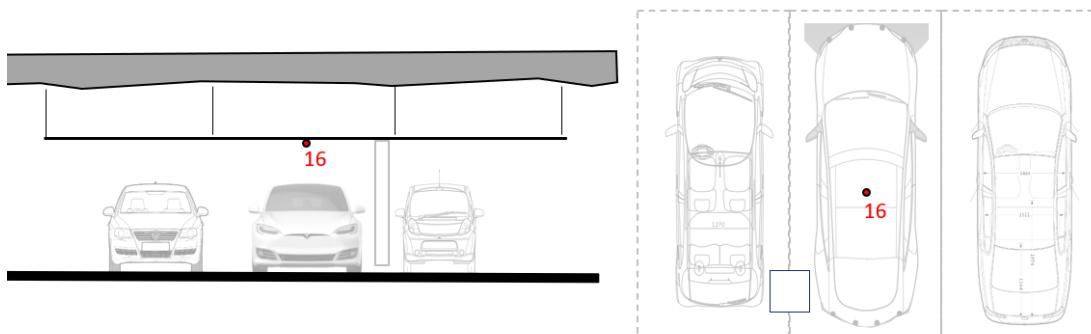


Abbildung 49: Position des Sensors

Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ablesen:

- Ab 16:49 Uhr (Zeit der ersten Deflagration) stieg die Temperatur rasch auf 800°C.
- Das FASR—Pyrosense System wurde um 16:51 Uhr eingeschaltet und versprühte Wassernebel, der den Raum zwischen den Fahrzeugen ausfüllte.
- Durch die vom Brand erzeugten konvektiven Luftströme wurde der Wassernebel angesaugt und sank allmählich die Temperatur an der Decke.
- Ab 17:48 Uhr kam es zu einem Temperaturanstieg aufgrund eines thermischen Durchgehens im Inneren der vorderen Batteriemodule.
- Um 18:08 Uhr wurde die Höchsttemperatur von 400°C erreicht. Anschliessend sanken die Temperaturen aufgrund der Kühlung durch den Wassernebel



5.2.3 Temperaturen unter dem Auto

Die folgende Abbildung zeigt die von den Sensoren unter dem Tesla aufgezeichneten Temperaturkurven:

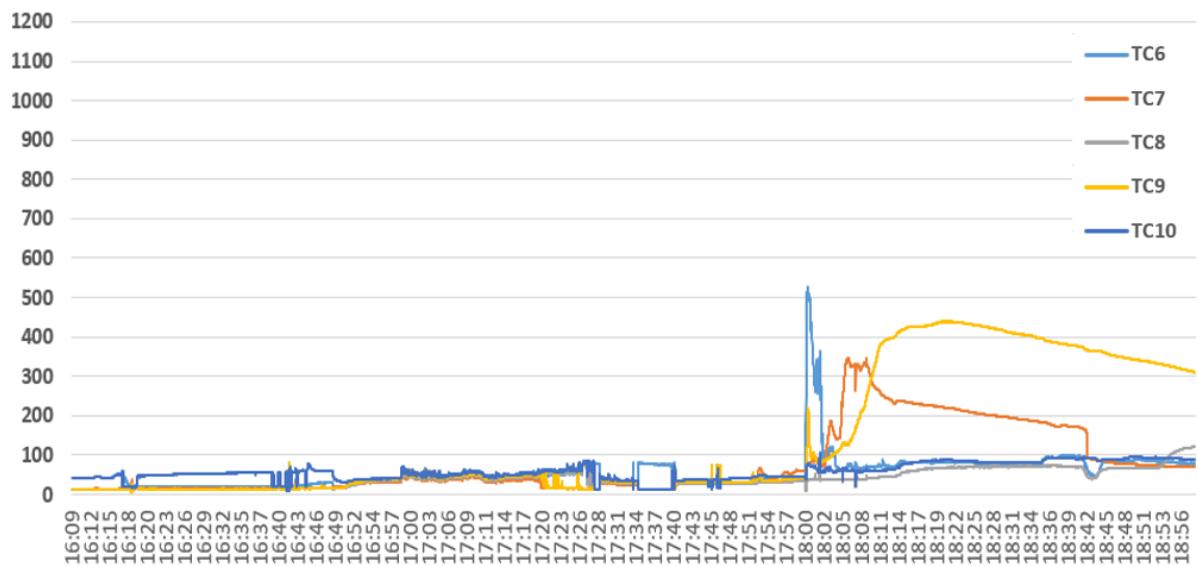


Abbildung 50: Temperaturen unter dem Tesla

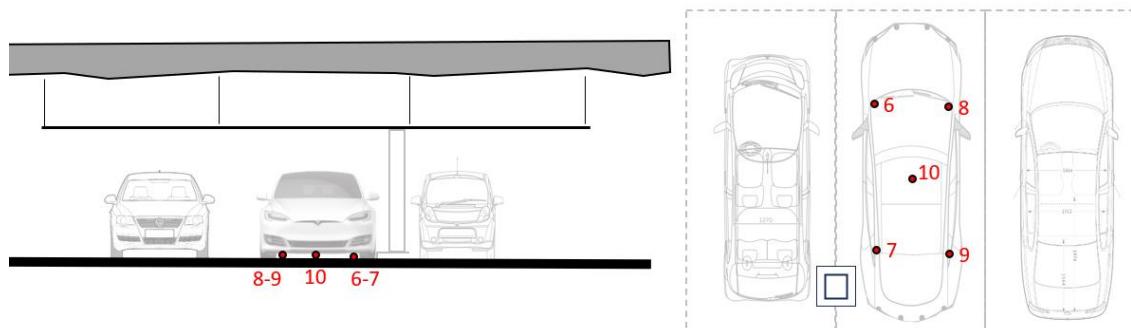


Abbildung 51: Position der Sensoren

Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ableSEN:

- Der unter dem Tesla versprührte Wassernebel hielt die Temperaturen während der Reaktion der hinteren Batteriemodule niedrig (unter 100°C).
- Um 18.00 Uhr kam es zu einem sprunghaften Anstieg der Temperaturen, die durch die Reaktion der Module an der Vorderseite der Batterie verursacht wurden.
- Wahrscheinlich beschädigte in diesem Moment die Hitze aus der Batterie den Hochdruckschlauch, den die Pumpe mit der Düse verbindet. Am Ende des Tests wurde festgestellt, dass der aus der Düse kommende WasserdRuck viel niedriger war als der Referenzdruck.



- Aufgrund des geringeren Drucks des FASR-Pyrosense Systems erreichte der Wassernebel nicht das Hinterteil des Fahrzeugs. Es ist ein Anstieg der von den Sensoren 7 und 9 aufgezeichneten Temperaturen festzustellen.
- Bei der kommerziellen Anwendung des FASR-Systems werden die Pumpen über Edelstahlrohre und nicht über Hochdruckschläuche an die Düsen angeschlossen.

Die Edelstahlrohre, die durch das zirkulierende Wasser gekühlt werden, bieten eine größere Widerstandsfähigkeit gegen Verformung als Hochdruckschläuche. Es ist daher anzunehmen, dass die Temperaturen während der gesamten Funktionsdauer des FASR-Pyrosense Systems sehr niedrig bleiben (unter 100°C)

5.2.4 Temperaturen an E-Auto

Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturkurven, die von den Sensoren an der linken Seite und unter dem kleinen E-Auto aufgezeichnet wurden:

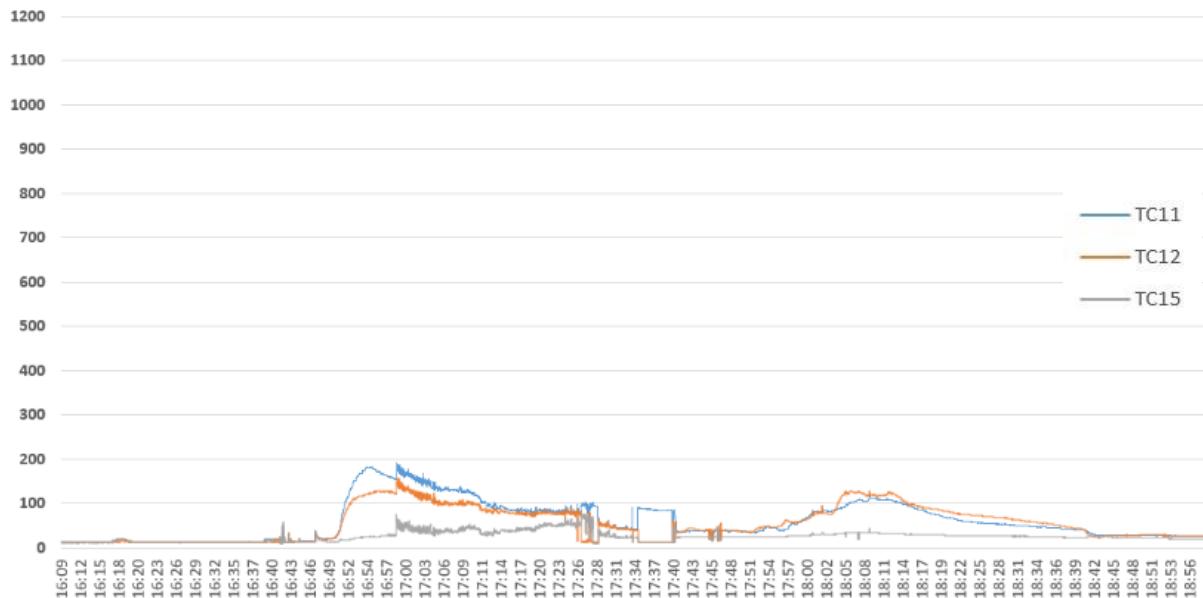


Abbildung 52: Temperaturen an E-Auto

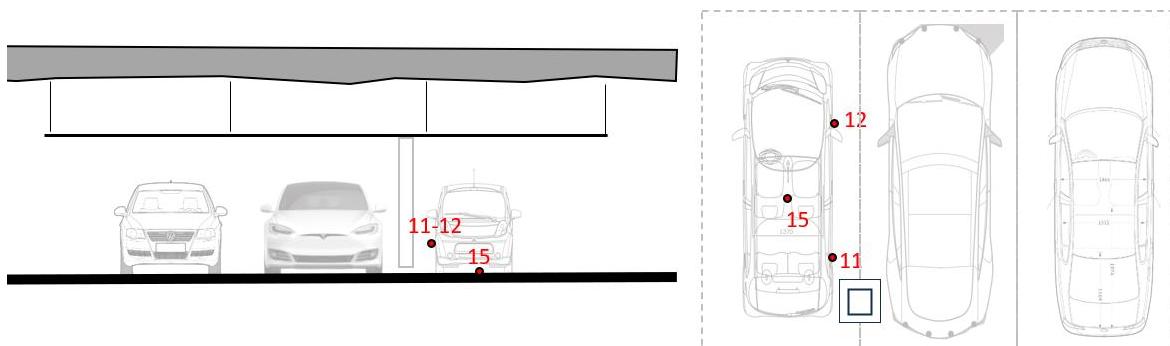


Abbildung 53: Position des Sensors



Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ablesen:

- Im Allgemeinen blieben die Temperaturen während des gesamten Tests niedrig
- Die Höchsttemperaturen wurden um 16:54 (180°C) und 18:08 (120°C) erreicht. Zu diesen Zeitpunkten hatte der Brand aufgrund des thermischen Durchgehens in den vorderen und hinteren Modulen seinen Höhepunkt erreicht.

5.2.5 Temperaturen am Auto mit Verbrennungsmotor

Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturkurven, die von den Sensoren an der linken Seite und unter dem Auto mit Verbrennungsmotor aufgezeichnet wurden:

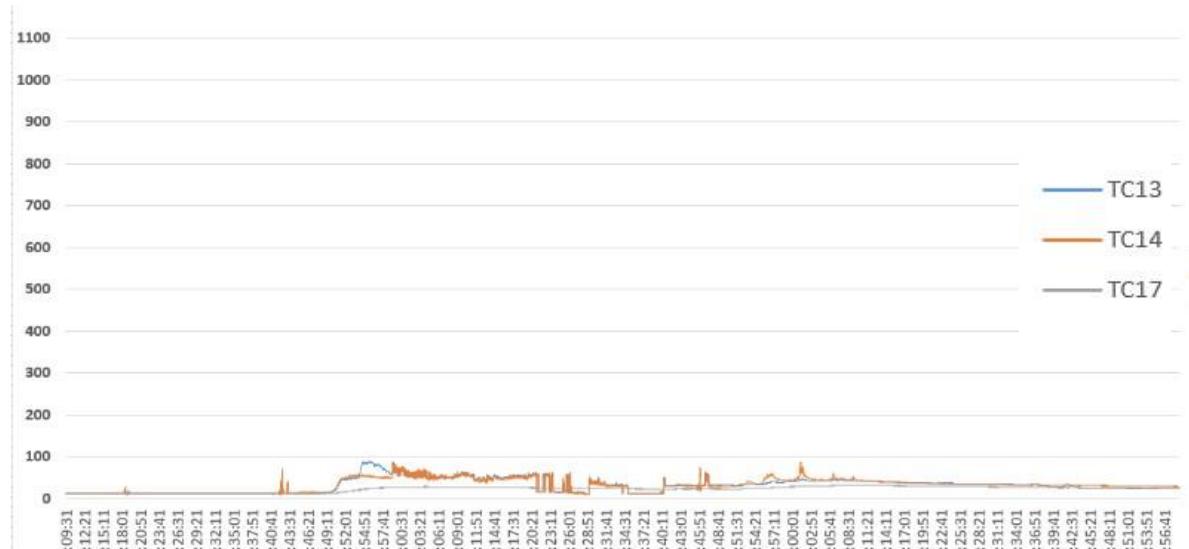


Abbildung 54: Temperaturen am Auto mit Verbrennungsmotor

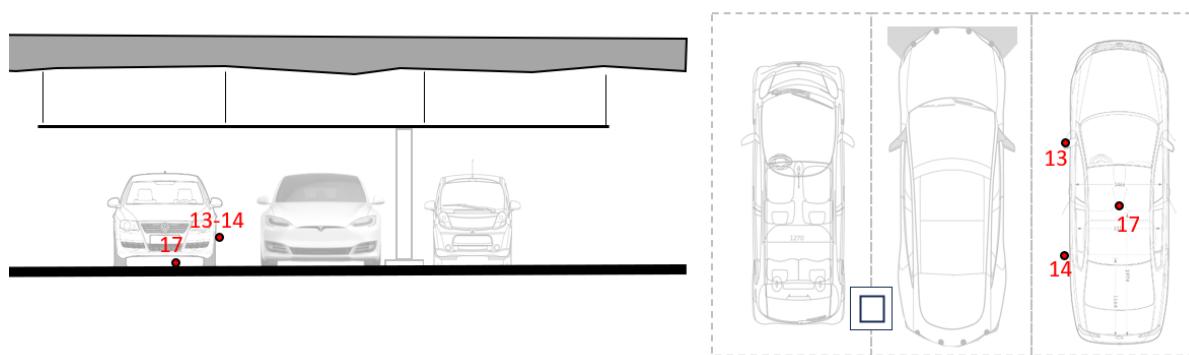


Abbildung 55: Position des Sensors

Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ablesen:

- Dank der kühlenden Wirkung des Wassernebels blieben die Temperaturen während der gesamten Dauer des Tests sehr niedrig (< 100°C)



5.3 Vergleich der Temperaturen, Test mit Sprinkler und Test mit dem System FASR-Pyrosense

Beim direkten Vergleich der im ersten und zweiten Test aufgezeichneten Temperaturen müssen insbesondere die Bedingungen berücksichtigt werden, unter denen die Tests durchgeführt wurden:

- Beim ersten Test wurde die Sprinkleranlage zweimal vorübergehend abgeschaltet, um die Auswirkungen der Sprinkleranlage auf die Brandentwicklung zu beurteilen. Während der Phase, in der die Anlage abgeschaltet war, kam es zu einem Temperaturanstieg und zu Schäden an den Fahrzeugen, die bei der Anlage in Betrieb nicht aufgetreten wären.
- Beim zweiten Versuch wurde das FASR-Pyrosense-System erst aktiviert, nachdem der Thermal Runaway bereits mehrere Zellen beschädigt hatte und die von der Batterie freigesetzte Energie zu einer Deflagration geführt hatte. Wäre das System aktiviert worden, als die Temperatur unter dem Tesla die Grenztemperatur überschritten hätte, hätte der Wassernebel den Boden des Fahrzeugs kühlen, den thermischen Durchschlag innerhalb der Batterie verlangsamen und die Produktion von brennbaren Gasen begrenzen können, so dass es wahrscheinlich nicht zu einer Deflagration gekommen wäre.

Unter diesen Voraussetzungen kann der Vergleich der Daten relevante Informationen über die Brandentwicklung und den Beitrag der beiden Löschsysteme zur Brandbekämpfung liefern.

Die Temperaturkurven werden in den folgenden Kapiteln verglichen. Um die Branddauer vergleichen zu können, wird ein Startpunkt festgelegt, der bei beiden Versuchen mit der ersten starken Deflagration übereinstimmt (Zeit 14:37 Uhr beim ersten Versuch, 16:47 Uhr beim zweiten Versuch).

5.3.1 Temperaturen in der Batterie

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich der Temperaturverläufe in der Tesla-Batterie:

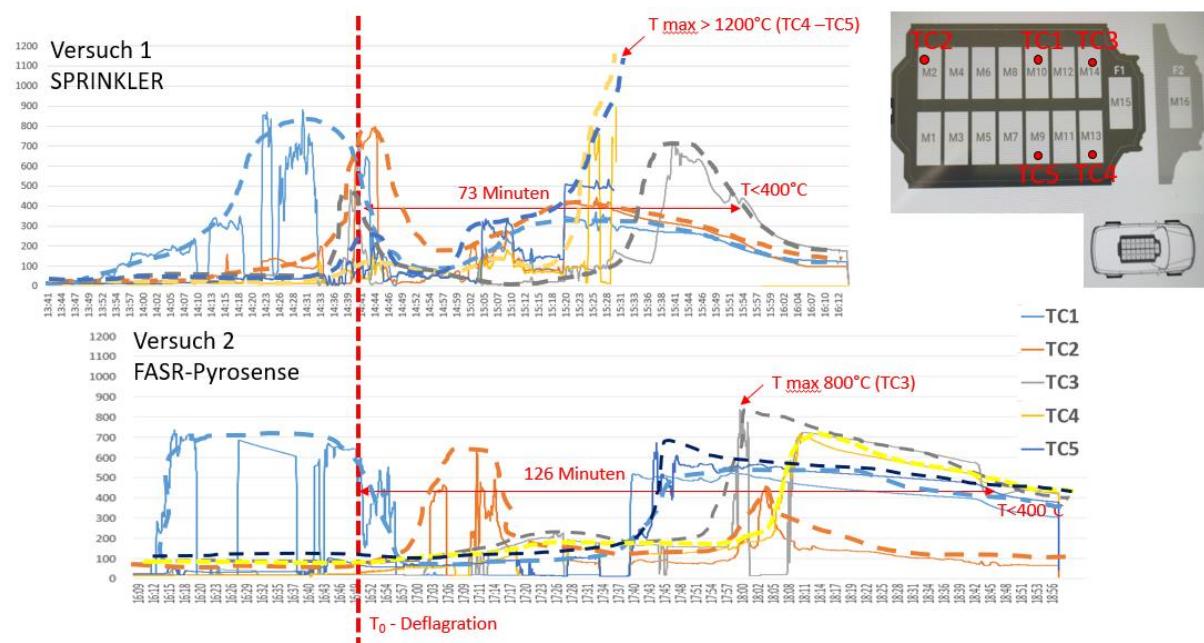


Abbildung 56: Position des Sensors

Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ablesen:



- Im ersten Versuch wurden deutlich höhere Temperaturen erreicht. Eine mögliche Erklärung ist, dass das Wasser aus den Düsen der Sprinkleranlage über die Karosserie fliesst und nicht dazu beiträgt, den unteren Teil des Fahrzeugs und die Batterie zu kühlen. Das FASR-System hingegen senkt die Temperaturen unterhalb des Fahrzeugbodens und hilft, die Temperaturen in der Batterie unter Kontrolle zu halten.
- Die Dauer des thermischen Durchgangs in der Batterie, berechnet als die Zeit zwischen der ersten Deflagration und dem Absinken der Temperatur am Ende des Tests (Temperatur unter 400°C), ist beim Test mit dem FASR - Pyrosense System deutlich länger. Dies kann als Konsequenz aus dem vorherigen Punkt gewertet werden: **Durch die Senkung der Temperaturen in den Batterien wird der Ausbreitungsprozess zwar nicht gestoppt, aber stark verlangsamt.**

5.3.2 Temperaturen über dem Auto

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich der Temperaturverläufe über dem Tesla:

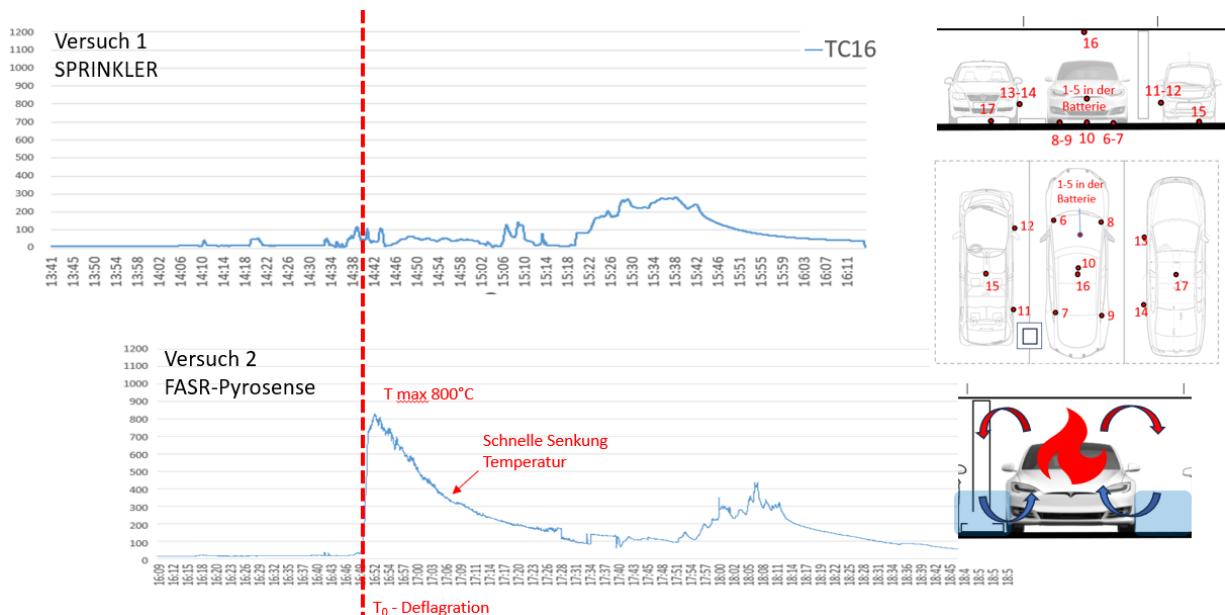


Abbildung 57: Vergleich der Temperaturen über dem Tesla

Aus der Interpretation der Grafik lassen sich die folgenden Ereignisse ablesen:

- Indem das Sprinklersystem Wasser von oben versprüht, verhindert es, dass die Deckentemperaturen ansteigen. Das FASR-Pyrosense System kühlte die Decke nicht direkt. Der Wassernebel wird jedoch von den durch das Feuer erzeugten konvektiven Luftbewegungen angesaugt und senkt indirekt die Deckentemperaturen.



5.3.3 Temperaturen unter dem Auto

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich der Temperaturverläufe unter dem Tesla:

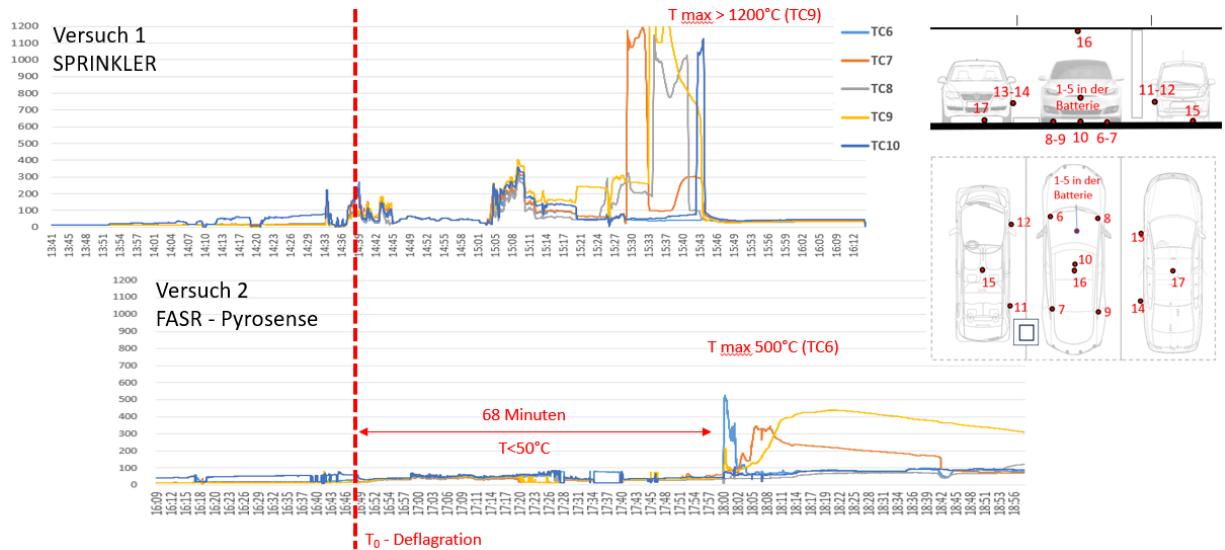


Abbildung 58: Vergleich der Temperaturen über dem Tesla

Da das FASR-System einen Wassernebel unter den Fahrzeughoden sprüht, ist das System bei der Kontrolle der Temperaturen unter dem Fahrzeug effizienter. Das Sprinklersystem senkt auch die Temperaturen geringfügig, da das überschüssige Wasser über den Boden fliesst und diesen abkühlt.

5.3.4 Temperaturen an E-Auto

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich der Temperaturverläufe, die von den Sensoren an der linken Seite und unter dem kleinen E-Auto aufgezeichnet wurden:

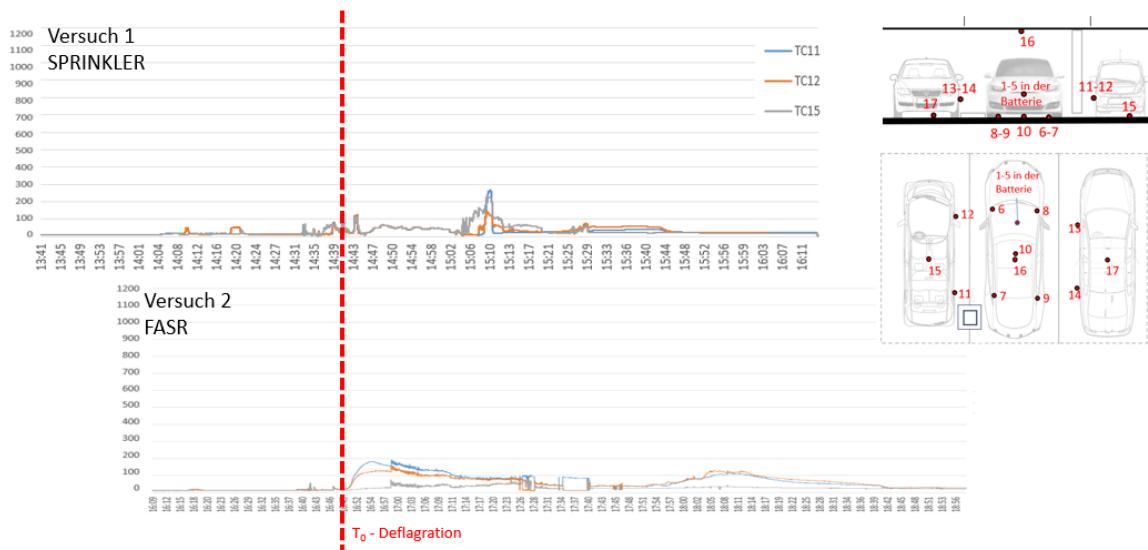


Abbildung 59: Vergleich der Temperaturen über dem Tesla

Die Temperaturen blieben sowohl beim ersten als auch beim zweiten Test sehr niedrig.



5.3.5 Temperaturen am Auto mit Verbrennungsmotor

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich der Temperaturverläufe, die von den Sensoren an der linken Seite und unter dem Auto mit Verbrennungsmotor aufgezeichnet wurden:

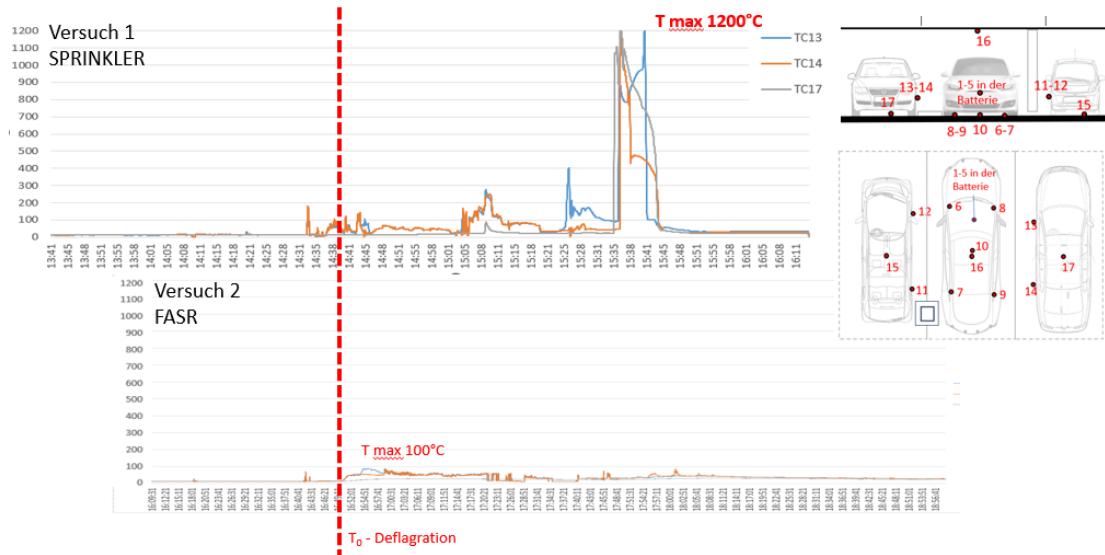


Abbildung 60: Vergleich der Temperaturen über dem Tesla

Als die Sprinkleranlage im ersten Test in Betrieb war, zeigen die beiden Diagramme ähnliche Temperaturen. Beide Brandbekämpfungsanlagen sind in der Lage, die Temperaturen auf dem angrenzenden Fahrzeug einzudämmen.

Die erste Grafik zeigt, dass die Temperaturen ohne Sprinkleranlage stark ansteigen können, so dass sich das Feuer zwischen den beiden Fahrzeugen schnell ausbreiten kann.

5.4 Deflagration nach der Erhitzung der Batterie, Ursachenermittlung

In beiden Tests kam es nach der Erhitzung der Batterie zu einer Deflagration. Diese Deflagration wurde von den Testteilnehmern deutlich wahrgenommen und durch die von den Videokameras aufgezeichneten Videos dokumentiert.

Bei früheren Forschungsprojekten wurde keine Deflagration festgestellt. Daher waren auch keine Messgeräte vorhanden, um den durch die Deflagration erzeugten Druck aufzuzeichnen.

In beiden Tests trat die Deflagration am Ende der Phase auf, in der die Überhitzung der Batterie durch steigende Temperaturen und Rauch aus den Ventilen wahrnehmbar war. Es waren jedoch in der ersten Phase keine Flammen sichtbar.

Unmittelbar nach der Deflagration im ersten Test waren im Fahrgastraum heftige Flammen zu sehen, die die Aktivierung der Sprinkleranlage auslösten.

Im zweiten Test waren nach der Deflagration Flammen zu sehen, die vom Fahrersitz ausgingen. Nach ein paar Minuten brachten diese Flammen das Polycarbonatdach zum Schmelzen.

Anhand der Daten und der aufgezeichneten Ereignisse wurde versucht, ein Modell zu entwickeln, das den Grund für die Deflagration erklärt.



Phase 1: Fehlfunktion einer Zelle

Ein Kurzschluss oder ein Stoss beschädigen eine Batteriezelle. Die Elektrolyten in der Zelle starten den chemischen Prozess, der zu einem Temperaturanstieg führt und brennbare Gase im Batteriegehäuse freisetzt.

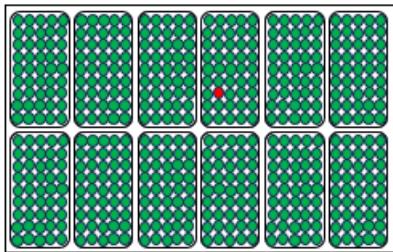


Abbildung 61: Schematische Darstellung der Batterie in Phase 1. In grün sind die intakten Zellen, in rot die vom Thermal Runaway betroffenen Zellen

Phase 2: Propagation im Modul

Die Hitze der betroffenen Zelle beschädigt die benachbarten Zellen und erzeugt eine Kettenreaktion, die brennbare Gase freisetzt. Obwohl ein Teil des Gases durch die Ventile entweicht, steigt die Gaskonzentration im Gehäuse an.

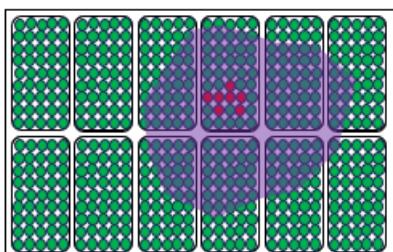


Abbildung 62: Schematische Darstellung der Batterie in Phase 2. Lila: brennbare Gase.

Phase 3: Anzündung

Die Konzentration des brennbaren Gases erreicht die untere Explosionsgrenze. In der Batterie gibt es mehrere Stellen, an denen die Temperatur sehr hoch ist und welche die Deflagration auslösen.

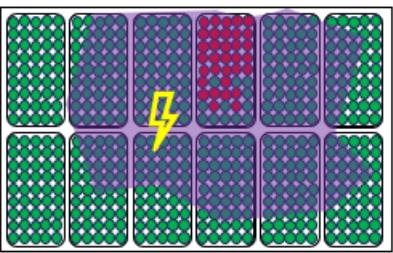


Abbildung 63: Schematische Darstellung der Batterie in Phase 3.

Phase 4: Deflagration und Temperaturerhöhung

Die Entzündung von brennbaren Gasen wird in Form von Flammen sichtbar. Diese Flammen wiederum führen zur Überhitzung anderer Zellen und Module und beschleunigen die Ausbreitung des Thermal Runaway in der Batterie.

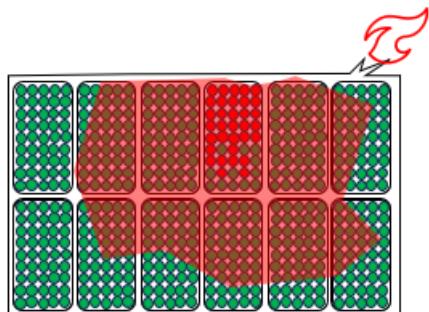


Abbildung 64: Schematische Darstellung der Batterie in Phase 3.

5.5 Brand im Fahrgastraum, Ursachenermittlung

Die Ergebnisse früherer Brandversuche mit Elektroautos zeigen, dass sich die Flammen von den Überdruckventilen unter dem Fahrzeugboden ausbreiten.

Auch bei den vorliegenden Tests wurden Flammen unterhalb des Fahrzeugs festgestellt. Die stärksten Flammen wurden jedoch direkt nach der Detonation im Fahrgastraum beobachtet.

Um dieses unerwartete Brandverhalten zu erklären, wurde das Gehäuse nach einer Öffnung durchsucht, durch die die Flammen von der Batterie in den Fahrgastraum gelangen konnten.

Im oberen Teil des Tesla Model S-Gehäuses befindet sich eine Öffnung von einigen Quadratzentimetern, die den Anschluss von Kunststoffrohren für das Batteriekühlsystem ermöglicht.



Abbildung 65: Position im Gehäuse des Anschlusses zur Kühlung der Batterie

Wahrscheinlich haben die Hitze und der durch die Deflagration erzeugte Druck die Kunststoffteile zum Schmelzen gebracht. Die freie Öffnung hat einen grösseren Querschnitt als die Überdruckventile unter dem Fahrzeug, so dass die entzündeten Gase aufgrund des geringeren Widerstands durch diese Öffnung entweichen konnten und sich in Form von Flammen im Fahrgastraum zeigten.



5.6 Fotodokumentation: Qualitativer Vergleich der Schäden

Die folgenden Fotos zeigen die Fahrzeuge nach den Brandversuchen.

Beim Vergleich von Schäden an Fahrzeugen gelten die gleichen Überlegungen wie in Kapitel 5.3 beschrieben.

5.6.1 Brandschaden am Tesla, erster Versuch mit Sprinkleranlage

Das Feuer hat das Innere des Wagens vollständig zerstört. Nur ein Teil des Blechs der Autotüren und ein Teil der hinteren Stoßstange sind noch vorhanden:



Abbildung 66: Fotos von der Front

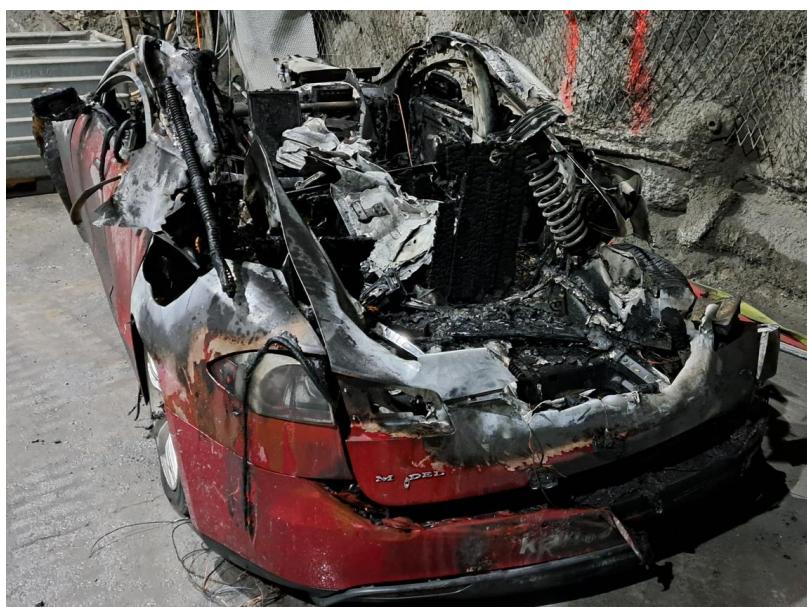


Abbildung 67: Foto von hinten



5.6.2 Brandschaden am Tesla, zweiter Versuch mit FASR-Pyrosense-System

Auch bei dem zweiten Test zerstörte das Feuer den Fahrgastraum des Tesla. Im Gegensatz zum ersten Test, bei dem die Vorderseite des Fahrzeugs durch das Feuer geschmolzen wurde, wurde beim zweiten Test die Vorderseite des Fahrzeugs (Motorhaube und vordere Stoßstange) durch das Feuer nur beschädigt.



Abbildung 68: Fotos von der Front

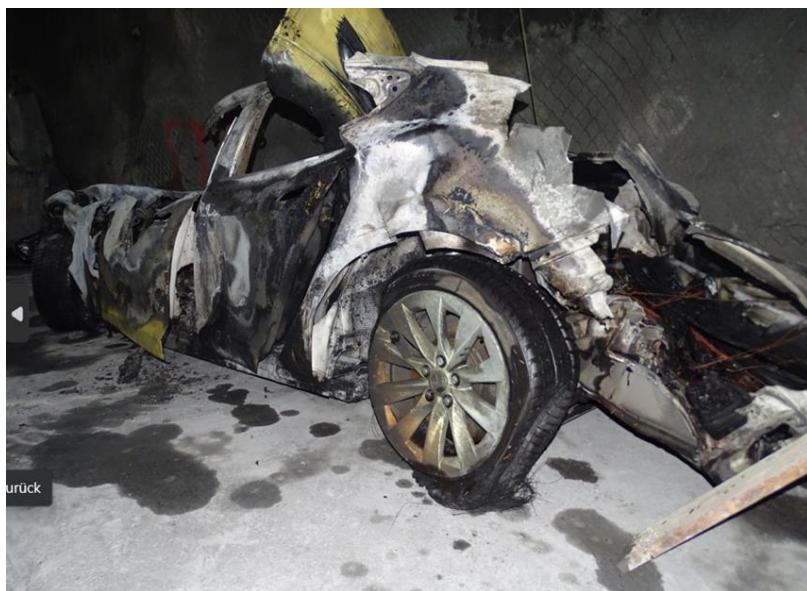


Abbildung 69: Foto von hinten

5.6.3 Brandschaden am E-Auto, erster Versuch mit Sprinkleranlage

Das Feuer verursachte oberflächliche Schäden an der linken Seite der Karosserie: Der Lack verbrannte an einigen Stellen und einige äußere Kunststoffe (wie die Außenspiegel) wurden durch die Hitze verformt. Das Fenster der hinteren Autotür ist geborsten



Die anderen Seiten des Wagens und der Innenraum blieben unversehrt. An diesen Teilen sind keine Brandschäden zu erkennen:



Abbildung 70: Rechte Seite

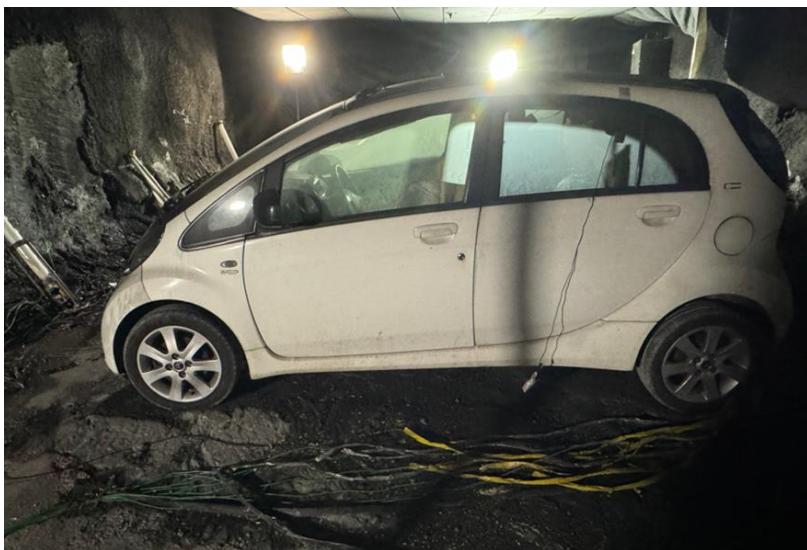


Abbildung 71: Linke Seite



Abbildung 72: Vorne



Abbildung 73: Fahrgastraum und innere Kunststoffteile



5.6.4 Brandschaden am E-Auto, zweiter Versuch mit FASR-Pyrosense-System

Auch beim zweiten Test gibt es kleinere Schäden an den Kunststoffteilen der Karosserie: die Türgriffe und der Rückspiegel sind durch das Feuer leicht verformt. Der Rest des Fahrzeugs hat keinen Schaden genommen.

Alle Autoscheiben sind unversehrt:



Abbildung 74: Rechte Seite



Abbildung 75: Linke Seite



Abbildung 76: Vorne

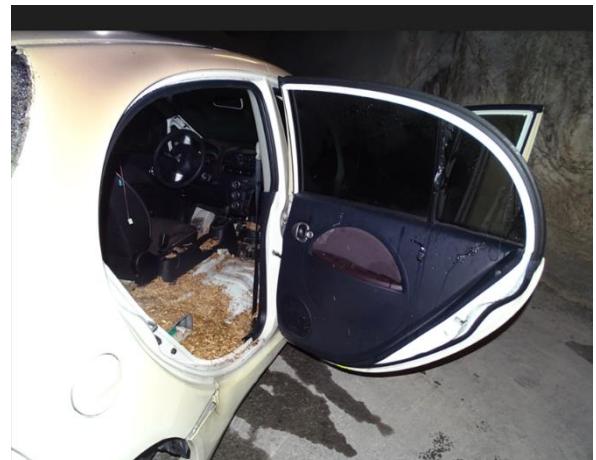
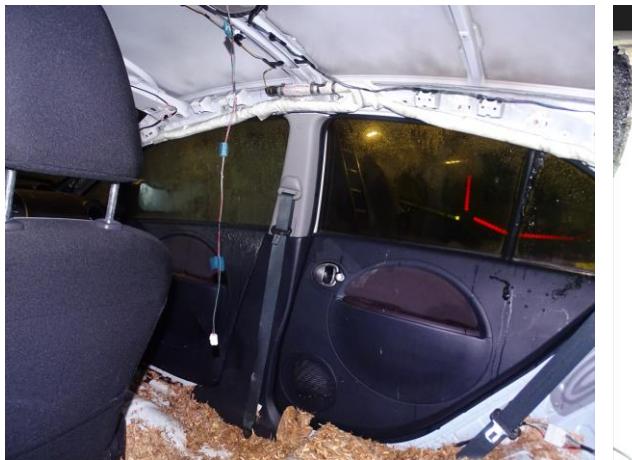


Abbildung 77: Fahrgastraum und innere Kunststoffteile



5.6.5 Brandschaden am Auto mit Verbrennungsmotor, erster Versuch mit Sprinkleranlage

Durch das Feuer wurde die Karosserie auf der linken Seite des Wagens stark beschädigt: Der Lack ist vor allem im hinteren Teil des Wagens abgebrannt und alle Fenster auf der linken Seite wurden durch das Feuer zerstört.

Höchstwahrscheinlich wurde dieser Schaden durch das Feuer verursacht, als die Sprinkleranlage nicht in Betrieb war.

Der Schaden an dem Auto mit Verbrennungsmotor auf der rechten Seite des Tesla ist größer als an dem Elektroauto auf der linken Seite. Dies lässt sich durch die Beobachtung der Luftströme im Tunnel, in dem die Tests durchgeführt wurden, erklären. Während des Tests erzeugte der Ventilator zum Rauchabzug einen leichten Luftstrom, der die Brandhitze in Richtung des Autos mit Verbrennungsmotor drückte. Dieser Luftstrom verringerte in beiden Tests den Schaden im Elektroauto und erhöhte ihn im Auto mit Verbrennungsmotor.

Die anderen Seiten des Wagens und der Innenraum blieben unversehrt. An diesen Teilen sind keine Brandschäden zu erkennen:



Abbildung 78: Linke Seite



Abbildung 79: Rechte Seite



Abbildung 80: Vorne

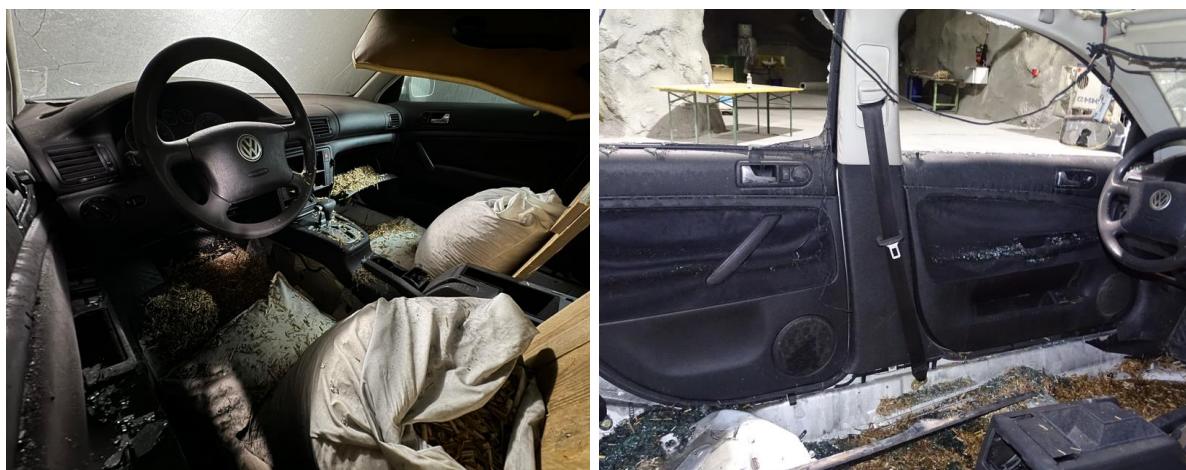


Abbildung 81: Fahrgastraum und innere Kunststoffteile

5.6.1 Brandschaden am Auto mit Verbrennungsmotor, zweiter Versuch mit FASR-Pyrosense-System

Der obere Teil der Karosserie auf der linken Seite des Wagens weist offensichtliche Brandschäden auf: der Lack ist verbrannt und die hintere Scheibe sowie die Heckscheibe sind zerstört. Im Gegensatz zum ersten Test weist der untere Teil des Wagens keine Schäden auf: Dieser Bereich war durch den Wassernebel des FASR-Systems geschützt.

Die Beobachtung der Brandschäden lässt darauf schließen, dass die Position und die Eigenschaften der seitlichen Düsen des FASR-Pyrosense-Systems geändert werden müssen, um die Seiten des Fahrzeugs besser zu schützen.

Die anderen Seiten des Wagens und der Innenraum blieben unversehrt. An diesen Teilen sind keine Brandschäden zu erkennen:



Abbildung 82: Linke Seite



Abbildung 83: Rechte Seite



Abbildung 84: Vorne

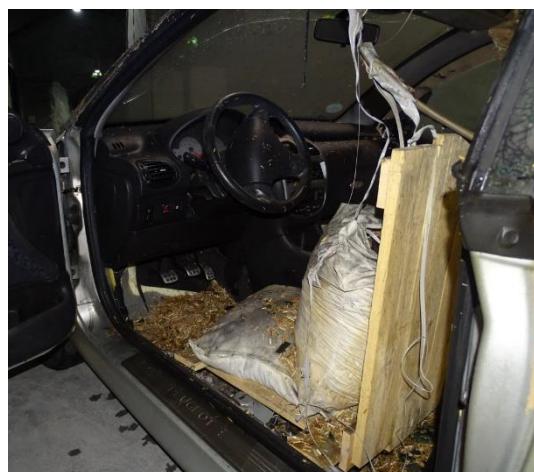


Abbildung 85: Fahrgastraum und innere Kunststoffteile



6 Schlussfolgerungen und Fazit

Durch dieses Forschungsprojekt wurden wichtige Informationen sowohl über Brände, die durch Hochleistungsbatterien in Elektrofahrzeugen verursacht werden, als auch über die Wirksamkeit von Sprinkleranlagen und vom FASR-Pyrosense-System zur Eindämmung von Bränden gewonnen.

Dieses Forschungsprojekt umfasste zwei Brandversuche nur mit demselben Elektrofahrzeugmodell. Der Thermal Runaway in Batterien ist ein komplexes physikalisches Ereignis, das von vielen Faktoren beeinflusst wird. Um statistisch gültige Schlussfolgerungen für alle Elektrofahrzeuge ziehen zu können, ist das Experiment mit einer grösseren Anzahl und verschiedenen Fahrzeugtypen zu wiederholen.

Ohne Anspruch auf statistische Vollständigkeit lassen sich aus den Brandversuchen folgende Erkenntnisse ableiten:

6.1 Erkenntnis Nr. 1: Der Thermal Runaway in der Batterie eines E-Autos kann durch die punktuelle Erhitzung eines Moduls verursacht werden.

Im ersten Brandversuche reichte es aus, die beiden Heizpatronen im Modul 8 des Tesla einzuschalten, um der Thermal Runaway in allen Zellen und Modulen der Batterie auszulösen. Wie im Kapitel 2.2 erläutert, hatten die beiden Heizpatronen die gleiche Größe wie die Batteriezellen und konnten bis zu einer Temperatur von etwa 800° überhitzt werden.

Die Batterie eines Tesla Model S enthält 7104 Zellen.

Frühere wissenschaftliche Studien (siehe beigefügte Referenzen) haben gezeigt, dass verschiedene Faktoren (Kurzschluss in der Zelle, mechanische Beschädigung infolge von Stößen oder Herstellungsfehlern) eine Überhitzung der Zellen auf über 800°C verursachen können.

Aus diesem Forschungsprojekt kann man schließen, dass der Fehlfunktion von nur zwei Zellen ein thermisches Durchgehen und die Zerstörung aller Batteriemodule verursachen kann.

6.1 Erkenntnis Nr. 2: Der Thermal Runaway in der Batterie kann eine Deflagration verursachen

Wie im Kapitel 5.4 beschrieben, kam es in beiden Tests zu einer starken Deflagration. Nach der Deflagration wurden Flammen im Fahrgastraum sichtbar und der Brand nahm exponentiell an Intensität zu.

Bei den durchgeföhrten Tests war es nicht möglich, den durch diese Deflagration erzeugten Druck zu messen.

Da der Stahlbetonpfeiler zwischen den Wagen jedoch nicht beschädigt wurde, wird es als unwahrscheinlich erachtet, dass die Deflagration eine tragende Struktur zum Einsturz bringen könnte.

Vielmehr ist eine Beschädigung von Mauerwerk oder leichten Bauteilen (Gipskartonwände, Garagenschiebetüren) wahrscheinlich, insbesondere wenn die Deflagration in kleinen geschlossenen Räumen stattfindet.

Da diese Deflagration auftritt, nachdem das Auto viel Rauch freigesetzt hat, kann davon ausgegangen werden, dass sie keine direkte Gefahr für Menschen darstellt: Nachdem der Rauch bemerkt wird, wird die Feuerwehr gerufen und ein Abstand zum Auto eingehalten.

Vielmehr stellt diese Deflagration eine Gefahr für die Feuerwehr dar, welche diese Gefahr in ihrer Einsatztaktik berücksichtigen muss.



6.1 Erkenntnis Nr. 3: Die Sprinkleranlage konnte beim Test den Brandüberschlag auf andere Fahrzeuge verhindern

Die nach Schweizer Standards ausgelegte Sprinkleranlage konnte in Tests ein Übergreifen des Feuers auf benachbarte Fahrzeuge verhindern. Obwohl die Anlage zweimal ausgeschaltet wurde, verursachte der Tesla-Brand nur oberflächliche Schäden an der Karosserie des benachbarten Fahrzeuges auf der dem Tesla zugewandten Seite.

Der Brändeindämmungseffekt war besonders sichtbar, als die Anlage für das erste Mal abgeschaltet wurde: Ohne Sprinkler entzündete die Hitze aus dem Tesla-Brand die Lackierung des Nachbarfahrzeugs. Nachdem die Sprinkleranlage wieder in Betrieb genommen wurde, waren die Flammen an der Karosserie gelöscht.

Im Test verursachten die Deflagration und die starke Hitze die fast sofortige Auslösung der Sprinkleranlage. Hätte der Thermal Runaway nicht den Brand im Fahrgastraum verursacht, sondern lediglich Flammen aus den Überdruckventilen unter dem Auto freigesetzt, wäre die Sprinkleranlage wahrscheinlich später ausgelöst worden. Aufgrund der gemessenen Temperaturen und der bei diesen Tests gesammelten Erkenntnissen geht man jedoch davon aus, dass auch eine verzögerte Aktivierung der Sprinkleranlage die Ausbreitung des Feuers zwischen den Fahrzeugen verhindern kann.

6.1 Erkenntnis Nr. 4: Das FASR-Pyrosense-System konnte beim Test den Brandüberschlag auf andere Fahrzeuge verhindern und den Thermal Runaway verlangsamen

Obwohl das FASR-Pyrosense-System viel später als geplant aktiviert wurde, konnte es ein Übergreifen des Feuers auf benachbarte Fahrzeuge verhindern: Der Tesla-Brand verursachte nur oberflächliche Schäden an der Karosserie des benachbarten Fahrzeuges auf der dem Tesla zugewandten Seite.

Die Auswertung der Temperaturen hat gezeigt, dass der Wassernebel die Temperaturen unter dem Fahrzeugboden senkt und die Temperaturen in der Batterie mildert: Durch das Verdampfen des Wassernebels entzieht das System dem Thermal Runaway Energie, so dass der Thermal Runaway kontrollierter abläuft und weniger Schaden anrichtet. Dieser mildernde Effekt ist vor allem auf den Fotos des Tesla nach dem zweiten Test zu sehen: Die Front des Fahrzeugs wurde weit weniger beschädigt als beim ersten Test.

Eine Änderung der Position und Ausrichtung der seitlichen Düsen kann den Schutz benachbarter Fahrzeuge im Falle eines Brandes im Fahrgastraum verbessern.

6.2 Erkenntnis Nr. 5: Bei den Tests haben die beiden Brandbekämpfungsanlagen (Sprinkler und FASR-Pyrosense) die Brandtemperaturen so weit gesenkt, dass ein Einsturz der Tragstruktur nicht möglich war

Dank der beiden Löschsysteme liegen die bei den Tests gemessenen Temperaturen unter den Referenztemperaturen für die Planung von Tragstrukturen.

Die durchgeführten Simulationen der Tragstruktur unter den Brandeinwirkungen zeigen, dass ein Einsturz der Tragstruktur ausgeschlossen werden kann.

Weitere Informationen sind dem beiliegenden Bericht der Firma XDEEA zu entnehmen.



7 Ausblick und zukünftige Umsetzung

7.1 Weitentwicklung des Systems FASR-Pyrosense

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die Wirksamkeit des FASR-Pyrosense-Systems bei der Bekämpfung von Bränden in Elektrofahrzeugen nachgewiesen.

Die technischen Aspekte des Systems werden weiterentwickelt, um die erste kommerzielle Version nach dem eventuellen Genehmigungsverfahren durch die Brandschutzbehörden auf den Markt zu bringen.

7.2 Weiterer Forschungsbedarf

Die Tests im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden mit zwei Tesla Model S durchgeführt.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, wurde dieses Fahrzeug aus zwei Gründen für die Tests ausgewählt: hohe Batteriekapazität und Verbreitung auf Schweizer Straßen: Es wurde davon ausgegangen, dass ein Tesla-Brand häufiger auftreten könnte als bei anderen Fahrzeugen, da dieses Fahrzeug auf Schweizer Straßen weit verbreitet ist. Zudem wurde angenommen, dass Brände bei Tesla-Fahrzeugen aufgrund der grossen in den Batterien gespeicherten Energie kritischer sind als bei anderen Fahrzeugen.

Weitere Forschungsprojekte könnten mit anderen Fahrzeugtypen durchgeführt werden, um herauszufinden, wie sich die Kapazität und die technischen Eigenschaften der Batterie sowie die Konstruktion des Gehäuses auf die gemessenen Temperaturen und auf die Brandbekämpfungssysteme auswirken.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Untersuchung des Verhaltens von tragenden Strukturen im Falle eines Brandes eines Elektroautos ohne Löschsystem.

Weitere Tests könnten unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt werden. Ziel ist zu prüfen, ob der Brand eines E-Autos ohne Löschanlage den Einsturz einer Stahl-Beton-Tragstruktur verursachen kann.

8 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes werden veröffentlicht. Insbesondere wird der Kontakt zu Feuerwehrorganisationen auf nationaler und internationaler Ebene gesucht, um diese auf die Gefahren von Bränden in Elektrofahrzeugen zu sensibilisieren.



9 Literaturverzeichnis

- [1]: Amandine Lecocq, Marie Bertana, Benjamin Truchot, Guy Marlair (2014): Comparison of the Fire Consequences of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle.
<https://ineris.hal.science/ineris-00973680>
- [2] Sungwook Kang, Minjae Kwon, Joung Yoon Choi, Sengkwan Choi (2022): Full-scale fire testing of battery electric vehicles
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120497>
- [3] Bundesamt für Strassen (2020), Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen
- [4] Marcel Held, Martin Tuchschnid, Markus Zennegg, Renato Figi, Claudia Schreiner, Lars Derek Mellert, Urs Welte, Michael Kompatscher, Michael Hermann, Lea Nache, (2022) Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122003793?via%3Dihub>



10 Anhang

- 10.1 Bericht der Firma XDEEA, Untersuchungen an Tragwerk und numerischen Brandsimulationen, Stand Mai 2024
- 10.2 Bilder des ersten Versuchs – Sprinkleranlage
- 10.3 Bilder des zweiten Versuchs – FASR-Pyrosense-System