

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

26/02/2026

Projekttitle: SafeION

Projektnummer: 896708

Energieforschungsprogramm - 8. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	8. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/11/2022
Projektende	30/11/2025
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	37 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Virtual Vehicle Research GmbH
AnsprechpartnerIn	Dr. Bernasch Jost
Postadresse	Inffeldgasse 21A
Telefon	0316 8739001
Fax	
E-Mail	office@v2c2.at
Website	www.virtual-vehicle.at

Improved Safety for Na-Ion and Li-Ion Applications

Autoren:

Gabriel Ferdigg

Fabian Benezeder

Reinhard Klambauer

Daniel Anguís Bautista

Florian Kogler

Michael Donnelly

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
2.1	Aufgabenstellung	5
2.2	Schwerpunkte des Projektes	5
2.3	Einordnung in das Programm	6
2.4	Verwendete Methoden	6
3	Inhaltliche Darstellung	7
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	8
4.1	Untersuchungen im Fehlverhalten	8
4.2	Thermosensitive Polymere	12
4.3	Validierung thermosensitiver Polymere	14
4.4	Glasfaser basierte Sensortechnologie	16
4.5	CFD Modul Simulation	19
5	Ausblick und Empfehlungen	25
6	Abbildungsverzeichnis	26
7	Kontaktdaten	27

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Das Projekt SafelION widmet sich einer der zentralen Herausforderungen der Energiewende: der Schaffung sicherer und nachhaltiger stationärer Energiespeicher (ESS). Im Kern geht es darum, die Ressourceneffizienz zu steigern und gleichzeitig das Sicherheitsrisiko junger Batterietechnologien durch innovative Früherkennungssysteme zu minimieren.

Die Aufgabenstellung gliedert sich dabei in mehrere technologische Ebenen. Zunächst steht die Untersuchung der Batterien selbst im Fokus. Hierbei wird analysiert, wie Li-Ionen-Auffahrbatterien aus dem Automobilbereich in einer Zweitnutzung (2nd-life) sicher in stationären Speichern weiterbetrieben werden können. Parallel dazu werden alternative Na-Ionen-Batterien erforscht, die auf regional verfügbaren Rohstoffen basieren und somit die Abhängigkeit von kritischen Importen verringern. Vor allem für den zweiten Batterietypen führt das Projekt eine umfassende Sicherheitscharakterisierung durch.

Ein wesentlicher technischer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung eines neuartigen Früherkennungssystems für Fehler. Dieses basiert auf der Kombination von Materialwissenschaft und Sensorik: speziell entwickelte funktionelle Polymere sollen bei einer Übertemperatur ein Tracergas freisetzen und gleichzeitig ihre Farbe ändern. Um dieses Gas sowie austretende Elektrolytdämpfe sofort zu detektieren, werden verteilte, lichtfaserbasierte Gassensoren entwickelt.

Um das Verhalten dieser Gase innerhalb eines Speichers besser zu verstehen, wird ein CFD-Simulationsframework (Computational Fluid Dynamics) erstellt, welches die Ausbreitung des Tracergases berechnet. All diese Erkenntnisse fließen in die Ausarbeitung angepasster Sicherheitskonzepte ein. Ziel ist es, Fehlerketten frühzeitig zu unterbrechen, betroffene Bereiche lokal zu isolieren und so die Akkumulation brennbarer oder gesundheitsgefährdender Gase zu verhindern. Den praktischen Abschluss der Projektarbeit bildet der Bau eines Demonstrators, der die Funktionsfähigkeit dieses Systems unter Beweis stellen und damit die Unsicherheit potenzieller Nutzer:innen gegenüber dieser neuen Technologie abbauen soll.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Ein zentraler Schwerpunkt liegt in der grundlegenden Sicherheitscharakterisierung von Batteriezellen, für die bislang kaum verlässliche Daten vorliegen. Das Projekt widmet sich hierbei intensiv den ressourcenschonenden Natrium-Ionen-Batterien (NaB). In umfassenden Missbrauchstests wird dabei detailliert untersucht, wie sich diese Zellen im Fehlerfall verhalten, wobei ein besonderes Augenmerk auf die genaue Analyse der Ausgastemperaturen sowie der freigesetzten Gasmengen und deren Zusammensetzung gelegt wird.

Darauf aufbauend bildet die Entwicklung eines innovativen, mehrstufigen Früherkennungssystems einen weiteren technologischen Kernbereich. SafelION erforscht hierfür maßgeschneiderte thermosensitive Polymerbeschichtungen, die bei kritischen Temperaturen zwischen 80°C und 100°C spezifische

Tracergase freisetzen und gleichzeitig ihre Farbe ändern. Um diese Gase sowie austretende Elektrolytdämpfe in der rauen Umgebung eines Batteriespeichers zuverlässig zu detektieren, fokussiert sich das Projekt auf die Entwicklung robuster, glasfaserbasierter Sensortechnologien sowie den Einsatz spektraler Farbsensoren, welche die Schwächen herkömmlicher Gassensoren umgehen.

Damit dieses Warnsystem effektiv funktioniert, bildet die präzise Strömungssimulation einen weiteren entscheidenden Projektschwerpunkt. Mithilfe von CFD-Modellen wird die dynamische Ausbreitung der Gase innerhalb des Speichergehäuses simuliert. Da für viele der verwendeten Substanzen die nötigen physikalischen Parameter fehlen, ermittelt SafelON die entsprechenden Diffusionskoeffizienten eigens experimentell. Die Ergebnisse dieser Simulationen dienen direkt dazu, die optimale Anzahl und Position der Sensoren im System zu bestimmen.

Zusammengeführt werden all diese technologischen und analytischen Erkenntnisse im finalen Schwerpunkt: der Ausarbeitung ganzheitlicher Sicherheitskonzepte auf Basis systematischer Risikoanalysen (FMEA). Für beide Speichertechnologien – die neuartigen Na-Ionen-Systeme und die 2nd-life Li-Ionen-Container – werden Strategien entwickelt, um das Gefahrenlevel drastisch zu senken, Fehlerketten durch rechtzeitiges Eingreifen zu unterbrechen und gefährliche Gasansammlungen zu vermeiden. Die theoretischen Konzepte und entwickelten Sensoren werden abschließend in realen Demonstratoren validiert, um eine sichere, wirtschaftliche und ressourcenschonende Nutzung der Batterien zu gewährleisten.

2.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt SafelON ordnet sich passgenau in die Kernziele der 8. Ausschreibung des Energieforschungsprogramms ein, da es hochinnovative Materialforschung direkt mit der zwingend notwendigen Weiterentwicklung nachhaltiger, ESS verknüpft. Im Zentrum steht die anwendungsorientierte Entwicklung maßgeschneiderter, thermosensitiver Polymerbeschichtungen sowie robuster, glasfaserbasierter Sensorik, die gemeinsam ein zuverlässiges Früherkennungssystem für kritische Batteriefehler bilden. Durch die Anwendung dieser materialwissenschaftlichen Innovationen auf ressourcenschonende, europäisch verfügbare NaB sowie auf die wirtschaftliche Zweitnutzung gealterter Lithium-Ionen-Fahrzeuggelatter (2nd-life) bedient das Projekt exakt den strategischen Förderschwerpunkt der elektrochemischen Speicherung und Kreislaufwirtschaft. Letztlich leistet SafelON einen essenziellen Beitrag zur europäischen Technologie- und Rohstoffunabhängigkeit, indem es durch fundierte Sicherheitskonzepte und präventives Gasmanagement die Marktakzeptanz für CO₂-neutrale, netzstabilisierende Speichertechnologien signifikant erhöht und somit den Weg in eine klimaneutrale Zukunft absichert.

2.4 Verwendete Methoden

Zunächst werden frische Na-Ionen-Zellen im Batterielabor (BATTCAVE) umfassenden Missbrauchstests unterzogen, um sicherheitsrelevante Parameter wie Ausgastemperaturen und Gaszusammensetzungen beim thermischen Durchgehen (TR) exakt zu charakterisieren. Parallel dazu erfolgt die materialwissenschaftliche Entwicklung thermosensitiver, funktioneller Polymere unter Nutzung

spezifischer Reaktionsmechanismen (z. B. Thiol-Isocyanat-Klickchemie oder Retro-Diels-Alder-Reaktionen) zur gezielten Freisetzung von Tracergasen. Um die Ausbreitung dieser Gase im Speichergehäuse vorherzusagen, werden Mehrkomponenten-CFD-Simulationen in OpenFOAM unter Einbindung von Low-Reynolds-Turbulenzmodellen durchgeführt; dafür werden fehlende Diffusionskoeffizienten zuvor eigens experimentell ermittelt. Zur Detektion der Gase wird neben spektralen Farbsensoren an innovativen faseroptischen Sensormethoden (z. B. Hohlkernfasern, photoakustische Ansätze) geforscht. Abschließend fließen alle generierten Daten in eine systematische Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) ein, auf deren Basis mehrstufige Sicherheitskonzepte ausgearbeitet und die entwickelten Früherkennungssysteme schrittweise – vom verkleinerten Labormaßstab bis hin zum realen ESS-Demonstrator – validiert werden.

3 Inhaltliche Darstellung

Das Projekt SafeION adressiert die wachsende Bedeutung und die gleichzeitig bestehenden Sicherheitsrisiken stationärer ESS, die für das Gelingen der Energiewende und eine CO₂-neutrale Gesellschaft unverzichtbar sind. Da die Herstellung etablierter Lithium-Ionen-Batterien stark von knappen Importrohstoffen abhängig ist, rücken ressourcenschonende Alternativen wie NAB sowie die Zweitnutzung (2nd-life) gealterter Autobatterien in den Fokus. Weil für diese beiden Technologien bislang jedoch kaum verlässliche Sicherheitsdaten vorliegen, bildet die systematische Untersuchung ihres Verhaltens im Fehlerfall – insbesondere beim TR und der damit verbundenen Gasfreisetzung – die inhaltliche Basis des Projekts. Ziel ist es, die exakten Ausgastemperaturen, die Gasmengen und die Zusammensetzung der freigesetzten Gase im speziell entwickelten Batterielabor detailliert zu charakterisieren.

Auf diesen Erkenntnissen aufbauend, entwickelt SafeION ein hochinnovatives Früherkennungssystem, das Batteriefehler detektiert, lange bevor es zu kritischen Bränden oder Gasexplosionen kommen kann. Der technologische Kern dieses Systems besteht aus maßgeschneiderten, thermosensitiven Polymeren. Diese funktionalen Materialien reagieren bei lokalen Übertemperaturen zwischen 80 °C und 100 °C, indem sie gezielt ein spezifisches Tracergas freisetzen und zusätzlich durch thermochrome Eigenschaften ihre Farbe ändern. Um dieses Gas sowie austretende Elektrolytdämpfe im anspruchsvollen Umfeld eines Batteriespeichers zuverlässig zu erfassen, wird parallel an robuster, glasfaserbasierter Sensorik sowie an spektralen Farbsensoren geforscht. Diese sollen herkömmlichen Gassensoren in puncto Langlebigkeit und Resistenz gegenüber elektromagnetischen Störungen deutlich überlegen sein.

Um dieses sensorische Netzwerk optimal im Speichergehäuse auslegen zu können, bedient sich das Projekt aufwendiger Strömungssimulationen. Mittels CFD-Modellierung wird die dynamische Ausbreitung der Tracergase und Elektrolytdämpfe berechnet, wofür zuvor fehlende physikalische Parameter wie Diffusionskoeffizienten eigens experimentell ermittelt werden. Alle gesammelten experimentellen und simulativen Daten fließen abschließend in eine umfassende Risikoanalyse ein. Daraus werden maßgeschneiderte Sicherheits- und Gasmanagementkonzepte für Na-Ionen- und 2nd-life-Speicher abgeleitet. Diese Konzepte zielen darauf ab, Fehlerketten durch rechtzeitiges Eingreifen zu unterbrechen, das allgemeine Gefahrenlevel deutlich zu senken und die Akzeptanz bei Nutzer:innen und Behörden zu steigern. Validiert wird das gesamte Zusammenspiel aus Fehlerprovokation,

Tracerfreisetzung und Sensordetektion abschließend vom Labormaßstab bis hin zu einem Demonstratormodul.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Untersuchungen im Fehlverhalten

Der nachfolgende Abschnitt fasst die Ergebnisse der experimentellen Missbrauchstests zusammen, bei denen verschiedene Na-Ionen-Zellen in einem speziellen Druckreaktor gezielt in einen TR versetzt wurden. Durch extreme Belastungsszenarien wie Nagelpenetration, Überhitzung, Überladung und externe Kurzschlüsse wurde systematisch untersucht, wie diese Zellen unter Worst-Case-Bedingungen reagieren. Im Fokus der Untersuchungen standen dabei insbesondere die Temperaturentwicklung, die Menge und Zusammensetzung der freigesetzten Ventgase, die strukturelle Integrität der Zellgehäuse sowie die Gefahr einer Fehlerfortpflanzung (Propagation) auf benachbarte Zellen. Die gewonnenen Daten beleuchten das Verhalten der Na-Ionen-Zellen mit NVPF- und LFPP-Chemie und ordnen deren Sicherheitsprofil im direkten Vergleich zu herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien ein.

Die Tests wurden in einem luftdichten Edelstahl-Druckreaktor unter Stickstoffatmosphäre durchgeführt. Dabei sind die Zellen mit einer Kraft von 2000 N eingespannt, thermisch isoliert und mit Temperaturfühlern versehen. Um einen TR zu provozieren, wurden an der NVPF-Zellchemie vier verschiedene Auslöser verwendet: Nagelpenetration, homogene Überhitzung, Überladung und ein externer Kurzschluss. In den meisten Fällen führte der TR zum Öffnen der Berstscheibe und einem moderaten Massenverlust von rund 22 % bis 26 %. Die heftigste Reaktion zeigte sich bei der Überladung: Hier blähte sich die Zelle stark auf, barst bei über 7,6 V und verlor knapp 72 % ihrer Masse. Dennoch verliefen die Reaktionen im Vergleich zu Li-Ion-Zellen insgesamt milder ab. Die Spitzentemperaturen der austretenden Gase bewegten sich in einem vergleichsweise niedrigen Rahmen, von 94 °C beim Kurzschluss bis maximal 265 °C bei der Überhitzung. Das freigesetzte Gasgemisch bestand dabei hauptsächlich aus CO₂, Wasserstoff (H₂) und dem Elektrolytdampf DMC, teils ergänzt durch Kohlenmonoxid (CO) und Ethylen (C₂H₄).



Abbildung 1: Na-Ionen Zelle nach dem Überladungsversuch. Die Zelle ist im Bereich der Berstscheibe weiter ausgebrochen.

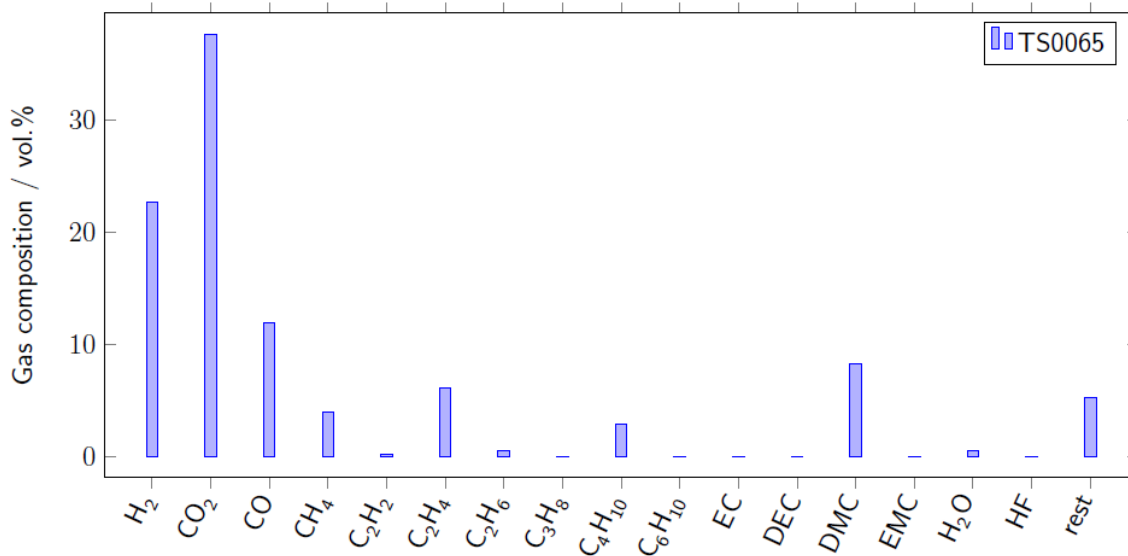


Abbildung 2: Vent Gas Zusammensetzung des Überladungsversuches nach dem TR.

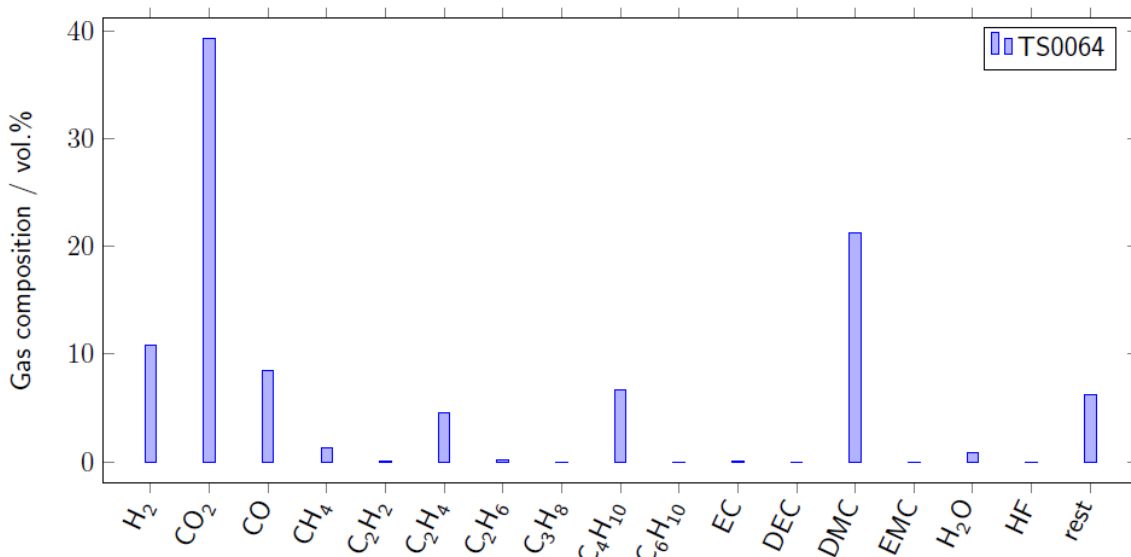


Abbildung 3: Vent Gas Zusammensetzung des Übertemperaturversuches nach dem TR.

Ein weiterer essenzieller Versuch widmete sich der thermischen Propagation, also der Frage, ob sich ein Fehler auf benachbarte Zellen überträgt. Hierfür wurden drei Zellen in Reihe geschaltet und thermisch abisoliert, wie es bei Modulaufbauten üblich ist. Obwohl die erste Zelle durch Erhitzen in einen TR gezwungen wurde, fand keine Kettenreaktion statt. Der Fehler griff nicht auf die Nachbarzellen über. Zwar öffnete sich die Berstscheibe der zweiten Zelle, sie ging jedoch nicht in den TR, und der gesamte Zellstrang ließ sich im Anschluss noch über die Hauptkontakte entladen.

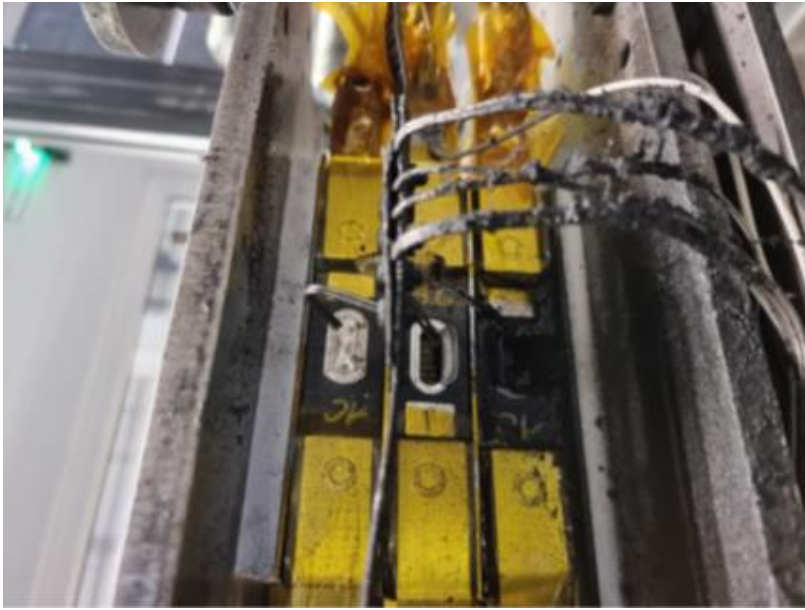


Abbildung 4: Blick auf drei aneinander gereihten Zellen des Propagationsversuches nach der Durchführung. Die Berstscheibe der rechten (Triggerzelle) und mittleren Zelle sind geöffnet.

In weiteren Experimenten wurde das Verhalten beim TR von der LFPP-Zellchemie untersucht. Dafür wurden diese ebenso vollständig auf 100 % geladenen Zellen in einem luftdichten Druckreaktor platziert und sowohl einem Nagelpenetrations- als auch einem Überladungstest unterzogen.

Beim Nagelpenetrationsstest kam es zunächst zum Ausgasen der Zelle und folglich zu einem TR. Trotz dieser Reaktion blieb die Zellstruktur insgesamt intakt; lediglich die Berstscheibe öffnete sich infolge des inneren Überdrucks. Durch das entweichende Gas und einen leichten Partikelaustritt verlor die Zelle rund 20 % ihrer Ursprungsmasse. Bemerkenswert war hierbei die hohe Gehäusetemperatur von bis zu 405 °C, während das austretende Ventgas mit maximal 32 °C sehr kühl blieb. Das freigesetzte Gasgemisch bestand vorwiegend aus CO₂ und H₂, ergänzt durch Elektrolytdämpfe und geringe Mengen an CO.

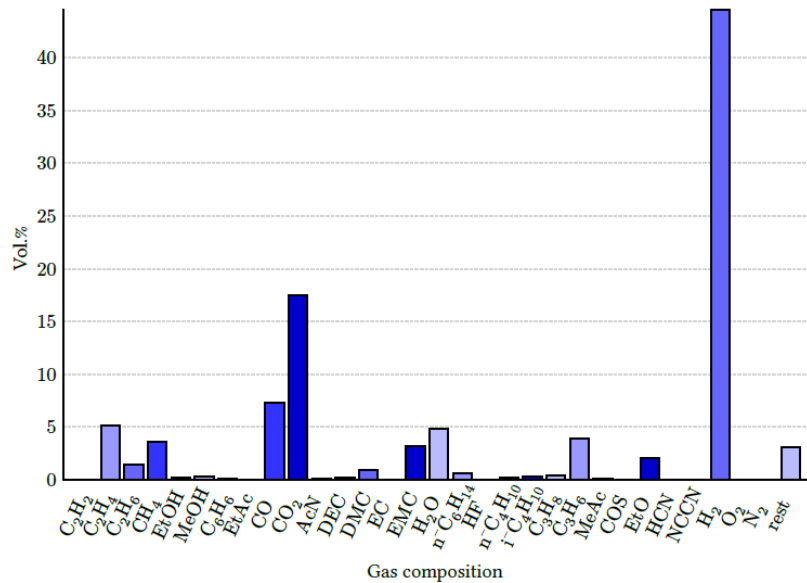
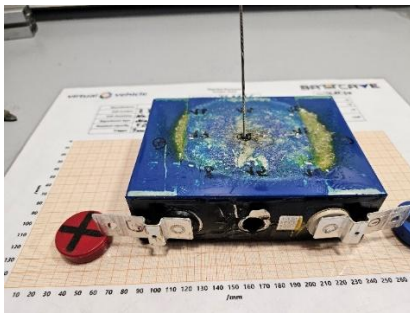


Abbildung 5: Die LFPP-Zelle nach dem TR-Versuch mit noch eingesetztem Nagel des Versuches (links). Die Vent Gas Zusammensetzung des Versuches nach dem TR (rechts).

Der Überladungstest lieferte ein strukturell sehr ähnliches Bild: Auch hier führte der TR lediglich zum Öffnen der Berstscheibe, während das Gehäuse ansonsten unbeschädigt blieb. Der Massenverlust lag in diesem Szenario bei etwa 22 %. Die Temperaturentwicklung verhielt sich jedoch etwas anders als beim Nageltest: Das Zellgehäuse erhitze sich auf bis zu 303 °C, das austretende Gas erreichte hingegen maximal 65 °C. Bei der Gaszusammensetzung dominierten in diesem Fehlerfall H₂, CO₂ sowie CO.

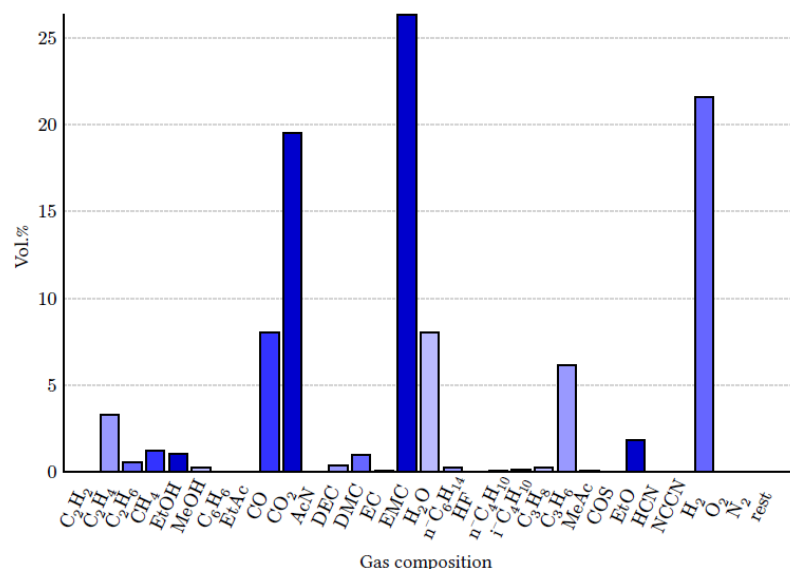


Abbildung 6: Ansicht von oben der LFPP-Zelle nach dem TR-Versuch (links). Die Vent Gas Zusammensetzung des Versuches nach dem TR (rechts).

Zusammenfassend lässt sich aus den Experimenten ableiten, dass Na-Ion Zellen im Fehlerfall ein deutlich milderes und weniger zerstörerisches Verhalten zeigen als Li-Ion-Zellen. Während bei Li-Ion-Zellen im TR oft das Gehäuse zerstört wird, extrem heiße Gase von über 1000 °C austreten

(hauptsächlich CO, CO₂ und H₂) und eine hohe Gefahr der Fehlerfortpflanzung besteht, bleiben die Gehäuse der Na-Ion Zellen meist intakt. Zudem erreichen ihre Ventgase lediglich Temperaturen von bis zu 270 °C, und eine thermische Propagation auf Nachbarzellen ist sehr unwahrscheinlich.

4.2 Thermosensitive Polymere

Als thermosensitive Polymere wurde eine Matrix mit gebundenem Thiophen entwickelt. Die als besonders geeignet identifizierte Formulierung SYS B wurde durch kontrollierte und automatisierte Verfahren verfeinert, wobei die Synthese in zwei wesentlichen Schritten erfolgte: Zunächst wurde ein Thiophen Precursor hergestellt und anschließend mit weiteren Komponenten zu einer UV härtbaren Matrix verarbeitet, während die thiophenfreie Variante SYS 0 als Referenzmaterial diente.

Die am besten geeignete Polymerformulierung zur Thiophen Freisetzung wurde durch systematische Studien und automatisierte Herstellungsverfahren auf ein neues Qualitätsniveau angehoben. Ein wesentlicher Bestandteil war die Validierung der Langzeitstabilität. Mithilfe umfassender Alterungsstudien wurde untersucht, wie sich verschiedene thermische Belastungen über längere Zeiträume auf die Gasfreisetzungsfunktion auswirken. Parallel dazu wurde das sensorische Spektrum durch die Entwicklung von Polymeren erweitert, die auf Temperaturreize mit reversiblen oder irreversiblen Farbänderungen reagieren.

Im Rahmen der Alterungstests wurden verschiedene Proben der Typen SYS B und SYS 0 über einen Zeitraum von einem Monat bei Raumtemperatur sowie bei 40 °C und 50 °C gelagert und täglich gewogen. Während die gealterten SYS 0-Proben bei keiner der gewählten Temperaturen eine signifikante Degradation aufwiesen, zeigten die bei Raumtemperatur gelagerten SYS B-Proben ein ähnlich stabiles Verhalten ohne messbaren Gewichtsverlust. Im Gegensatz dazu verzeichneten die SYS B Proben bei 40 °C in den ersten zwei Tagen einen Gewichtsverlust von etwa 2 %, der anschließend in ein Plateau überging, während die Proben bei 50 °C ein ungünstigeres Alterungsverhalten zeigten und fast 4 % ihres Gewichts verloren, bevor sie ebenfalls ein stabiles Plateau erreichten.

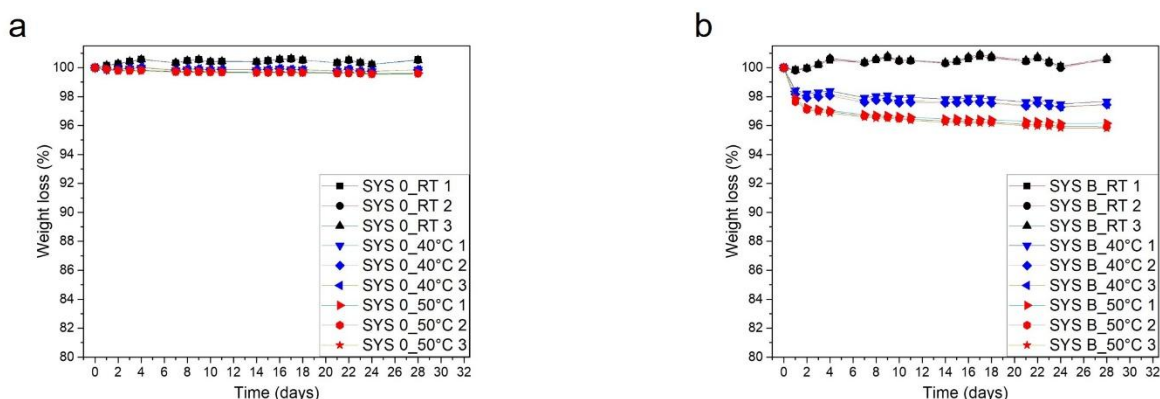


Abbildung 7: Alterung von SYS 0 (a) und SYS B (b) bei verschiedenen Temperaturen

Um festzustellen, ob die gealterten Proben ihre Gasfreisetzungsfunktion zur Erkennung kritischer Temperaturereignisse beibehalten hatten, wurde eine thermogravimetrische Analyse (TGA) durchgeführt. Bei den SYS 0-Proben ergaben sich dabei keine temperaturbedingten Abweichungen; sie

wiesen eine thermische Stabilität bis zu 200 °C auf, ab der der Abbau der Matrix einsetzte. Die bei Raumtemperatur gelagerten SYS B-Proben zeigten ein vergleichbares Profil, verfügten jedoch über einen zusätzlichen ersten Abbauschritt im Bereich von etwa 90 bis 100 °C, welcher der gezielten Thiophen Freisetzung zugeordnet werden kann, während der Matrixabbau auch hier erst oberhalb von 200 °C einsetzte.

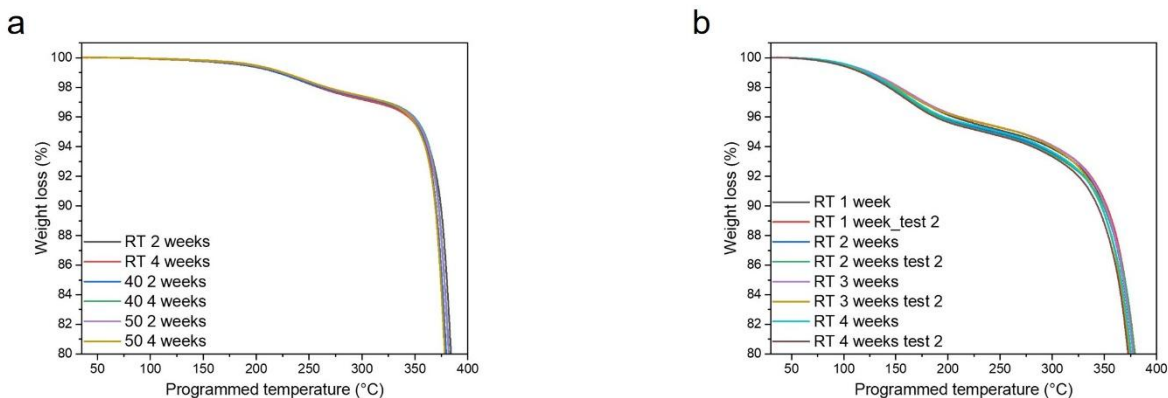


Abbildung 8: TGA-Kurven von SYS 0 bei verschiedenen Temperaturen und Zeiten (a) und TGA-Kurven von SYS B bei Raumtemperatur zu verschiedenen Zeiten (b)

Auch bei den unter erhöhten Temperaturen (40 °C und 50 °C) gelagerten SYS B Proben blieben die zwei charakteristischen Abbauschritte – die Tracergas Freisetzung ab ca. 100 °C sowie die Matrixdegradation ab 200 °C – grundsätzlich erkennbar. Zwar war der erste Gewichtsverlustschritt bei diesen über vier Wochen gelagerten Proben deutlich reduziert, was vermutlich auf eine langsame Freisetzung kleiner Mengen Tracergas bereits während der Lagerung zurückzuführen ist, dennoch konnte die Funktionalität der Freisetzung bei beiden Temperaturen weiterhin nachgewiesen werden.

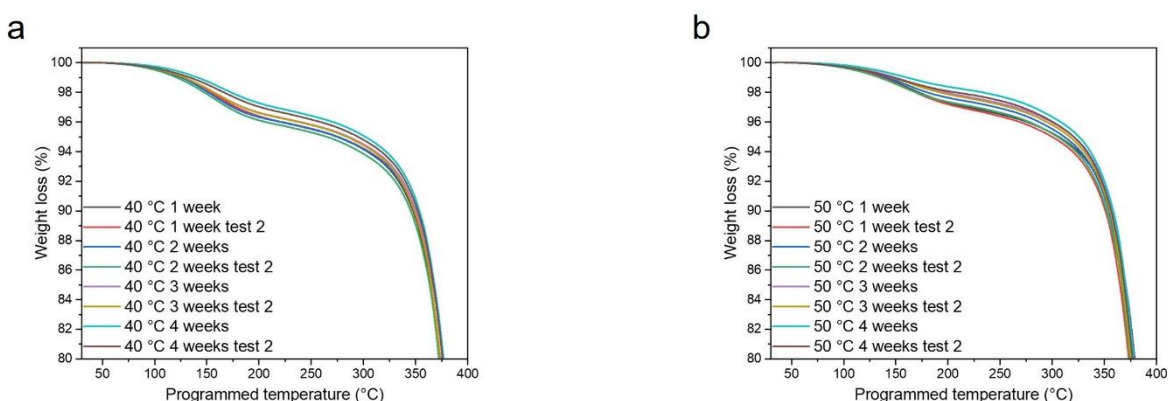


Abbildung 9: TGA-Kurven von SYS B, gealtert bei 40 °C (a) und 50 °C (b)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Funktionalität des Polymers auch nach thermischer Belastung erhalten bleibt, zumal im realen Betrieb von Batteriespeichern kaum mit einer dauerhaften Belastung von 50 °C über einen derart langen Zeitraum zu rechnen ist.

Ein weiteres Projektergebnis ist das entwickelte thermochrome Polymer. Dieses Material zeichnet sich dadurch aus, dass es bei der Überschreitung einer spezifischen Schwellentemperatur seine Farbe ändert und somit thermische Belastungen optisch signalisiert.

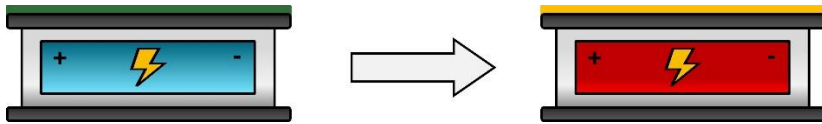


Abbildung 10: Darstellung der Funktionalität der Farbrezeptur. Bei einer Temperaturänderung von Raumtemperatur (blau) zu einer höheren Temperatur (rot) verändert sich die Farbe der Probe oben von grün zu gelb.

Zur Überwachung kritischer Temperaturen wurden zwei verschiedene Epoxidharz Formulierungen auf Basis eines Zwei-Komponenten-Systems entwickelt, die beide durch deutliche Farbumschläge überzeugen. Die erste Formulierung nutzt den pH-Indikator Thymolblau, um eine dauerhafte Überhitzung anzuzeigen: Durch einen thermischen Nachhärtungseffekt sinkt der pH-Wert in der mechanisch steifen Matrix, was zu einem permanenten Farbumschlag von Grün nach Gelb führt und somit als „Gedächtnis“ für thermische Ereignisse dient.

Die zweite Formulierung erweitert dieses Konzept durch die Zugabe einer thermolatenten Base, wodurch der Farbumschlag reversibel wird. Bei Hitzeeinwirkung setzt das Material eine Base frei, die den pH-Wert wieder anhebt und das System nach dem Abkühlen in den grünen Ursprungszustand zurückversetzt. Dieser dynamische Prozess lässt sich unter kontrollierten Bedingungen bis zu dreimal wiederholen, was eine wiederverwendbare Anzeige des aktuellen Temperaturzustands ermöglicht.



Abbildung 11: Beobachtete Farbveränderung in Formulierung 2 (zweimal von grün zu gelb)

4.3 Validierung thermosensitiver Polymere

Die zuvor genannte Formulierung SYS_B gilt als besonders vielversprechendes Kernelement des Frühwarnsystems, das in diesem Projekt entwickelt wurde. Bei diesem Material ist ein spezielles Molekül, das sogenannte Thiophen, an in die Kunststoffoberfläche gebunden. Um zu überprüfen, ob dieses System im Ernstfall zuverlässig funktioniert, wurde ein Testaufbau entwickelt, der wie ein empfindlicher „Brandmelder“ für Hitze funktioniert. In einem kleinen Edelstahlgehäuse werden die Materialproben kontrolliert erhitzt, während ein Luftstrom freigesetzte Gase direkt zu empfindlichen Metalloxid Sensoren leitet.

Energieforschungsprogramm - 8. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

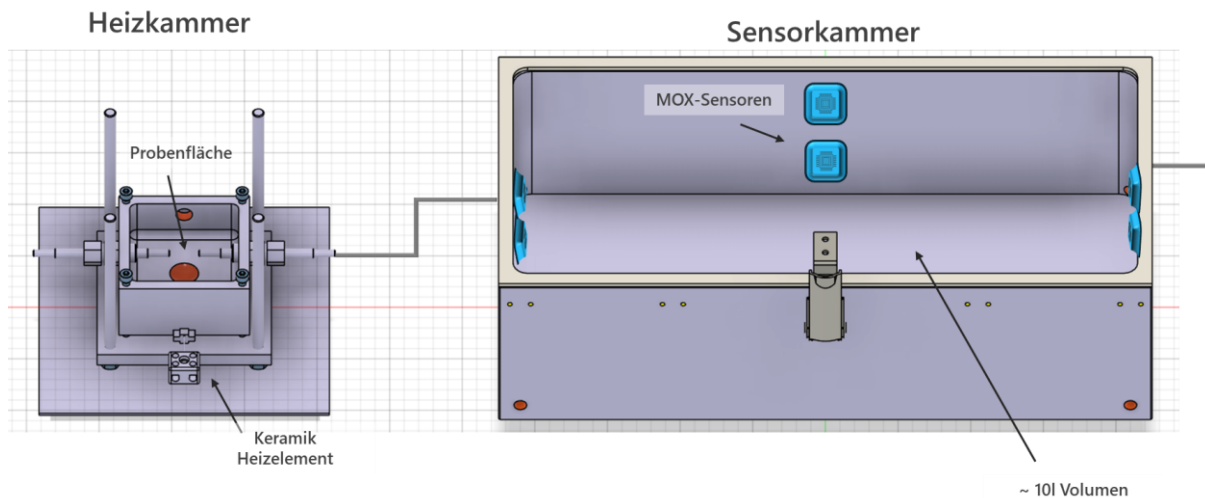


Abbildung 12: Testaufbau zur Validierung der Proben. Links eine Heizkammer, in der die Probe kontrolliert erhitzt werden kann und rechts eine Sensorkammer zur Detektion von Thiophen. Der Transport erfolgt über einen geringen Luftstrom.

Die ersten Ergebnisse waren äußerst positiv. Das System schlug bei Temperaturen zwischen 97 °C und 100 °C zuverlässig an, was dem im Projekt angestrebten Bereich entspricht, um Überhitzungen an Zellen frühzeitig zu erkennen. Da ein solches Warnsystem aber über Jahre hinweg stabil bleiben muss, wurde das Material einem Härtetest unterzogen. Die Proben wurden über einen Zeitraum von bis zu vier Wochen bei unterschiedlichen Temperaturen – von Raumtemperatur bis hin zu 50 °C – in Thermoschränken gelagert, um einen gewöhnlichen und einen rapiden Alterungsprozess zu simulieren.

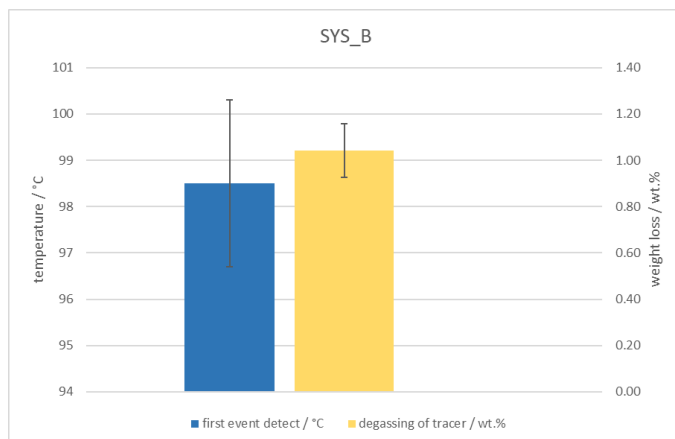


Abbildung 13: Durchschnittliche Ausgastemperatur und Menge an freiwerdendem Thiophen der Probe SYS_B.

Dabei zeigte sich, dass die Zeit und die Wärme einen messbaren Einfluss auf das Material haben. Bei Proben, die bei Raumtemperatur gelagert wurden, blieb die Warschwelle in den ersten zwei Wochen stabil bei etwa 104 °C, verschob sich danach jedoch leicht auf 111 °C. Wurde das Material dauerhafter Hitze von 40 °C oder 50 °C ausgesetzt, verschob sich der Alarmzeitpunkt weiter nach hinten und lag schließlich zwischen 120 °C und 129 °C. Zudem nahm die Intensität des Warnsignals mit der Zeit etwas ab, da durch die künstliche Alterung bereits kleine Mengen des Gases vorab entwichen.

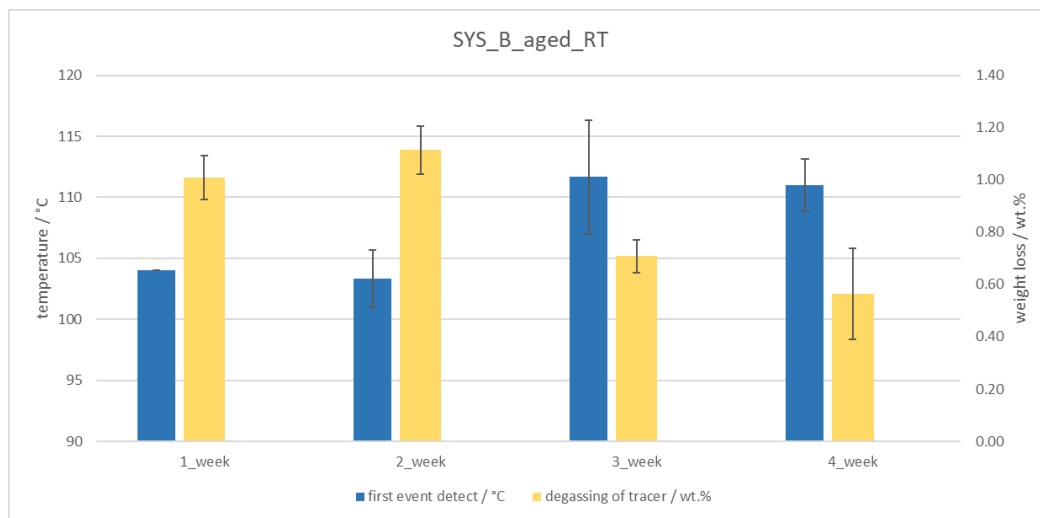


Abbildung 14: Durchschnittliche Ausgastemperaturen und Mengen an freiwerdendem Thiophen der Proben bei einer Alterung bei Raumtemperatur.

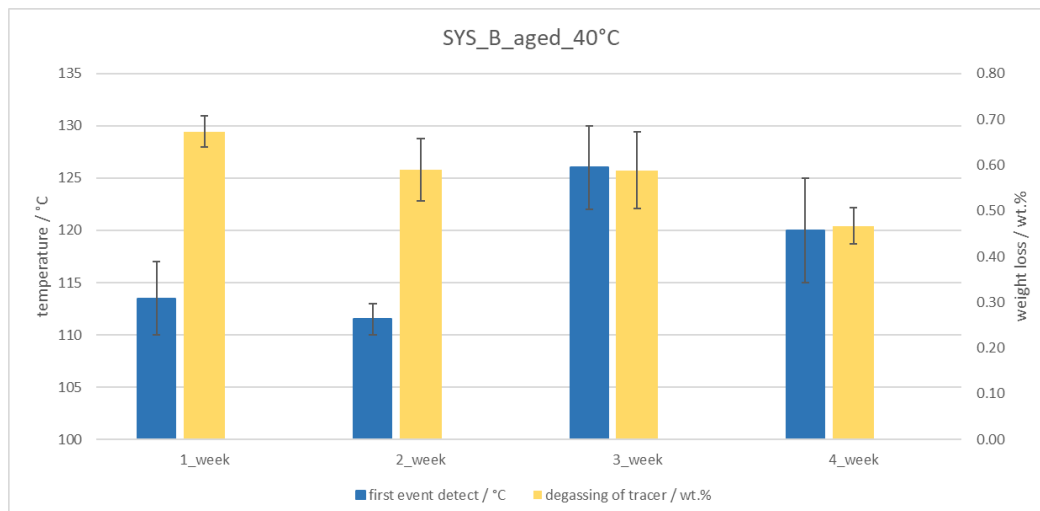


Abbildung 15: Durchschnittliche Ausgastemperaturen und Mengen an freiwerdendem Thiophen der Proben bei einer Alterung von 40 °C.

Trotz dieser altersbedingten Verschiebungen bleibt das Fazit für die praktische Anwendung sehr positiv. Das System behält seine grundlegende Schutzfunktion bei. Da Batterien im normalen Betrieb üblicherweise nicht über Wochen hinweg einer konstanten Hitze von 50 °C ausgesetzt sind, erweist sich das funktionale Polymer als praxistaugliches und mittelfristig verlässliches System, das gefährliche Temperaturanstiege sicher meldet.

4.4 Glasfaser basierte Sensortechnologie

Die im Projekt untersuchten Konzepte wurden weitestgehend überprüft und bewertet. Es konnte bereits früh gezeigt werden, dass Thiophen eine starke Absorption im UV-Wellenlängenbereich aufweist. Diese Literaturwerte wurden im Labor mithilfe echter Thiophenproben und eines kommerziellen Spektrometers (Ocean Optics, Flames) erfolgreich verifiziert. Da Thiophen besonders im Bereich von 230 nm stark absorbiert, wurde es als Zielmolekül für die Anregung in der UV-Spektroskopie (Konzept 1) ausgewählt.

Als finale Lösung wurde schließlich das Konzept 1a festgelegt, weshalb sich die Entwicklungsarbeit primär auf diesen Ansatz konzentrierte.

Um eine möglichst präzise und empfindliche Messung des Thiophens zu gewährleisten, wurde ein interferometrisches Detektionsverfahren gewählt. Die photothermische Interferometrie basiert auf der wellenlängenabhängigen Absorption von Analyten. Bestrahlt man den Analyten mit Licht in einem Wellenlängenbereich, in dem er maximal absorbiert, werden die Moleküle angeregt. Bei der anschließenden Relaxation geben sie Wärme ab, was zu einer lokalen Temperaturänderung führt. Diese Temperaturänderung bewirkt wiederum eine Änderung des Brechungsindex, die direkt proportional zur Konzentration des Analyten ist. Die Änderung des Brechungsindex kann schließlich mit einem Interferometer – in diesem Fall einem Fabry-Pérot-Etalon – gemessen werden. Der Prozess wird in der folgenden Skizze veranschaulicht.

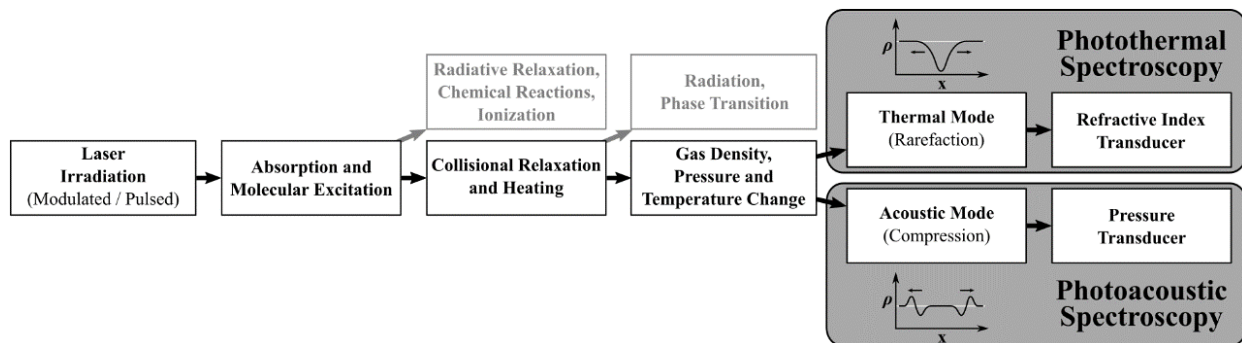


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Signalerzeugung in der photothermischen Interferometrie

Für die praktische Umsetzung der Messungen wurde ein kompakter, selbstentwickelter PTI-Sensorkopf konstruiert, der speziell auf die Detektion von Thiophen zugeschnitten ist. Anstelle eines klassischen Lasers kommt in diesem Aufbau eine LED zum Einsatz. Da deren Licht physikalisch bedingt breiter streut, wird ein spezieller Parabolspiegel genutzt, um die Strahlen präzise im Messbereich – der Fabry-Pérot-Kavität – zu bündeln.

Um möglichst kontrollierte Testbedingungen zu schaffen, wurde der gesamte Aufbau verkleinert und in ein spezielles, luftdichtes Gehäuse integriert. Dieses Gehäuse dient dazu, das Tracergas gezielt freizusetzen oder das System für Referenzmessungen zu spülen.

Energieforschungsprogramm - 8. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

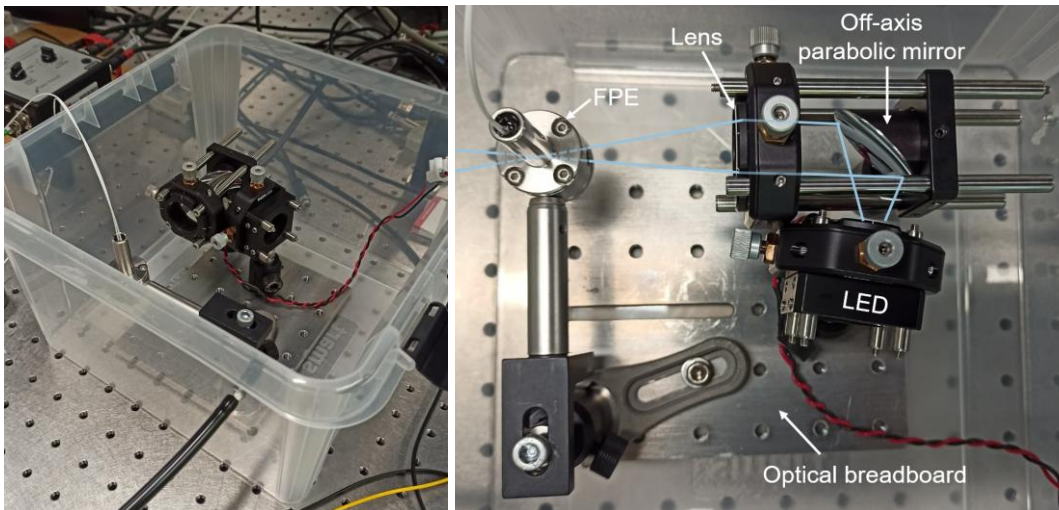


Abbildung 17: Komplettes Testsetup mit der Möglichkeit, es luftdicht zu verschließen.

Die durchgeführten Testreihen lieferten den entscheidenden Funktionsnachweis. Das System ist in der Lage, die Anwesenheit von Thiophen zuverlässig nachzuweisen. Dass die Messergebnisse dabei gewisse Schwankungen zeigten, lässt sich auf die physikalischen Eigenschaften des Gases zurückführen. Thiophen ist schwerer als Luft, was innerhalb des Testgehäuses zu einer ungleichmäßigen Vermischung führt. Dennoch bestätigt das Experiment, dass der Sensorkopf bereit für den Einsatz als hochempfindlicher Gasetektor ist.

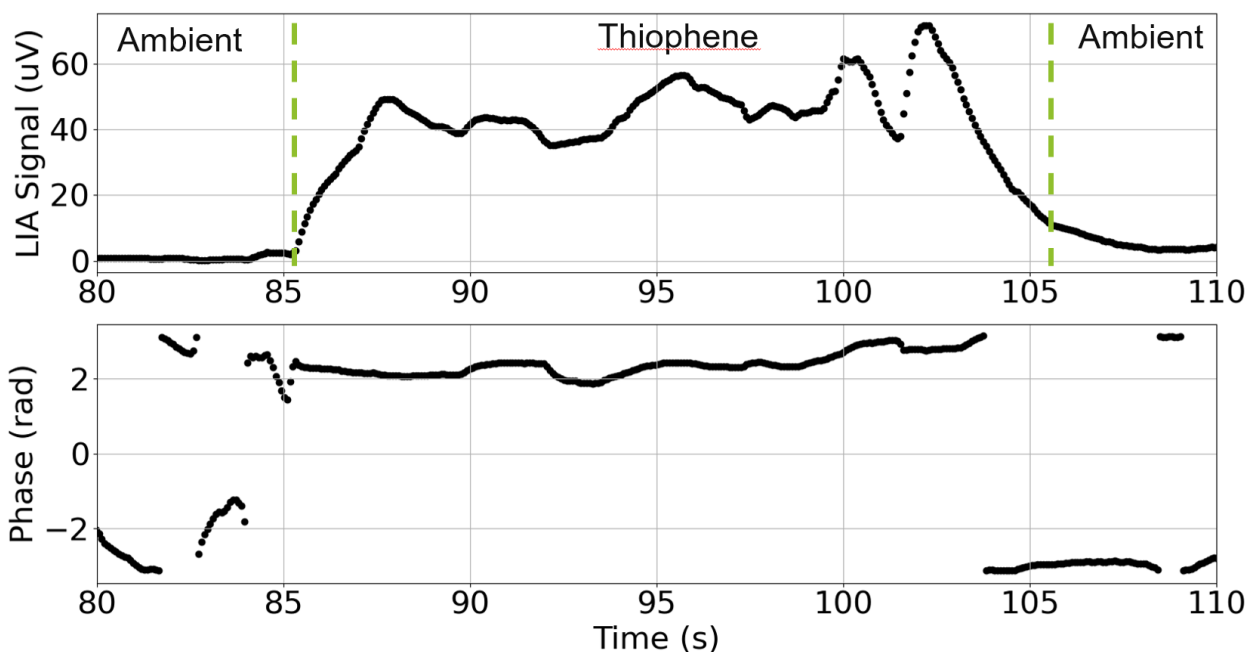


Abbildung 18: Messung mit einer Thiophenfreisetzung. Das Lock-in-Signal ist im oberen Diagramm dargestellt. Die jeweilige Phase ist im unteren Diagramm dargestellt.

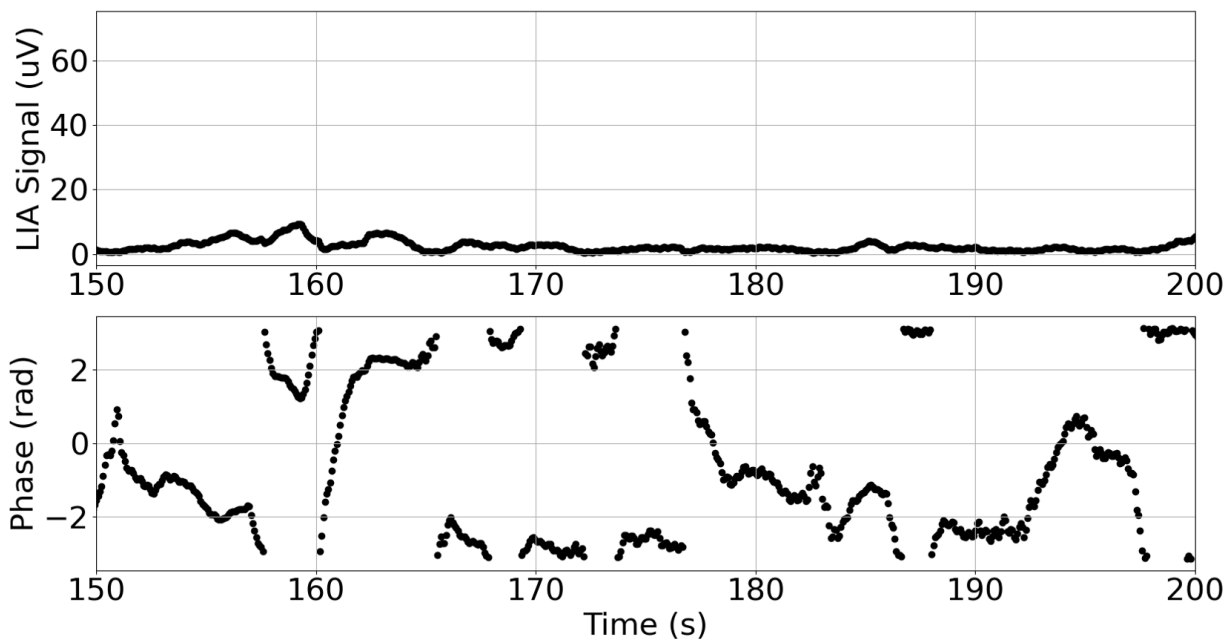


Abbildung 19: Hintergrundmessung ohne Thiophen. Das Lock-in-Signal ist im oberen Diagramm dargestellt. Die jeweilige Phase ist im unteren Diagramm dargestellt.

4.5 CFD Modul Simulation

Die CFD-Simulationen dienen dazu, die komplexe Dynamik der Gasausbreitung unter realitätsnahen Bedingungen sichtbar und berechenbar zu machen. Da das Ziel des Projekts darin besteht, Fehlerketten bereits im Entstehen zu unterbrechen, muss sichergestellt werden, dass freigesetzte Tracergase und Elektrolytdämpfe die Sensoren schnell und in ausreichender Konzentration erreichen. Das Simulationsframework ermöglicht es, verschiedene Szenarien digital zu erproben, die Ausbreitungswege innerhalb der Speichermodule exakt vorherzusagen und darauf basierend die optimale Platzierung der Sensoren zu bestimmen.

In enger Abstimmung mit den Projektpartnern wurden zunächst die spezifischen Szenarien für die Gasausbreitung innerhalb eines Moduls des ESS sowie die entsprechenden Randbedingungen präzise definiert. Ein wesentlicher erster Schritt war dabei die detaillierte geometrische Aufbereitung des Luftvolumens im Modulinneren, um eine exakte Simulationsgrundlage zu schaffen.

Für die erste Tracergas Simulation wurde ein realistisches Betriebsszenario mit einem Luftvolumenstrom von 19 m³/h und einer Umgebungstemperatur von 23 °C gewählt. Als zweite Variante wurde der Luftvolumenstrom auf 9,2m³/h abgesenkt. Dies entspricht der niedrigstmöglichen Lüfterdrehzahl. Alle anderen Randbedingungen wurden gleich zu Variante eins beibehalten.

Im Modell wurde simuliert, wie das Tracergas Thiophen direkt an der Grenzfläche der ersten Batteriezelle zur Umgebungsluft verdampft. Da die experimentelle Bestimmung der exakten Verdampfungsrate aus dem im Demonstrator verwendeten Polymer einen extrem hohen zeitlichen und apparativen Aufwand bedeutet hätte, wurde für diese Berechnungen die Verdampfungsrate von

flüssigem Thiophen als fundierte Annahme herangezogen. Um die Detektionsfähigkeit im System zu prüfen, wurde ein virtueller Sensor strategisch am Luftauslass, unmittelbar vor dem Lüfter, positioniert.

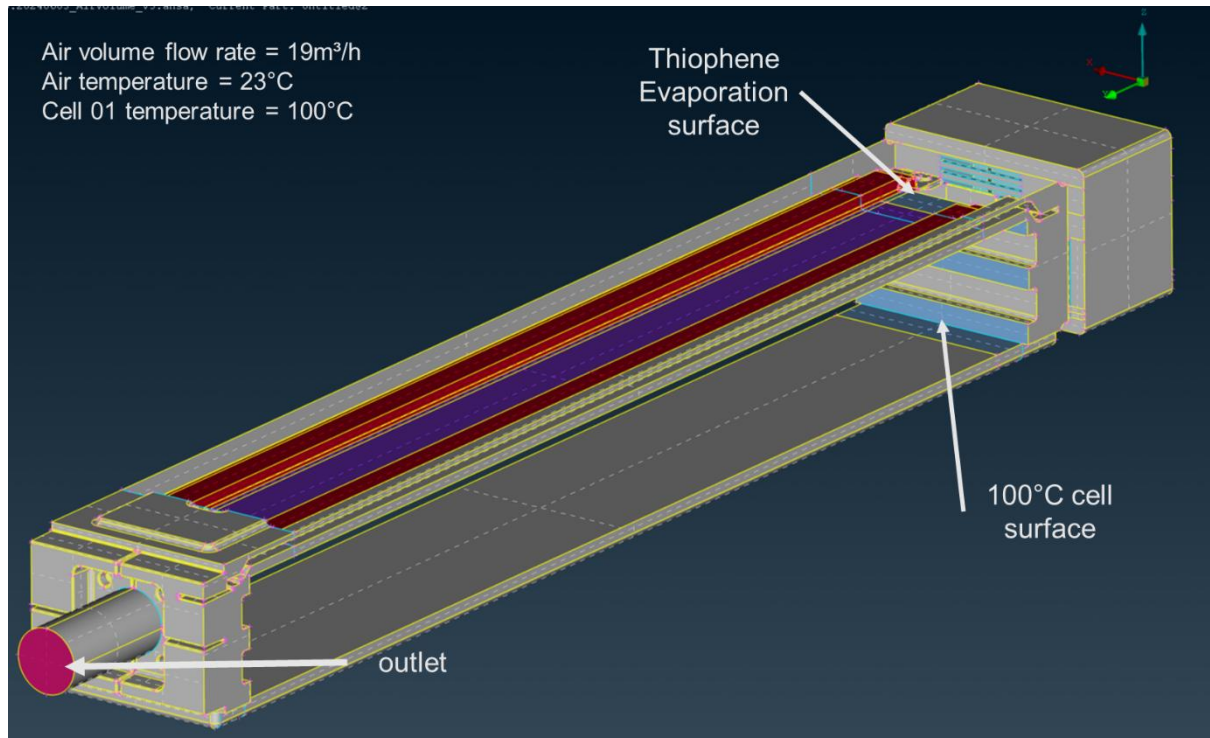


Abbildung 20: Simulationsgeometrie der Thiophen-Verdampfung im vereinfachten Modul.

Die Simulationsergebnisse unterstrichen die hohe Reaktivität des Systems. Nach dem Start der Thiophen Verdampfung bei Sekunde 3 der Simulationszeit dauerte es lediglich eine Sekunde, bis der virtuelle Sensor bei Sekunde 4 bereits eine signifikante Konzentration von rund 48.000 ppm registrierte. Auf Basis dieser Auswertungen wurden bereits die Randbedingungen für weitere Variationsrechnungen festgelegt, um das System unter verschiedenen Last- und Fehlerzuständen noch umfassender zu untersuchen.

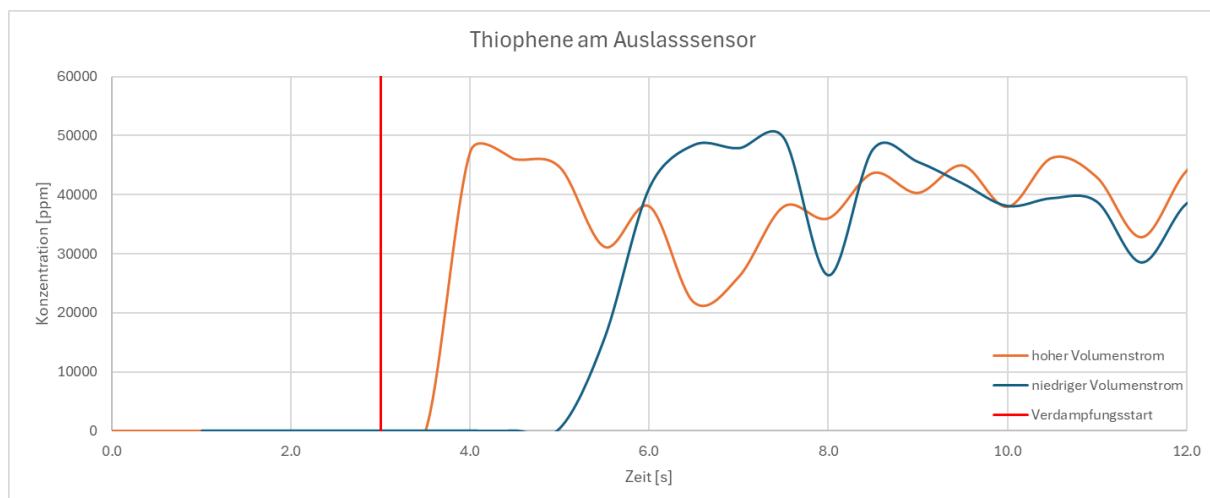


Abbildung 21: Thiophen-Konzentration am Auslass-Sensor der Modulgeometrie für hohen (orange) und niedrigen (blau) Luftvolumenstrom.

Um eine noch präzisere und räumlich hochaufgelöste Auswertung der Tracergasverteilung innerhalb des Batteriemoduls zu ermöglichen, wurde für die zweite Simulationsvariante eine deutlich verfeinerte Messstrategie implementiert. Ziel war es, die Konzentrationsentwicklung des Gases nicht nur punktuell am Luftauslass zu erfassen, sondern den Ausbreitungsverlauf kontinuierlich entlang der gesamten Strömungsrichtung zu dokumentieren.

Hierzu wurde ein Netzwerk aus virtuellen Sensoren geschaffen, die systematisch auf jeder zweiten Zelle – jeweils zentral auf der Oberseite – positioniert wurden. Durch diese engmaschige Anordnung der Messpunkte lässt sich die physikalische Ausbreitungsdynamik des Thiophens im Zeitverlauf exakt nachverfolgen. Diese detaillierte Datenbasis ist von entscheidender Bedeutung, um potenzielle Totzonen in der Strömung zu identifizieren und die Ansprechzeiten des Sicherheitskonzepts für verschiedene Fehlerpositionen innerhalb des Moduls fundiert zu bewerten. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die Sensorik im späteren Realaufbau an den effektivsten Positionen platziert wird.

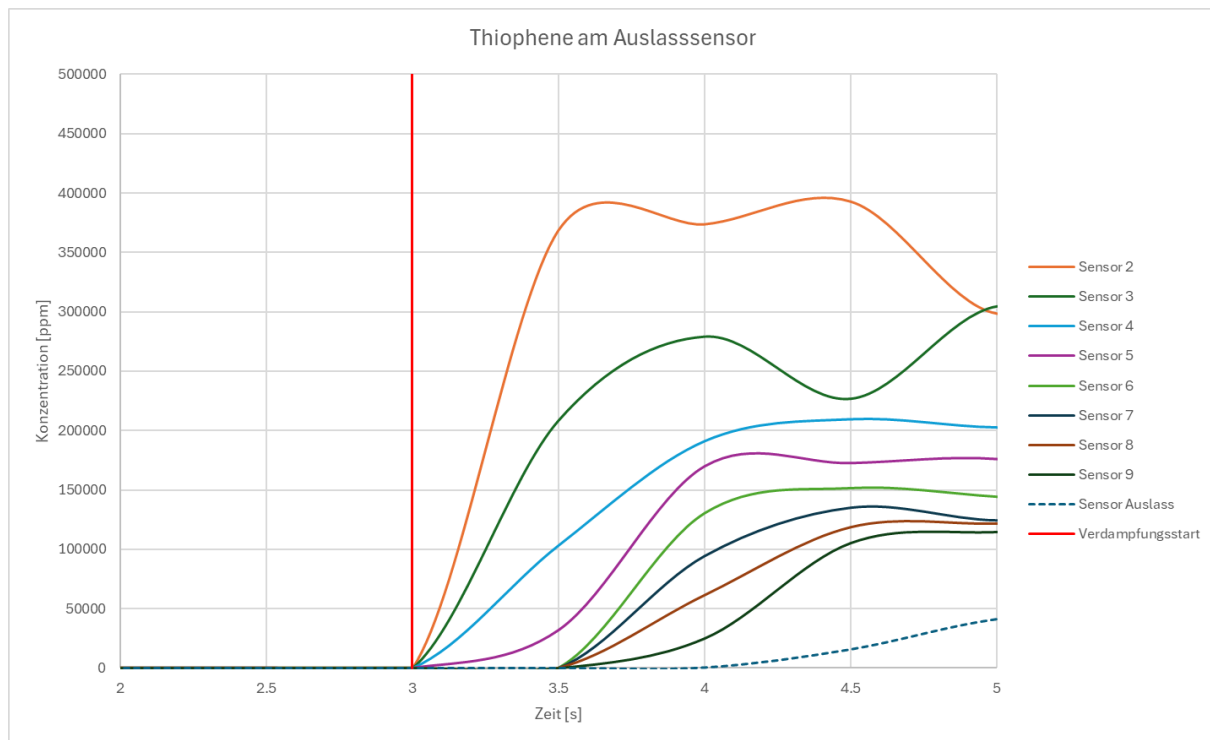


Abbildung 22: Thiophen-Konzentration entlang der Strömungsrichtung in der Modulgeometrie für niedrigen Luftvolumenstrom.

Die vergleichende Analyse der verschiedenen Volumenströme liefert essenzielle Erkenntnisse für die optimale Auslegung des Sicherheitsmanagements. Bei einem hohen Luftdurchsatz von 19 m³/h erweist sich die Platzierung eines Sensors am Modulauslass als vollkommen ausreichend. Das Tracergas erreicht diesen Messpunkt bereits eine Sekunde nach Freisetzung, was eine extrem schnelle Reaktionszeit garantiert.

Im Gegensatz dazu zeigt die Simulation bei einem reduzierten Volumenstrom von 9,2 m³/h eine deutlich lokalere Charakteristik der Gasausbreitung. Hier spricht der Sensor, der sich in unmittelbarer Nähe zum Verdampfungspunkt befindet, bereits nach 0,5 Sekunden an. Der Auslasssensor hingegen benötigt in

diesem Szenario deutlich länger. Er registriert eine mit der ersten Variante vergleichbare Tracergaskonzentration erst etwa vier Sekunden nach dem Start der Verdampfung.

Dieser Zeitverzug verdeutlicht, dass insbesondere bei geringeren Luftwechselraten eine strategisch verteilte Sensorik innerhalb des Moduls vorteilhaft ist. Nur so kann sichergestellt werden, dass thermische Ereignisse unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ohne kritische Verzögerung detektiert werden, um die Fehlerkette frühzeitig zu unterbrechen.

Für die numerische Untersuchung des Batteriepacks wurde eine gezielte geometrische Abstraktion vorgenommen, um die Modellkomplexität zu reduzieren und die Rechenzeit zu optimieren. In diesem Zuge wurden konstruktive Details wie Schrauben, Befestigungselemente, feine Biegeradien sowie dreidimensionale Beschriftungen vernachlässigt. Da der Fokus der Simulation auf der Strömungsdynamik liegt, blieben auch die thermischen Massen von Steckern, Gehäuseteilen, Kabeln und Batterien unberücksichtigt; stattdessen wurde ausschließlich das innere Luftvolumen des Packs modelliert. Um einen definierten Luftaustausch sicherzustellen, wurden sämtliche Gehäusespalten geschlossen, sodass eine Interaktion mit der Umgebung ausschließlich über die Lochbleche im Boden und im Deckel erfolgen kann.

Zur Steigerung der numerischen Stabilität wurden oberhalb und unterhalb dieser Lochbleche zusätzliche Puffer Luftvolumina von jeweils einigen Zentimetern ergänzt. Diese Zonen sind mit einer „Inlet-Outlet“ Randbedingung versehen, die keinen festen Strömungsvektor vorgibt und somit einen natürlichen Druckausgleich zur Umgebung ermöglicht. Die strömungstechnischen Randbedingungen selbst orientieren sich an der Funktion der Modulauslässe. Bereiche mit einem positiven Massenstrom in den Innenraum wurden als Pack-Einlässe definiert und mit einem Luftvolumenstrom von 19 m³/h bei einer Temperatur von 26 °C beaufschlagt. Die Moduleinlässe fungieren im Gegenzug als Pack-Auslässe, über die derselbe Volumenstrom wieder ausgetragen wird, wobei die Umgebungstemperatur konstant mit 20 °C angesetzt wurde.

Um eine mögliche Gasfreisetzung realitätsnah abzubilden, wurde eine spezifische Verdampfungsquelle integriert. Da die exakte Bestimmung der Gaszusammensetzung bei einem tatsächlichen Batteriezellenversagen unverhältnismäßig komplex wäre, wurde – analog zur Modulsimulation – eine definierte Verdampfungsfläche für reines Thiophen als Tracergas eingesetzt. Hierbei wurden zwei Szenarien untersucht. Eine Freisetzung am Auslass des fünften sowie am Auslass des zehnten Batteriemoduls (von unten gezählt). Zur detaillierten Bewertung der Strömungs- und Konzentrationsverteilung wurden virtuelle Sensoren implementiert. Diese befinden sich sowohl auf der linken und rechten Gehäuseseite auf Höhe der Modulhaltebleche als auch an zentralen Positionen unterhalb des oberen und oberhalb des unteren Lochblechs. Die Simulation erfasste die dynamische Gasausbreitung dabei über einen Zeitraum von fünf Sekunden Realzeit.

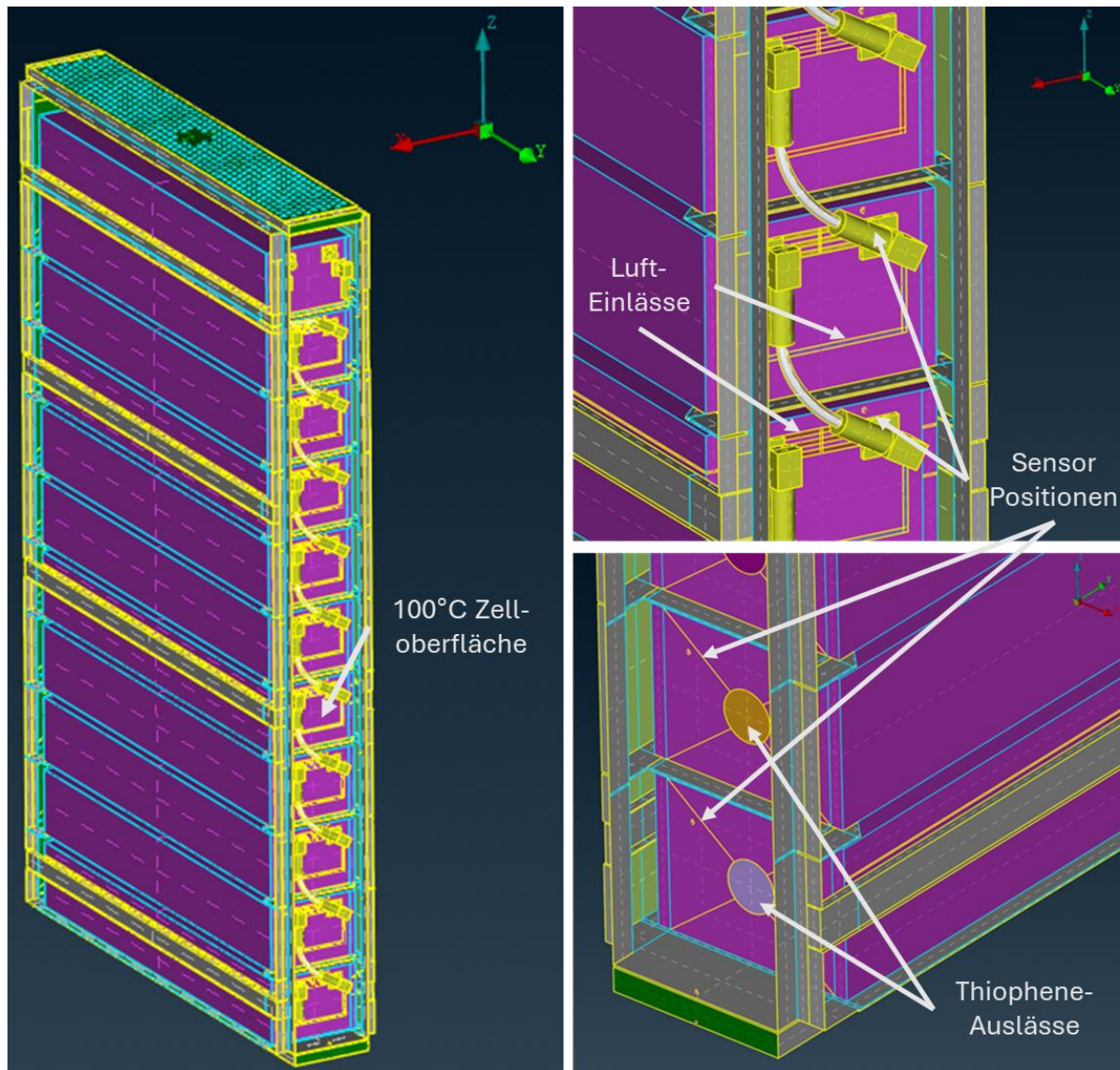


Abbildung 23: Vereinfachte Batteriepack-Geometrie mit Einlässen, Auslässen und Sensorpositionen.

Die Auswertung des ersten Verdampfungsszenarios verdeutlicht eine rasche Gasverteilung innerhalb des Gehäuses. Bereits eine Sekunde nach Beginn der Thiophen Freisetzung registriert der zweite virtuelle Sensor von unten auf der Einlassseite („Einlass2“) einen signifikanten Konzentrationsanstieg. Der am tiefsten gelegene Sensor derselben Seite („Einlass1“) verzeichnete den Maximalwert der Konzentration etwa 0,2 Sekunden nach Abschluss der fünfsekündigen Verdampfungsphase.

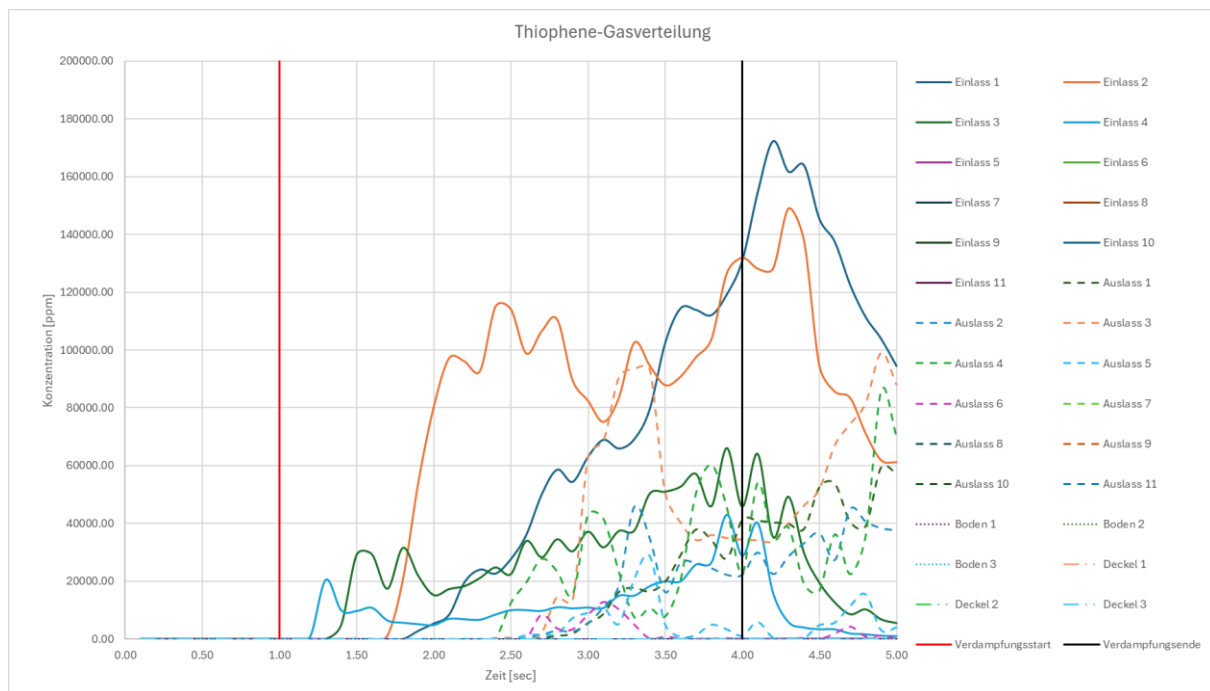


Abbildung 24: Thiophen-Konzentration in der Packgeometrie im ersten Verdampfungsszenario.

Im zweiten Verdampfungsszenario zeigt sich eine noch schnellere Reaktionszeit. Hier detektierten mehrere Sensoren bereits 0,5 Sekunden nach Verdampfungsstart signifikante Werte. Auffallend ist jedoch, dass die gemessenen Thiophen-Konzentrationen in diesem Szenario insgesamt niedriger ausfielen. Dies lässt sich auf die höhere Position der Verdampfungsquelle zurückführen, die eine intensivere Durchmischung mit der Umgebungsluft im Pack begünstigt und somit zu stärkeren Verdünnungseffekten führt.

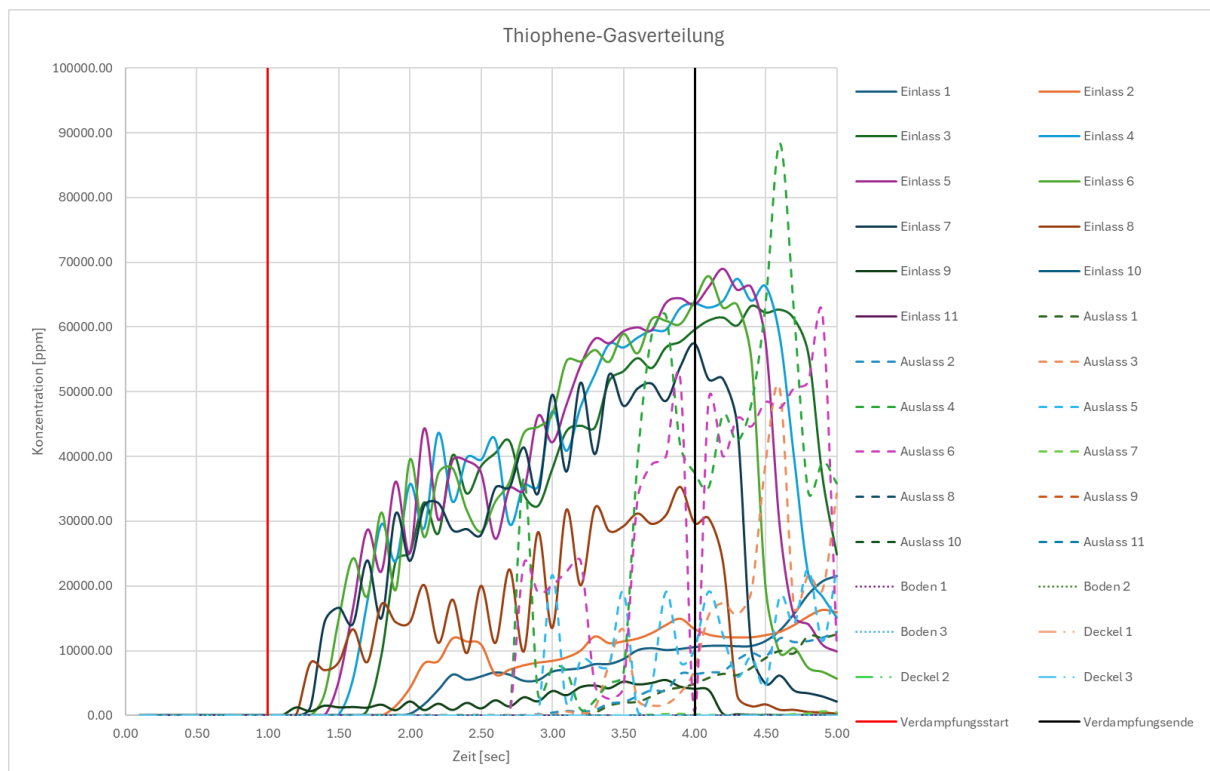


Abbildung 25: Thiophen-Konzentration in der Packgeometrie im zweiten Verdampfungsszenario.

Die Analyse der Strömungstopologie zeigt, dass die hohen Volumenströme an den Modulein- und -auslässen eine ausgeprägte Zirkulationsströmung innerhalb des Packs induzieren. Diese Dynamik spiegelt sich auch in den Messwerten der Sensoren auf der Auslassseite wider. Im Gegensatz dazu blieben die Sensoren in unmittelbarer Boden- und Deckelnähe frei von Tracergas. Obwohl das Thiophen aufgrund seiner im Vergleich zu Luft höheren Dichte unmittelbar nach der Freisetzung zunächst leicht absinkt, wird es kurz darauf vollständig von der dominanten Zirkulationsströmung erfasst. Ein klassischer Kamineffekt, also eine thermisch getriebene Luftströmung von unten nach oben durch das Pack, konnte unter den gegebenen Bedingungen nicht nachgewiesen werden.

Ein wesentliches Fazit der Untersuchungen betrifft die Systemauslegung. Durch die Umstellung der Moduldurchströmung von passiver auf aktive Belüftung (mittels Lüftern) stabilisierte sich die Strömungssituation im Pack derart deutlich, dass auf den Einsatz komplexer Optimierungsframeworks verzichtet werden konnte. Die dominante Strömungsrichtung ermöglichte eine direkte Identifikation der optimalen Sensorkonfiguration innerhalb des ESS-Gehäuses ohne algorithmische Unterstützung.

5 Ausblick und Empfehlungen

Der erfolgreiche Abschluss der Forschungsphase markiert einen entscheidenden Wendepunkt für die Sicherheit stationärer Energiespeicher, da das Projekt SafelON eindrucksvoll den Übergang von rein reaktiven zu proaktiven Schutzsystemen aufgezeigt hat. Der Ausblick für diese Technologie ist vielversprechend, da die Kombination aus inhärent sichereren Zellchemien wie der Natrium-Ionen-Technologie und intelligenten Frühwarnsystemen das Vertrauen in großskalige Speicherlösungen

stärken kann. Für die weitere Entwicklung und den Betrieb des geplanten Demonstrators ergibt sich daraus die zentrale Empfehlung, die gewonnenen Erkenntnisse über das Strömungsverhalten und die Materialalterung direkt in das Batteriemanagementsystem zu integrieren.

Da die Simulationen gezeigt haben, dass unter aktiver Kühlung eine dominante Zirkulationsströmung ohne signifikanten Kamineffekt entsteht, sollte die Platzierung der hochempfindlichen PTI-Sensoren primär an den strategischen Modulauslässen erfolgen, um eine Detektion innerhalb von Sekundenbruchteilen zu gewährleisten. Für die langfristige Zuverlässigkeit ist es zudem ratsam, den leichten thermischen Drift der Polymer Warnschwelle, die bei dauerhafter Belastung von etwa 100 °C auf bis zu 120 °C ansteigen kann, softwareseitig zu kompensieren. Ein adaptiver Algorithmus könnte hierbei die Empfindlichkeit der Gassensoren über die Lebensdauer des Speichers hinweg nachjustieren, um die volle Schutzwirkung des Tracergases SYS_B dauerhaft aufrechtzuerhalten.

Zusätzlich bietet die Kombination der beiden entwickelten thermochromen Polymere einen erheblichen Mehrwert für die Wartungsstrategie. Während die reversiblen Farbindikatoren den aktuellen thermischen Status während des Betriebs visualisieren, dienen die permanenten Umschlagpolymere als „thermisches Gedächtnis“. Es wird daher empfohlen, diese an thermisch kritischen Verbindungspunkten einzusetzen, um bei Inspektionen eine schnelle visuelle Lokalisierung von Hotspots zu ermöglichen, noch bevor eine detaillierte technische Analyse durchgeführt werden muss. Letztlich zeigt der Ausblick, dass insbesondere die Natrium-Ionen-Batterie aufgrund ihres geringen Propagationsrisikos der ideale Kandidat für dieses Sicherheitskonzept ist, was den Weg für eine ressourceneffiziente und zugleich hochsichere Energiewende ebnet.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Na-Ionen Zelle nach dem Überladungsversuch. Die Zelle ist im Bereich der Berstscheibe weiter ausgebrochen.	8
Abbildung 2: Vent Gas Zusammensetzung des Überladungsversuches nach dem TR.	9
Abbildung 3: Vent Gas Zusammensetzung des Übertemperaturversuches nach dem TR.	9
Abbildung 4: Blick auf drei aneinander gereihten Zellen des Propagationsversuches nach der Durchführung. Die Berstscheibe der rechten (Triggerzelle) und mittleren Zelle sind geöffnet.	10
Abbildung 5: Die LFPP-Zelle nach dem TR-Versuch mit noch eingesetztem Nagel des Versuches (links). Die Vent Gas Zusammensetzung des Versuches nach dem TR (rechts).	11
Abbildung 6: Ansicht von oben der LFPP-Zelle nach dem TR-Versuch (links). Die Vent Gas Zusammensetzung des Versuches nach dem TR (rechts).	11
Abbildung 7: Alterung von SYS 0 (a) und SYS B (b) bei verschiedenen Temperaturen	12
Abbildung 8: TGA-Kurven von SYS 0 bei verschiedenen Temperaturen und Zeiten (a) und TGA-Kurven von SYS B bei Raumtemperatur zu verschiedenen Zeiten (b)	13
Abbildung 9: TGA-Kurven von SYS B, gealtert bei 40 °C (a) und 50 °C (b)	13
Abbildung 10: Darstellung der Funktionalität der Farbrezeptur. Bei einer Temperaturänderung von Raumtemperatur (blau) zu einer höheren Temperatur (rot) verändert sich die Farbe der Probe oben von grün zu gelb.	14
Abbildung 11: Beobachtete Farbveränderung in Formulierung 2 (zweimal von grün zu gelb)	14

Abbildung 12: Testaufbau zur Validierung der Proben. Links eine Heizkammer, in der die Probe kontrolliert erhitzt werden kann und rechts eine Sensorkammer zur Detektion von Thiophen. Der Transport erfolgt über einen geringen Luftstrom.	15
Abbildung 13: Durchschnittliche Ausgastemperatur und Menge an freiwerdendem Thiophen der Probe SYS_B.....	15
Abbildung 14: Durchschnittliche Ausgastemperaturen und Mengen an freiwerdendem Thiophen der Proben bei einer Alterung bei Raumtemperatur.....	16
Abbildung 15: Durchschnittliche Ausgastemperaturen und Mengen an freiwerdendem Thiophen der Proben bei einer Alterung von 40 °C.	16
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Signalerzeugung in der photothermischen Interferometrie	17
Abbildung 17: Komplettes Testsetup mit der Möglichkeit, es luftdicht zu verschließen.	18
Abbildung 18: Messung mit einer Thiophenfreisetzung. Das Lock-in-Signal ist im oberen Diagramm dargestellt. Die jeweilige Phase ist im unteren Diagramm dargestellt.	18
Abbildung 19: Hintergrundmessung ohne Thiophen. Das Lock-in-Signal ist im oberen Diagramm dargestellt. Die jeweilige Phase ist im unteren Diagramm dargestellt.	19
Abbildung 20: Simulationsgeometrie der Thiophen-Verdampfung im vereinfachten Modul.....	20
Abbildung 21: Thiophen-Konzentration am Auslass-Sensor der Modulgeometrie für hohen (orange) und niedrigen (blau) Luftvolumenstrom.	20
Abbildung 22: Thiophen-Konzentration entlang der Strömungsrichtung in der Modulgeometrie	21
Abbildung 23: Vereinfachte Batteriepack-Geometrie mit Einlässen, Auslässen und Sensorpositionen. ...	23
Abbildung 24: Thiophen-Konzentration in der Packgeometrie im ersten Verdampfungsszenario.....	24
Abbildung 25: Thiophen-Konzentration in der Packgeometrie im zweiten Verdampfungsszenario.....	25

7 Kontaktdaten

DI Gabriel Ferdigg

Virtual Vehicle Research GmbH

Inffeldgasse 21A, 8010 Graz ([0316 8739001](tel:0316-8739001), office@v2c2.at, www.virtual-vehicle.at)

Weitere Projektpartner:

Polymer Competence Center Leoben GmbH

TU Graz – Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik

Kite Rise Technologies GmbH

UnravelTEC OG