

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

## Energieforschungsprogramm

### Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

### Endbericht

erstellt am

14.06.2021

## Projekttitle: Failsafe Battery System Plus

Projektnummer: 858796

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

Ausschreibung	03. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01.02.2017
Projektende	31.10.2020
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	44 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Virtual Vehicle Research GmbH
AnsprechpartnerIn	Andrey Golubkov
Postadresse	Inffeldgasse 21A, 8010 Graz
Telefon	+43 316 873 9001
Fax	
E-mail	info@v2c2.at
Website	<a href="https://www.v2c2.at/">https://www.v2c2.at/</a>

# Failsafe Battery System Plus

**AutorInnen:**

Dr. Andrey Golubkov, Virtual Vehicle Research GmbH

Dr. Gernot Kraberger, SAMSUNG SDI Battery Systems GmbH

Dr. Archim Wolfberger, Polymer Competence Center Leoben GmbH

Dr. Bernd Hofer, Fronius International GmbH

Dr. Egmont Kattinig, Isovolta AG

## 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis .....	4
2	Einleitung.....	5
3	Inhaltliche Darstellung.....	5
3.1	Entwicklung einer hochtemperaturbeständigen, mechanisch stabilen Thermofolie..	5
3.2	Produktion von Verbundprototypen für Einsatz in Zellmodule.....	14
3.3	Thermal Runaway Experimente .....	16
3.4	Temperaturbeständigkeit der Thermofolie .....	18
3.5	Thermal Runaway Simulationen.....	20
3.6	Integration ins Batteriesystem .....	22
3.7	Lichtbogentests .....	24
3.7.1	Erkennung defekter elektrischer Verbinder.....	24
3.7.2	Vorverarbeitung und Aufbereitung der Daten .....	27
3.7.3	Manuelle Klassifizierung.....	28
3.7.4	Feature extraktion .....	31
3.7.5	Training und Evaluierung .....	32
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	37
5	Ausblick und Empfehlungen.....	38
6	Literaturverzeichnis.....	38
7	Anhang .....	39
8	Kontaktdaten.....	39

## 2 Einleitung

Batteriesysteme sind Kernkomponenten für die Energiewende. Sie sind die Energiequelle für Elektrofahrzeuge, speichern den Solarstrom in Privathäusern und stabilisieren die Einspeisung der Wind- und Solarenergie in die Stromnetze. In den letzten Jahren sind die Kosten für die Batterien und Solarzellen massiv gefallen und die Produktionszahlen großer Batteriesysteme exponentiell gestiegen. Dabei stellt die Erhöhung der Energie- und Packungsdichte bei gleichbleibender Sicherheit und geringen Kosten eine große technische Herausforderung dar.

Ziel des Projektes ist ein Konzept für ein robustes Batteriesystem:

- Mit einer neuartigen Methode zur Erkennung schadhafter Hochstromverbinder
- Mit neuartigem Wärmemanagement zur Verhinderung einer Kettenreaktion im Fehlerfall
- Mit einem mechanischen Zellhaltekonzept, welches dem Thermal Runaway einer Zelle standhält

## 3 Inhaltliche Darstellung

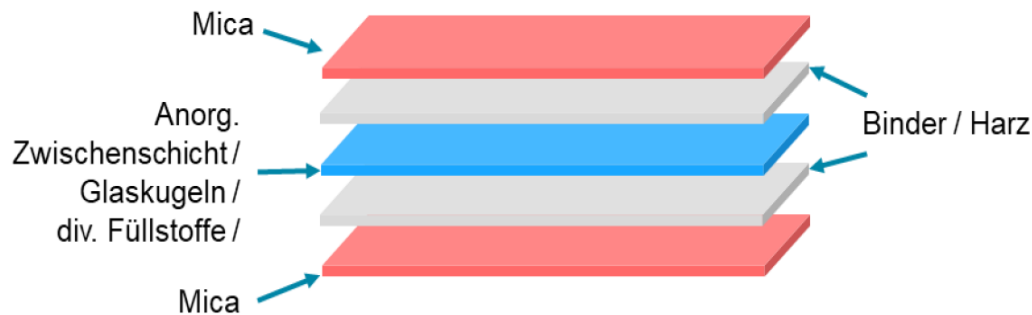
### 3.1 Entwicklung einer hochtemperaturbeständigen, mechanisch stabilen Thermofolie

Eines der Ziele war es, eine Kompositfolie zu entwickeln, welche im Fall einer Überhitzung im Anwendungsfall als Thermoschutzfolie fungiert. Dazu wurde eine Kombination aus keramisierenden Polymeren (Polysiloxane) sowie Glimmerpapier und weiteren temperaturbeständigen und thermisch isolierenden Materialien (Keramikfilze) mit unterschiedlichen Schichtstärken untersucht.

Die Materialien wurden mit dem verwendeten Silikonelastomer als Binder zwischen Glimmerpapier verklebt, um eine mechanische Stabilität der Verbunde vor sowie nach Temperaturbelastung (> 700°C) zu erreichen. Zusätzlich dienten niedrigschmelzende Glaskugeln zur Verbesserung der Stabilität der Verbunde. In Abhängigkeit der Kombination der eingesetzten Harzmatrix, Füllstoffe und Trägermaterialien werden Verbundmaterialien mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften erhalten.

Simulationsergebnisse des Thermal Runaways eines Batteriemoduls zeigten in weiterer Folge, dass es im Laufe des Temperaturanstiegs zu einer Verformung der Zelle kommt - mit einem resultierenden Spalt. Daher wurde in einem weiteren Schritt ebenfalls stark expandierende Füllstoffe (Blähgraphit) eingesetzt, um die Wärmeleitfähigkeit der Verbundfolie im Fehlerfall durch eine Expansion im entstandenen Zwischenraum weiter herabzusetzen.

Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau einer Thermofolie, bestehend aus mehreren Komponenten, welche nachfolgend beschrieben werden. Die Thermofolie wird durch Beschichtung der anorganischen Zwischenschicht und/oder des Glimmerpapiers (Mica) mittels Gießen und Rakeln nach dem Bottom-up Prinzip aufgebaut.



**Abbildung 1: Schematische Darstellung der Verbundfolie**

**Binder:** Als Matrixmaterial dienen verschiedene Silikonelastomere (ELASTOSIL RT625 und SilGel 612, Wacker Chemie AG), bestehend aus zwei Einzelkomponenten (A und B), die bei Raumtemperatur vernetzen (RTV-2 System). Das Mischungsverhältnis der Komponenten A:B wurde angepasst, um die mechanischen Eigenschaften des ausgehärteten Elastomers entsprechend der Anwendung zu optimieren.

**Glimmerpapier:** Glimmerpapier, bereitgestellt von Isovolta AG, wird als Außenschicht des Folienverbunds eingesetzt und dient der mechanischen und elektrischen Beständigkeit. Das Glimmerpapier wurde durch einen horizontalen Imprägnierprozess mit den Silikonharzen zur Herstellung von flexiblen Fabrikaten beschichtet. Untersucht wurde der Prozess mit Phlogopit- wie auch Muskovit-Glimmer in je zwei unterschiedlichen Dicken. Sowohl die robusteren Glimmerpapiere mit einem Gewicht von  $160 \text{ g/m}^2$  als auch die dünneren Papiere mit  $80 \text{ g/m}^2$  konnten mit diesem Prozess erfolgreich imprägniert werden.

**Anorganische Zwischenschicht:** Im Rahmen der Versuche wurden Keramikfasermatten (EAF Blanket S1200, R.A. Schmidt – Feuerfest GmbH), welche eine max. Temperatur von  $1200^\circ\text{C}$  standhalten, untersucht. Dieses Material weist ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeiten auf:  $200^\circ\text{C}$ :  $0,06 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;  $400^\circ\text{C}$ :  $0,09 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

**Glaskugeln:** Um die mechanische Stabilität der Verbundfolie ab einer Temperaturbelastung von  $600^\circ\text{C}$  zu gewährleisten, wurden sowohl Glashohlkugeln ( $160\text{-}250 \text{ }\mu\text{m}$ , Fa. Olan) als auch Glasvollkugeln ( $150\text{-}212 \text{ }\mu\text{m}$ , Sigma-Aldrich) der Harzmatrix beigefügt. Bei hohen Temperaturen unter Umgebungsatmosphäre kommt es zur Keramisierung der Polysiloxanmatrix und zur Bildung von Siliziumdioxid, welches als weißes, sehr feines Pulver erkennbar ist. Durch die Umwandlung verliert der Verbund den Zusammenhalt. Ein

rechtzeitiges Schmelzen der eingesetzten Glaskugeln soll den feinen Staub binden und die Schichten fixieren.

**Expandierende Füllstoffe:** Blähgraphit (BLG 300L-LT, RMC Remacon GmbH) wurde als expandierbarer Füllstoff eingesetzt. Das verwendete Material zeigt eine starke Volumenausdehnung der Graphitflocken bereits ab 160°C. Ebenfalls untersucht wurden thermisch expandierende polymere Mikrokugeln (thermally expanding microspheres, TEM). Die verwendeten Füllstoffe (Expancel 909 DU 80, Nouryon) bestehen aus einem physikalischen Treibmittel umschlossen von einer thermoplastischen Hülle und können nach Expansion das bis zu 60-fache ihres ursprünglichen Volumens einnehmen.

### **Untersuchung der Wärmebeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit**

Zur Untersuchung der Wärmebeständigkeit wurden Proben mit einem Durchmesser von 50 mm als Verbunde im Labormaßstab hergestellt und im Muffelofen bei einer Ofentemperatur von 600°C zwischen Stahlplatten ausgelagert, um im Anschluss die Wärmeleitfähigkeit der belasteten Proben mittels Guarded-Hot-Plate Verfahren zu bestimmen.

Die Auslagerungsversuche haben gezeigt, dass bei der Zugabe von 8 Gew. % Glashohlkugeln zur Elastomermatrix ein Aufschmelzen der Glaskugeln bei einer Proben temperatur von ca. 370°C auftritt. Ab einer Temperatur von 460-600°C wurde eine Keramisierung der Polymermatrix und Bildung von Siliziumdioxid beobachtet, welches von der Glasschmelze effektiv gebunden wurde. Bei einem Schichtaufbau aus Elastomermatrix und innenliegenden Keramikfasermatten ohne zusätzliche Beimengung von Glaskugeln wurde beobachtet, dass nach der Auslagerung bei 600°C die mechanische Stabilität durch das Fehlen der Glaskugeln nicht mehr gegeben ist.

Die Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) der Proben wurden vor und nach der Temperaturbelastung (Auslagerung im Muffelofen bei 600°C) bestimmt. Die Kennwerte für Proben mit innenliegendem Keramikfilz liegen durch die zusätzliche Schicht im Bereich von  $0,11 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (30°C) und  $0,13 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (200°C) und somit geringfügig niedriger als der Verbund mit Elastomermatrix und 8 Gew. % Glashohlkugeln, welcher  $\lambda$ -Werte im Bereich von  $0,14 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  über den getesteten Temperaturbereich aufweist. Um eine weitere deutliche Reduktion der Wärmeleitfähigkeit zu erreichen, wurde auf alternative Konzepte zur Verringerung der Wärmeleitfähigkeit nach Temperaturlagerung gesetzt. Im Speziellen wurden stark expandierende Füllstoffe eingesetzt, um im Falle von hohen Temperaturen neben der Keramisierung der Polymermatrix auch eine Expansion sowie Porenbildung zu erreichen.

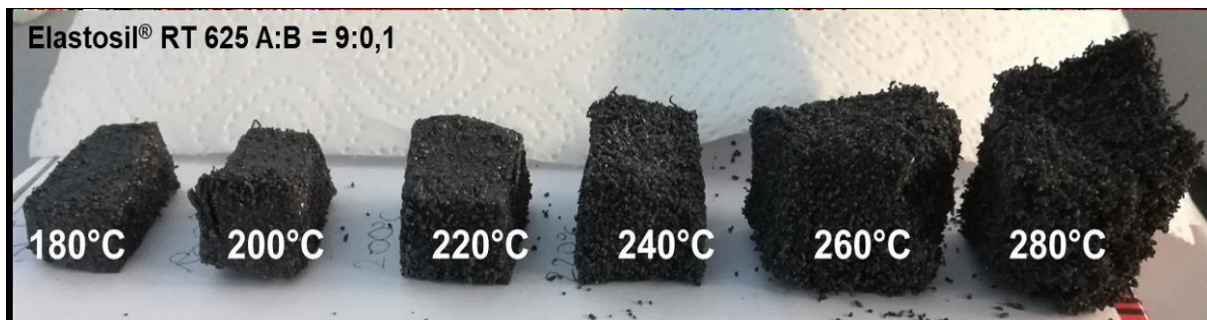
### **Untersuchung des Expansionsverhaltens von Silikonelastomeren durch Blähgraphit**

Zur Untersuchung des Expansionsverhaltens der Verbundfolien bei Temperaturen ab 180°C, wurde Blähgraphit (BLG) zu unterschiedlichen Anteilen (10 bis 40 Gew. %) in die Elastomermatrix eingearbeitet.

In Laborversuchen wurden mit Blähgraphit gefüllte Silikonelastomer-Proben im Umluftofen ausgelagert, um die maximale Expansion in Abhängigkeit der Temperatur (180, 200, 220, 240, 260, 280°C) zu beobachten. Es konnte gezeigt werden, dass durch geeignete Wahl des

Füllstoffgehalts und der Mischung der Einzelkomponenten der Silikonelastomere eine geeignete Expansionswirkung der eingesetzten Füllstoffe erreicht werden kann.

In den Versuchen wurde ein Expansionsverhalten von rund 230% Volumszunahme nach Auslagerung bei 280°C für eine Mischung von ELASTOSIL RT625 im Mischungsverhältnis von 9:0,1 (Komponente A:B) beobachtet (Abbildung 2).



**Abbildung 2: Vergleich geschäumter Proben in Abhängigkeit der Temperatur**

### **Mechanische Charakterisierung**

Als Basis für eine Materialmodellierung wurden die verwendeten elastomeren Matrixmaterialien mechanischen Prüfungen unter uniaxialem Druck sowie uniaxialem und biaxialem Zug unterzogen.

### **Uniaxiale Tests**

Temperaturabhängige, einachsige Zugversuche wurden für die verwendeten Elastomermaterialien in Anlehnung an die Prüfnorm ASTM D412 für Elastomere bei einer Geschwindigkeit von 100 mm/min durchgeführt. Dehnungen wurden optisch mit einem System für digitale Bildkorrelation bestimmt (Mercury RT digital image correlation, DIC). Für uniaxiale Kompressionstests wurden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser (D) von 30 Millimetern und einer Höhe (H) von 32 Millimetern verwendet. Die Druckversuche wurden an einer Universalprüfmaschine (Zwick Z010) unter Anwendung von geführten Druckplatten bei einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min durchgeführt.

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

Ein Vergleich der mechanischen Eigenschaften des getesteten, ungefüllten SilGel 612 Materials mit ungefülltem ELASTOSIL RT 625 zeigt, dass SilGel 612 wesentlich weiches Verhalten als Elastosil RT 625 aufweist, welches sich in einer deutlich geringeren Steigung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abbildung 3 (a) darstellt. Bei Druckbelastung zeigen beide Materialien ein ähnliches Verhalten (siehe Abbildung 3 (b)).

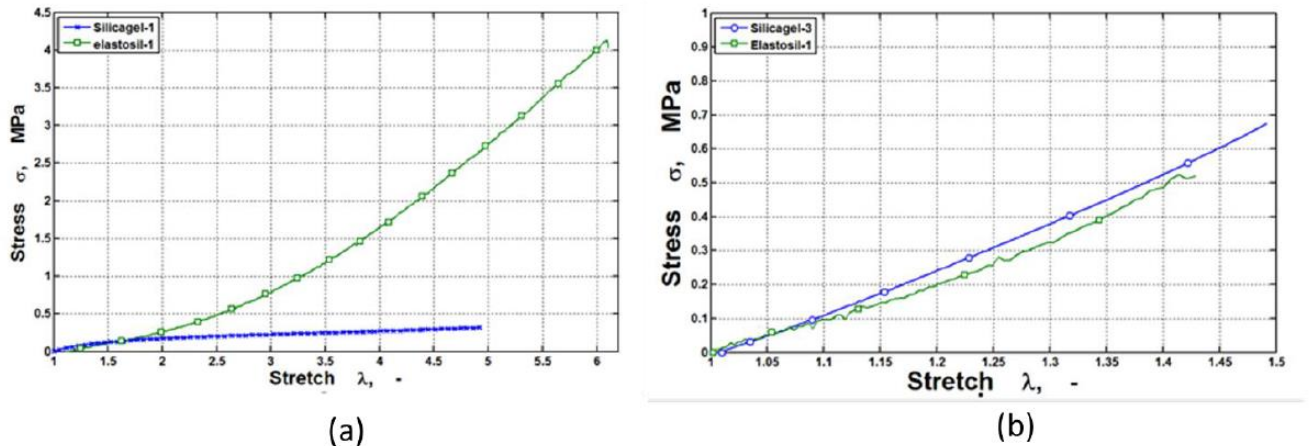


Abbildung 3: Vergleich zwischen ungefülltem SilGel 612 und Elastosil RT 625 – Uniaxiale Zugbelastung (a), Uniaxiale Druckbelastung (b)

Die Spannungs-Dehnungs Kurven für das ungefüllte und mit 20 Gew.-% BLG SilGel 612 gefüllte Material sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Beladung mit BLG führt zu einer deutlich erkennbaren Versteifung des Materials und auch zu einer Verringerung der Bruchdehnung im Vergleich zum ungefüllten Material.

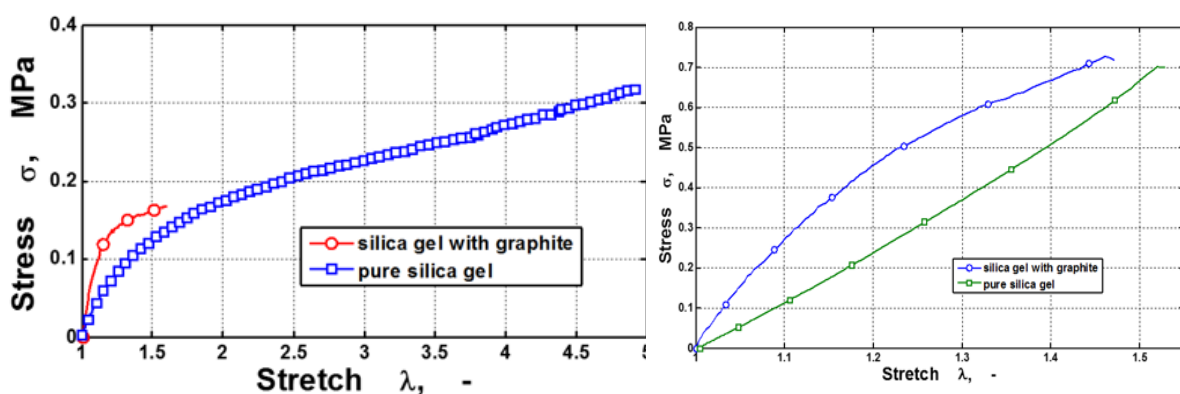
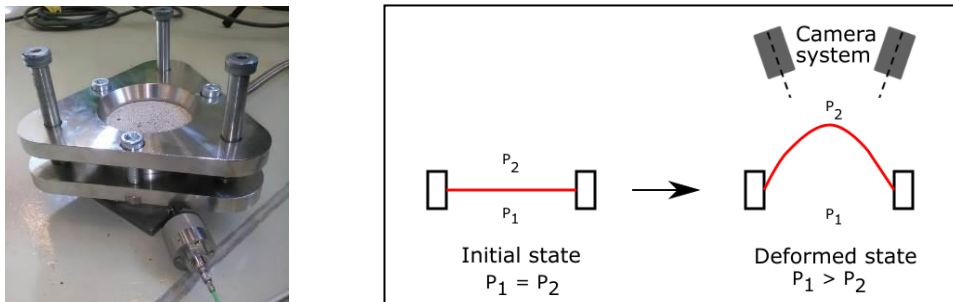


Abbildung 4: Vergleich zwischen ungefülltem und mit 20 Gew.-% BLG gefülltem SilGel 612 – Uniaxiale Zugbelastung (a), Uniaxiale Druckbelastung (b)

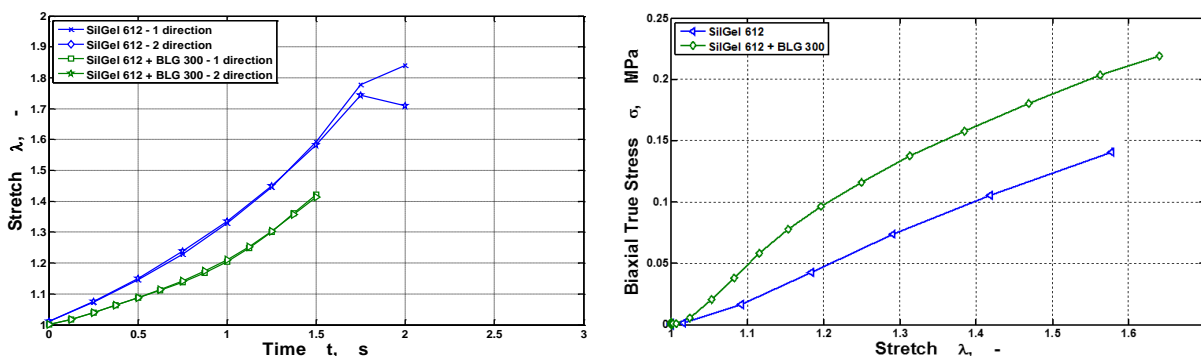
## Biaxiale Versuche

Um die Materialeigenschaften unter biaxialer Belastung zu untersuchen, wurden Aufblasversuche (blow-up tests) durchgeführt. Dazu wurden dünne folienförmige Proben der ausgewählten Formulierung sowohl mit als auch ohne Füllstoff mit einem Probendurchmesser von 80 mm und einer Dicke von 0,5 mm hergestellt und in einer entsprechenden Einspannung mit einer Druckrate von 0,4 bar/min zu einer Blase verformt. Die Deformation der Proben wurde mit einem Kamerasystem (ARAMIS 4M DIC) mittels digitaler Bildkorrelation erfasst und der Spannungszustand wurde aus der Umrechnung des mechanischen Gleichgewichtszustandes im Pol der verformten Probe als Funktion der anliegenden Deformation errechnet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5 dargestellt. Die resultierende Deformation während des Aufblasversuchs und die errechneten Spannungs-Dehnungs-Kurven sind in Abbildung 6 dargestellt und zeigen gleichmäßiges biaxiales Materialverhalten sowie eine Versteifung des Materials mit Füllstoff, wie bereits bei den uniaxialen Tests beobachtet.



**Abbildung 5: Probenenspannung (links) und schematische Darstellung des biaxialen Aufblasversuchs (rechts)**

Die ermittelten Materialkennwerte auf Basis der Daten aus den uniaxialen Versuchen sowie den biaxialen Aufblasversuchen für SilGel 612 stellen somit die Grundlage für eine Kalibrierung von hyperelastischen Materialmodellen dar und können in weitere Folge für Simulationen auf Modulebene angewandt werden.



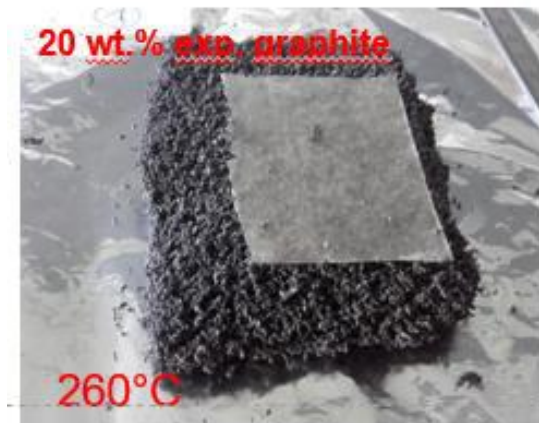
**Abbildung 6: Dehnungs-Zeit Kurven (links) und resultierende Spannungs-Dehnungs Kurven (rechts) in biaxialen Aufblasversuchen für SilGel 612 mit und ohne Füllstoff (20 Gew.% BLG)**

### Produktion und Optimierung von Kompositfolien

Die Herstellung von Thermofolien mit Glimmerpapier, Silikonmatrix und Blähgraphit (BLG) als Füllstoff wurde weiterverfolgt und der Aufbau für einen großtechnischen Einsatz optimiert. Neben dem bereits untersuchten Matrixmaterial ELASTOSIL RT 625 wurde ein zusätzliches Matrixmaterial mit weicherem Materialeigenschaften untersucht, um eine stärkere Volumenexpansion durch den Expansionsvorgang des mit Blähgraphit gefüllten Materials bei Temperaturen ab 150°C bis 250°C zu erreichen.

Das untersuchte Material SilGel 612 zeigt eine hohe Eigenklebrigkeit und ausgezeichnetes Expansionsverhalten im mit Blähgraphit gefüllten Zustand. Eine hohe Eigenklebrigkeit ist bei der Herstellung von Verbunden mit Glimmerpapieren als Außenschicht ein deutlicher Vorteil, da hier die Notwendigkeit der Verwendung eines Klebers entfällt. Die Mischungsanteile wurden hinsichtlich guter Verarbeitbarkeit variiert und gleichzeitig das Blähverhalten der Proben mit unterschiedlichen Füllgraden an Blähgraphit untersucht. Ein Mischungsverhältnis der Komponenten von 2:1 (A:B), ein Füllgrad von 20 Gew.% Blähgraphit sowie die Zugabe von 1 Gew.% eines Thixotropiemittels (Aerosil 200, Evonik) waren ideal für ein gleichmäßiges Expansionsverhalten mit einer Dickenzunahme um den Faktor 1,5 nach Auslagerung bei 260°C (siehe Abbildung 7).

In Versuchen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit konnten für Kompositfolien mit Glimmerpapier als Außenschichten und Silikonmatrix mit Blähgraphit als Zwischenschicht Werte im Bereich von 0,07 bis 0,12 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> ermittelt werden. Allerdings zeigten die Messungen eine schlechte Reproduzierbarkeit aufgrund der starken Dickenänderung beim Aufschäumen.



**Abbildung 7: SilGel 612 2:1 (A:B) mit 20 Gew.-% BLG sowie 1 Gew.-% Thixotropiemittel nach Auslagerung bei 260°C**

Aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit des eingesetzten Blähgraphits ergeben sich in weiterer Folge Risiken für die Ausbildung leitfähiger Pfade, wenn ein starkes Aufschäumen der funktionellen Thermofolie erfolgt. Aus diesem Grund wurden alternative Additive untersucht, welche ebenfalls zu einer starken Expansion der Thermofolie führen können und nicht leitfähig sind. Es wurden dazu thermisch expandierende polymere Mikrokugeln (thermally expanding microspheres, TEM) in die Harzmatrix implementiert, sowie die Zugabe von Glaskugeln für verbesserte Stabilität untersucht. Aus den unterschiedlichen Formulierungen wurden Folien

## Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

mit einer Gesamtdicke von 1.5 mm hergestellt und zwischen Stahlplatten in einem Muffelofen bei 500°C für 30 min. bis zu 1h. ausgelagert.



**Abbildung 8: Verbundfolien vor (links) und nach (rechts) der Auslagerung im Muffelofen**

Proben mit TEM als Füllstoff zeigten eine deutliche Degradation und Schumpfung nach der initialen Ausdehnung der Schichten mit erkennbarem Austritt von Siliziumdioxid nach der Auslagerung. Dieses Verhalten ist auf eine Zerstörung der mit Treibmittel gefüllten Mikrokugeln zurückzuführen und legt nahe, dass diese Füllstoffklasse nicht für die geplante Anwendung geeignet ist. Für die mit Glaskugeln gefüllten Folienverbunde konnte eine Verbesserung in der Formbeständigkeit nach der Auslagerung im Muffelofen beobachtet werden. Eine weitere Optimierung des Anteils an Glaskugeln zeigte allerdings, dass Glasgehalte von mehr als 30 Gew. % benötigt werden, um eine deutliche Verbesserung der Formstabilität zu erreichen. Diese hohen Füllgrade wirken sich vor allem negativ auf die Prozessierbarkeit aus. Daher wurde für Verbundfolien mit Glimmerpapier letztendlich die Formulierung SilGel 612 im Mischungsverhältnis 2:1 (A:B) mit 20 Gew.% Blähgraphit und 1 Gew.% Thixotropiemittel bei einer Zieldicke des Verbunds von 1,5 mm als die am besten geeignete Kombination ermittelt.

Um eine mögliche Degradation der Polymermatrix und eine etwaige Verschlechterung der Interfaceigenschaften der hergestellten Folienverbunde zu untersuchen, wurden beschleunigte Alterungstests durchgeführt und deren Einfluss mittels Zug-Scherversuchen an einer Universalprüfmaschine (Zwick Z010) bei einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min bei Raumtemperatur ermittelt. Die Prüfung der ungealterten und gealterten Folienverbunde mit einer Dicke von 1,5 mm erfolgte zwischen Aluminiumstäben mit einer Überlappung von ca. 25 mm x 25 mm. In dieser Versuchsreihe wurde zusätzlich auch der Einfluss einer Vorbehandlung des Glimmerpapiers mit einem Primer (PR1216, Otto Chemie) untersucht. Die Auslagerungsbedingungen für die durchgeführten Alterungstests sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: Zusammenfassung der Versuche für beschleunigte Alterung der Folienverbunde**

<b>Test</b>	<b>Bedingungen</b>	<b>Dauer</b>	<b>Vorbereitung Glimmer</b>
Temperature and humidity test (TH)	85°C, 85%RH	1000h, 2000h	Mit und ohne Primer
High temperature storage (HTS) 1	125°C	1000h, 2000h	Mit und ohne Primer
High temperature storage (HTS) 2	105°C	1000h, 2000h	Ohne Primer

Scherfestigkeiten der untersuchten Proben wurden vor und nach der Auslagerung ermittelt und zeigen eine deutliche Verbesserung der Interface-Haftung durch die Vorbehandlung mit dem Primer. Während der Tests wurde beobachtet, dass die Haftfestigkeit der Klebeverbindung zwischen Folienverbund und Aluminiumstab zum Teil nicht ausreichend war und Proben an der Klebeverbindung versagten. Die teilweise Verbesserung der Scherfestigkeit nach Alterung kann ebenfalls durch dieses Verhalten erklärt werden, da die Haftung vermutlich durch veränderte Oberflächeneigenschaften der Glimmerschicht nach Auslagerung beeinflusst wird. Dennoch konnten mit diesen Alterungstests die Eignung und Stabilität der Verbundfolien bestätigt werden, da alle gealterten funktionellen Folien weiterhin funktionstüchtig waren und bei erhöhter Temperatur aufgeschäumt werden konnten.

Für Versuche am Folienprüfstand wurden die im Projekt untersuchten Silikonformulierungen ohne Blähgraphit und Thixotropiemittel als Folien mit Abmessungen von ca. 15 cm x 20 cm x 1,5 mm hergestellt und ViF bereitgestellt, um die thermischen Eigenschaften der jeweiligen Matrix zu bewerten.

**Tabelle 2: Übersicht über bereitgestellte Silikonformulierung für den Folienprüfstand**

<b>Probe</b>	<b>Material</b>	<b>Verhältnis A:B</b>	<b>Füllstoff</b>
<b>A</b>	SilGel 612	2:1	-
<b>B</b>	Elastosil RT 625	9:1	-
<b>C</b>	Elastosil RT 625	9:0,1	-
<b>D</b>	Elastosil RT 625	9:1	Glaskugeln GB2 8%
<b>E</b>	Elastosil RT 625	9:0,1	Glaskugeln GB2 8%
<b>F</b>	SilGel 612	2:1	Glaskugeln GB2 8%
<b>G</b>	SilGel 612	2:1	Glaskugeln GB2 20%

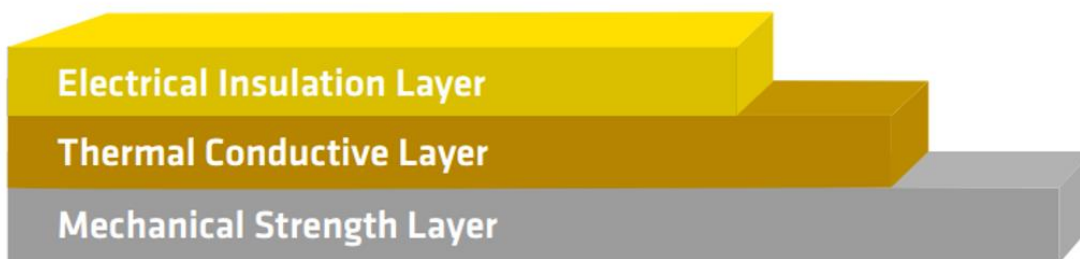
### 3.2 Produktion von Verbundprototypen für Einsatz in Zellmodule

Für die Erstellung der hochtemperaturbeständigen, mechanisch stabilen Thermofolie arbeiteten die Partner PCCL und ISOVOLTA eng zusammen.

ISOVOLTA ist spezialisiert auf die Herstellung von technischen Laminaten für elektrische und thermische Anwendungsbereiche. Bei den eingesetzten Laminier-Verfahren können die Eigenschaften von unterschiedlichsten Materialien kombiniert und in einem Produkt vereint werden. So können zum Beispiel gute elektrische Isolationsmaterialien mit Trägermaterialien mechanisch verstärkt und zusätzlich thermische Eigenschaften optimiert werden. Die Produktionsverfahren werden dabei für jedes einzelne Produkt optimiert, um optimale Stabilität und Qualität gewährleisten zu können.

ISOVOLTA's laminates allow to unite required properties of various materials in one product

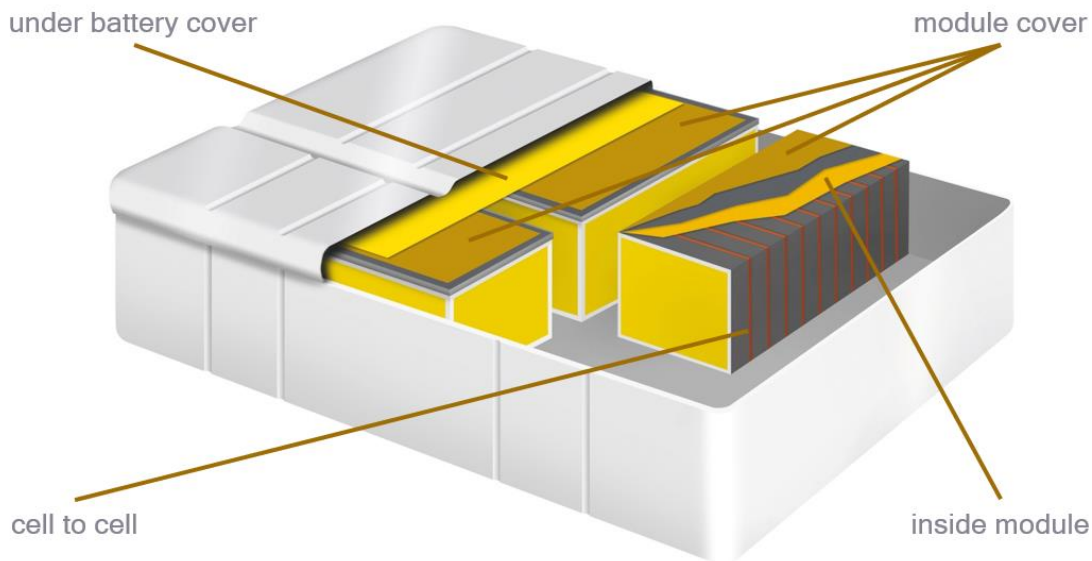
e.g. electrical insulation + thermal conductivity + mechanical strength



Für Lithium-Ionen Batterien kommt vor allem Glimmer als feuerfeste Isolierungsschicht zum Einsatz. Glimmer ist ein natürliches Mineral, das bei ISOVOLTA zu einem hochwertigen mineralischen Papier verarbeitet wird. Es ist sehr temperaturbeständig, unbrennbar, hat einen geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten und weist eine hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit auf. Zusätzlich sind Glimmermaterialien resistent gegen viele chemische Verbindungen und haben eine gute Beständigkeit gegenüber Koronaentladungen. Bei ISOVOLTA werden Glimmerpapiere aus Muskovit oder Phlogopit eingesetzt. Diese Papiere werden in einem ersten Produktionsschritt mit speziellen Harzen verfestigt und dann mit zusätzlichen funktionellen Schichten verbunden. Dadurch können für alle Bereiche der Lithium-Ionen Batterie Lamine mit speziell designten Eigenschaften entwickelt und produziert werden. Folgende Abbildung gibt einen Überblick von Einsatzmöglichkeiten der Isovoltalaminat in einem Batteriepack.

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

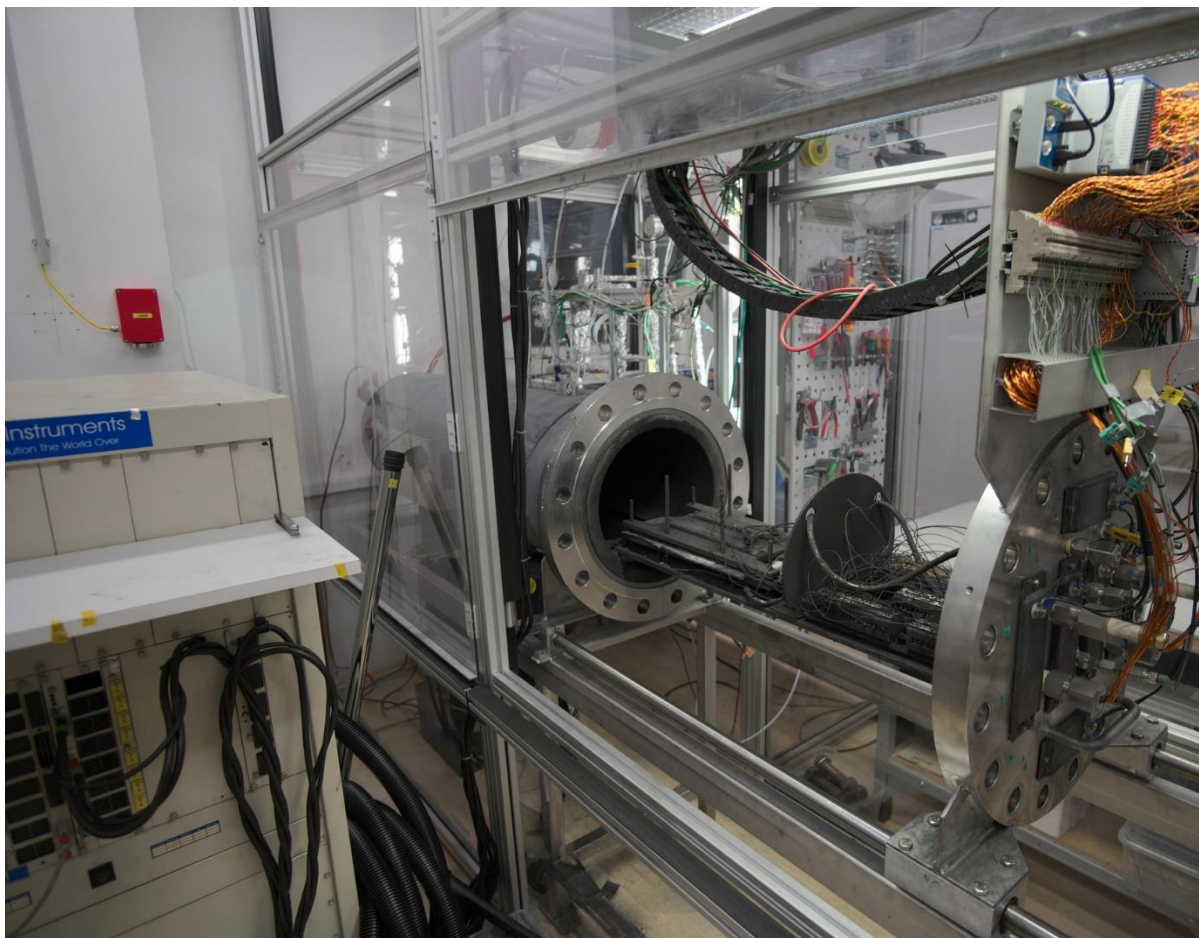


Glimmerlaminare behalten ihre elektrische Integrität selbst im Brandfall bei Temperaturen von bis zu 1000 °C und zeigen auch über einen weiten Temperaturbereich gute thermische und mechanische Eigenschaften. Mit speziell entwickelten Isolationsschichten können diese Laminare Schutz in Thermal-Runaway Situationen bieten und leisten einen wichtigen Beitrag zur Sicherheit von elektrischen Fahrzeugen. Neben der thermischen und elektrischen Isolationseigenschaft sind dabei auch weitere Eigenschaften wie Komprimierbarkeit, mechanische Stabilität und Verarbeitbarkeit für einen optimalen Einsatz wichtig. Ein Überblick von charakteristischen Eigenschaften des Produktportfolios von ISOVOLTA namens THERMIGA ist in der nachstehenden Abbildung zusammengefasst.

	thermal insulation	UL94 V0	electrical insulation	compressibility	technical cleanness	ballistic resistance
THERMIGA P 9026	✓		✓		✓	
THERMIGA P 9011	✓	✓	✓			
THERMIGA P 9003	✓	✓	✓			✓
THERMIGA O.C.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
THERMIGA P 9001			✓		✓	
THERMIGA C 9008		VTM-0	✓		✓	
THERMIGA P 9027		VTM-0	✓		✓	

### 3.3 Thermal Runaway Experimente

Wird eine geladene Li-Ionen Zelle einer stark erhöhten Temperatur ausgesetzt, werden in der Zelle exotherme, selbstbeschleunigende chemische Reaktionen ausgelöst, welche zum Versagen der Zelle führen. Diese Vorgänge werden im BATTLAB am Virtual Vehicle experimentell untersucht. Abbildung 9 zeigt den für die Versuche verwendeten druckdichten Reaktor. Im Reaktor werden Zellen durch extreme Bedingungen zum Thermal Runaway gebracht. Dabei werden Temperaturen, mechanische Ausdehnung und die Ausgasung quantifiziert.



**Abbildung 9: Aufbau eines Thermal Runaway Versuchs**

Das Ziel der Thermal Runaway Experimente im Projekt war es die Li-Ionen Zelle thermisch und mechanisch zu vermessen. Dafür wurde die Zelle zwischen zwei beheizbaren Platten mit definierter Federkraft verpresst und mit einer Übertemperaturrampe weit über die Zellspezifikationen hinaus bis zum Thermal Runaway aufgeheizt. In den Versuchsserien wurden die Temperaturen, entstehende Gase und die maximale Zellausdehnung aufgenommen. Abbildung 10 zeigt den Aufbau und den Versuch. Abbildung 11 zeigt schematisch die typischen Ereignisse während des Versuchs.

Die Ergebnisse der Messungen flossen in die thermischen und mechanischen Modelle ein.

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

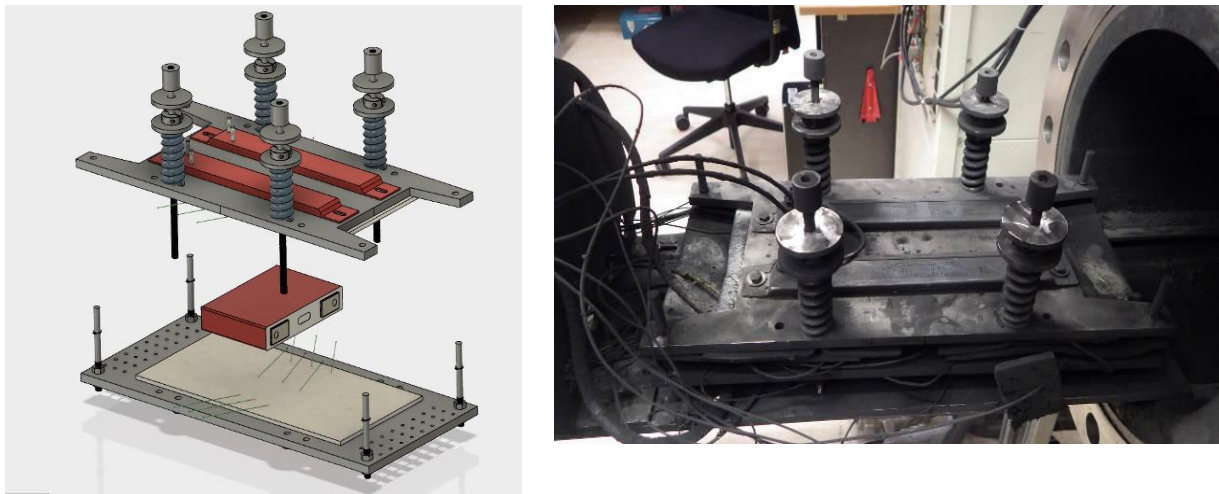


Abbildung 10: Aufbau eines Thermal Runaway Versuchs

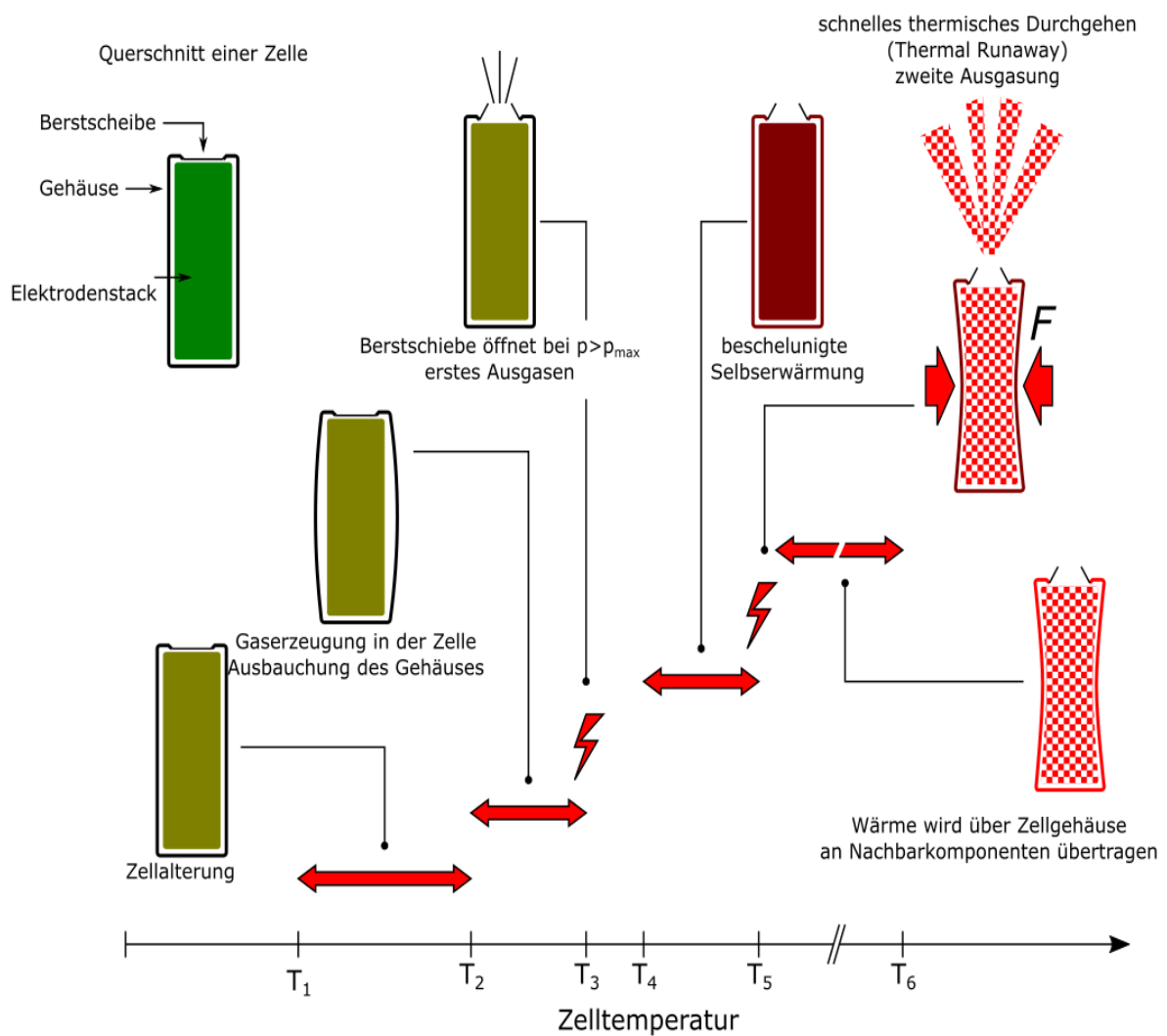


Abbildung 11: Ereignisse während eines Thermal Runaway Experiments

### 3.4 Temperaturbeständigkeit der Thermofolie

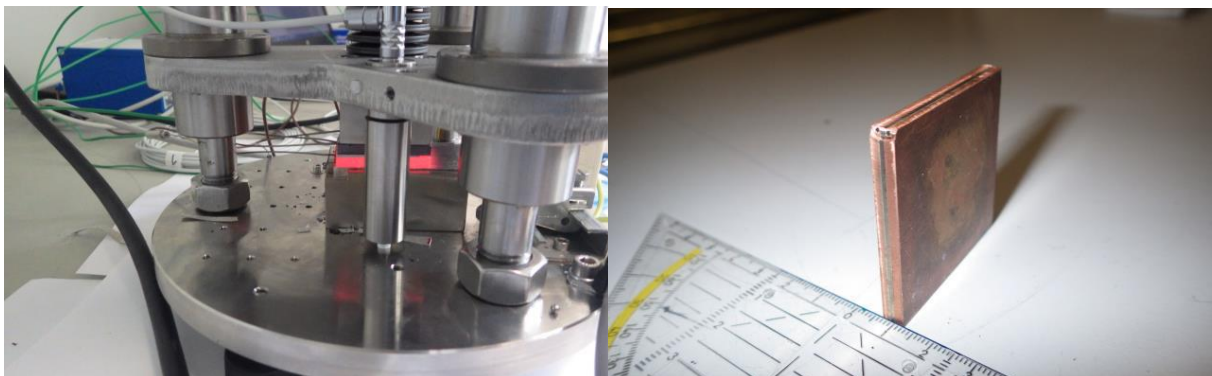
Um die Thermalfolien bei hohen mechanischen Drücken und Temperaturen auf mechanische und thermische Beständigkeit zu testen, wurden zwei neuartige Folienprüfstände konstruiert. In der finalen Prüfstandsversion konnten die Thermofolien bei Temperaturen bis zu 600°C und mechanische Drücken bis zu 2 MPa vermessen werden.

Für die gleichzeitige Bestimmung des Wärmeleitwertes  $\lambda$  der Thermofolie wurden sogenannte „Thermoshunts“ entwickelt und hergestellt. Die Thermoshunts haben einen geschichteten Aufbau aus hartverlöteten *Kupfer – Edelstahl – Kupfer* Schichten. Die Kupferschichten beinhalten Langlöcher für die Aufnahme von Thermoelementen zur Messung der Temperaturdifferenz an der Stahlschicht. Mit bekannter Wärmeleitfähigkeit des Stahls (ca. 20 W/mK) und den konstanten geometrischen Dimensionen wird der Wärmefluss durch den Thermoshunt berechnet:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\lambda_{Stahl}} \cdot \frac{A}{d_{Stahl}}$$

Die Thermoshunts messen den Wärmefluss  $\dot{Q}$  im mechanisch verpressten Aufbau aus *Heizelement - Thermoshunt<sub>1</sub> - Thermofolie - Thermoshunt<sub>2</sub> - Wärmesenke* sowie die Temperaturen auf der heißen ( $T_h$ ) und kalten ( $T_k$ ) Fläche der Thermofolie. Mit der ebenfalls gemessenen Dicke ( $d_{Folie}$ ) und der konstanten Fläche ( $A$ ) der Thermofolie ergibt sich deren Wärmeleitfähigkeit zu

$$\lambda_{Folie} = \frac{\dot{Q}}{T_h - T_k} \cdot \frac{d_{Folie}}{A}$$



**Abbildung 12: Links: Detail des Folienprüfstands in Betrieb (Heizelemente leuchten orange). Rechts: ein fertiger Thermoshunt.**

## Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen beispielhaft das Schrumpfen der Dicke und die Wärmeleitfähigkeit einer Thermofolie welche bei einem vorgegebenen Druck von 500 kPa in 50°C Schritten einseitig von Raumtemperatur bis 600°C erwärmt wurde. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{Folie}$  bewegt sich zwischen 0.5 W/mK und 0.8 W/mK, ab 300 °C. Die Folie dehnt sich bis 300°C leicht aus, schrumpft aber ab 300°C auf 0.7 mm.

Die von den Projektpartnern erstellten Folien wurden in solchen standardisierten Versuchen charakterisiert und bewertet. Thermofolien auf Aerogel- oder Mica-basis zeigten die geringsten Veränderungen über den Versuch hinweg. Referenzmessungen an Materialien mit bekannter Wärmeleitfähigkeit und vernachlässigbarer Dickenänderung (Stahl, Silizium, Kupfer und Mica) dienten zur Kalibrierung des Folienprüfstandes.

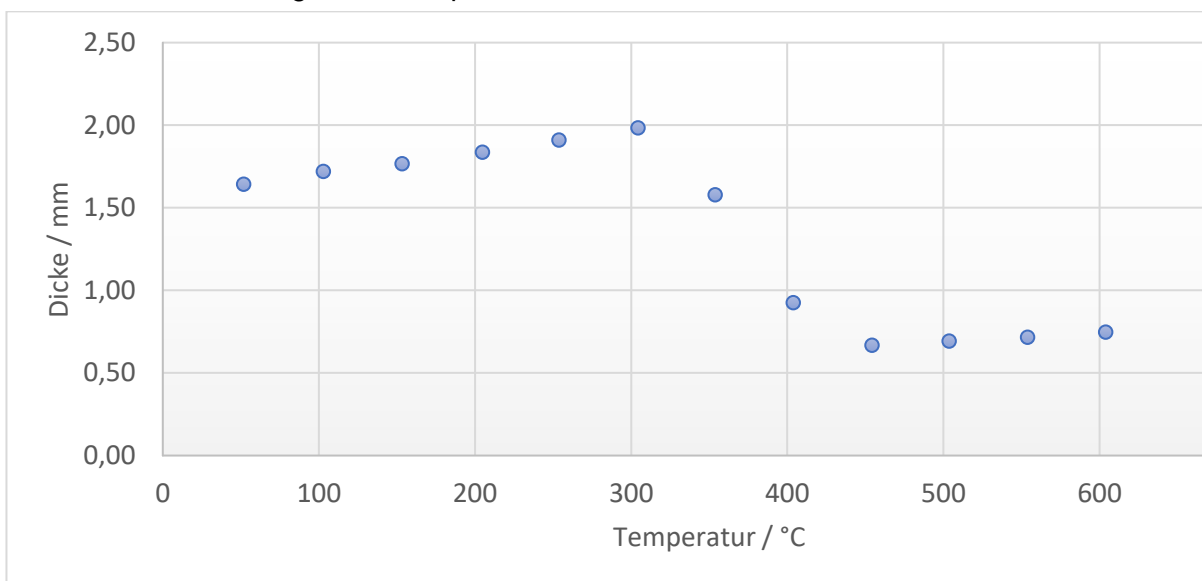


Abbildung 13: Ausdehnung der Folie bei verschiedenen Temperaturen

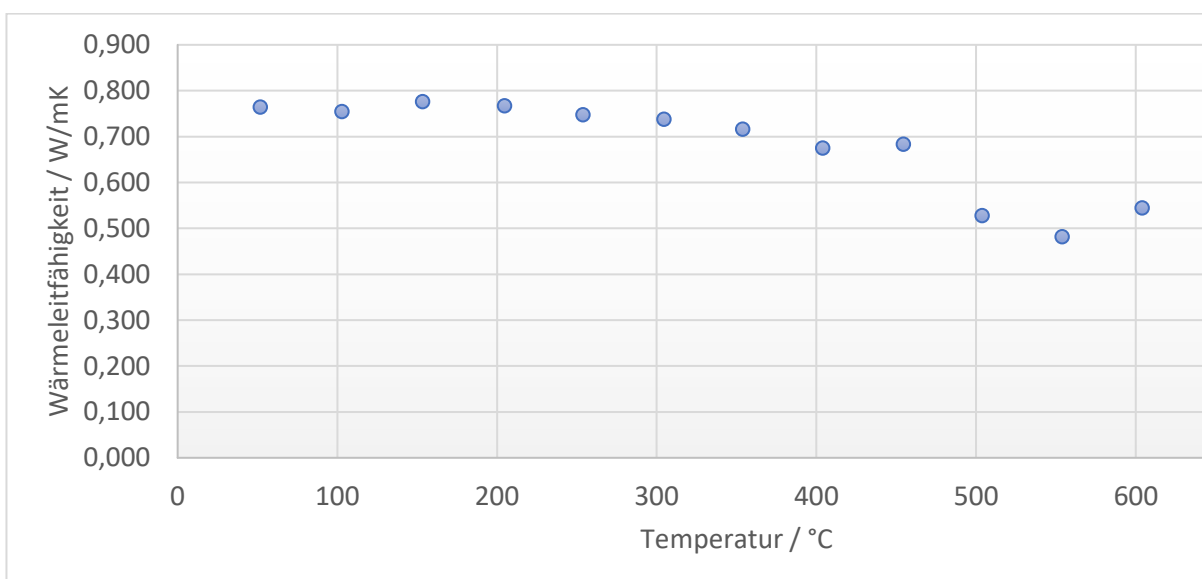


Abbildung 14: Spezifische Wärmeleitfähigkeit der Folie bei verschiedenen Temperaturen

### 3.5 Thermal Runaway Simulationen

Thermal Runaway (TR) Simulationen dienen der Sicherheitsbewertung verschiedener Modulkonzepte und dem Verständnis der Fehlerausbreitung (TR-propagation) in einem Modul. Es wurden Simulationsframeworks in zwei Detailstufen ausgearbeitet. Für eine schnelle Simulation wurde ein Batteriemodul als ein Netzwerk aus Wärmequellen, Wärmesenken und Wärmeleitern in LT-SPIICE abgebildet. Für die Detailsimulation wurde ein vollständiges 3D Modell des Moduls vernetzt und die TR-ausbreitung wurde mittels chemisch-thermischen gekoppelten Lösers in ELMER simuliert.

Die Wärmeleichung besteht aus Termen für lokale Wärmeänderung, Wärmeleitung (mit Berücksichtigung der stark anisotrope Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  innerhalb einer Zelle) und Wärmeerzeugung aufgrund lokaler exothermer chemischer Zersetzungsvorgänge:

$$\rho C_p \dot{T} + \nabla(\lambda \Delta T) = \dot{q}$$

Dabei wird die Wärmeerzeugung  $q$  mit einem vereinfachten chemischen Ausdruck angesetzt

$$\dot{q} = -H \dot{c}(T, c)$$

mit der Enthalpieänderung  $H$  der exothermen Reaktion und der Eduktkonzentration  $c$ . Die Reaktionsrate hängt von der Temperatur und der Konzentration ab und ergibt sich aus Thermal Runaway Versuchen an Einzelzellen.

Abbildung 15 zeigt beispielhaft die simulierte Ausbreitung des Thermal Runaways in einem fiktiven Modul aus acht prismatischen Li-Ionen Zellen. Der Thermal Runaway wird lokal durch einen simulierten internen Kurzschluss in der zweiten Zelle ausgelöst. In den weiteren Zeitschritten breitet sich der Thermal Runaway auf die gesamte Zelle aus, greift auf die Nachbarzellen über und hat sich im letzten dargestellten Bild bis zur Mitte des Moduls durchgearbeitet.

Es ist erkennbar wie sich die Wärme über verschiedene Wärmebrücken von Zelle zu Zelle ausbreitet und exotherme Reaktionen in den Zellen verursacht. Insbesondere ist interessant, welche Wärmemenge über die untere Kühlplatte, über den direkten Zellkontakt und über die elektrischen Verbinder transportiert wird.

Mit solchen Simulationen können die Einflüsse der Kühlung und der thermischen Isolierung auf den Thermal Runaway Verlauf frühzeitig beurteilt werden.

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

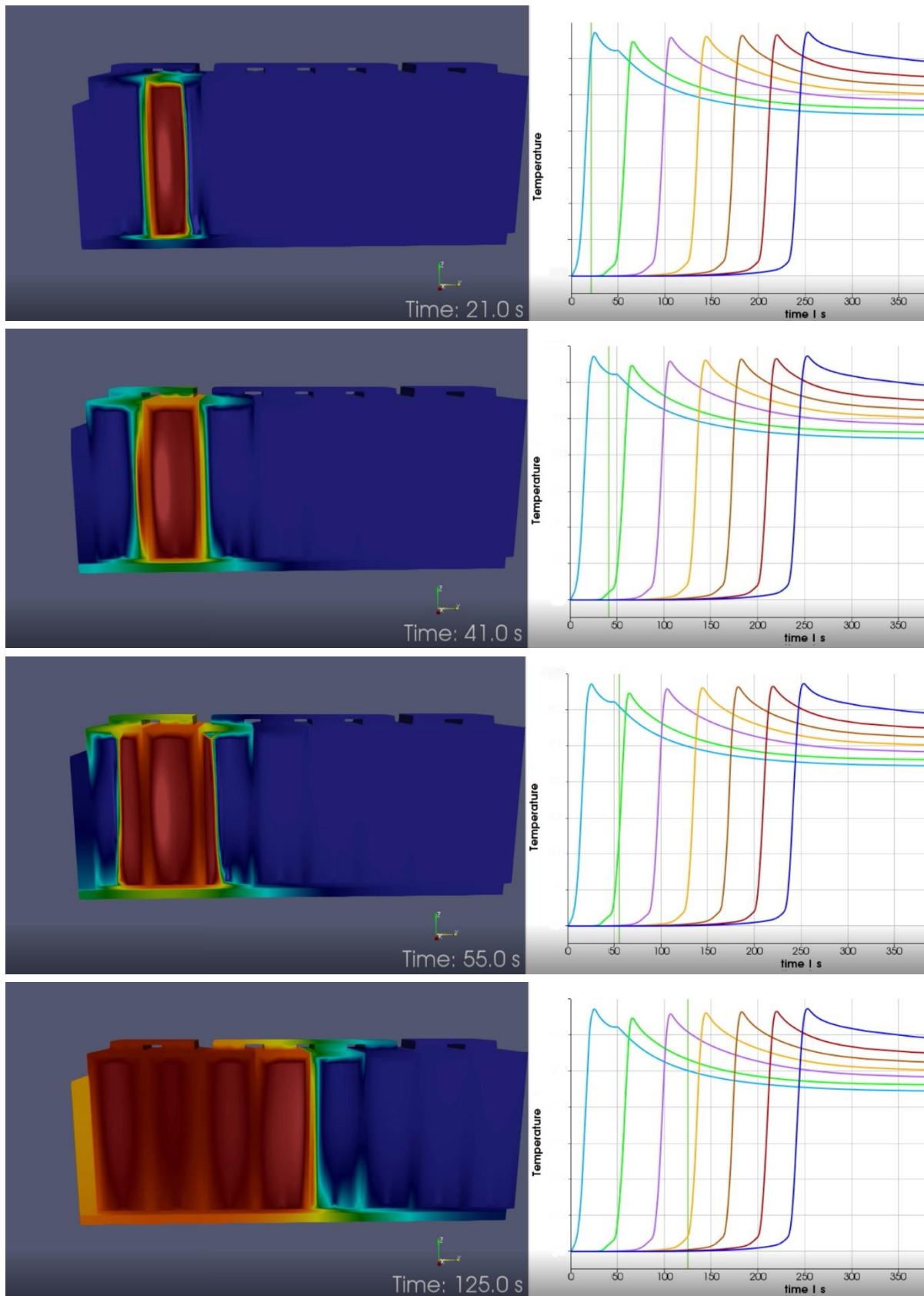
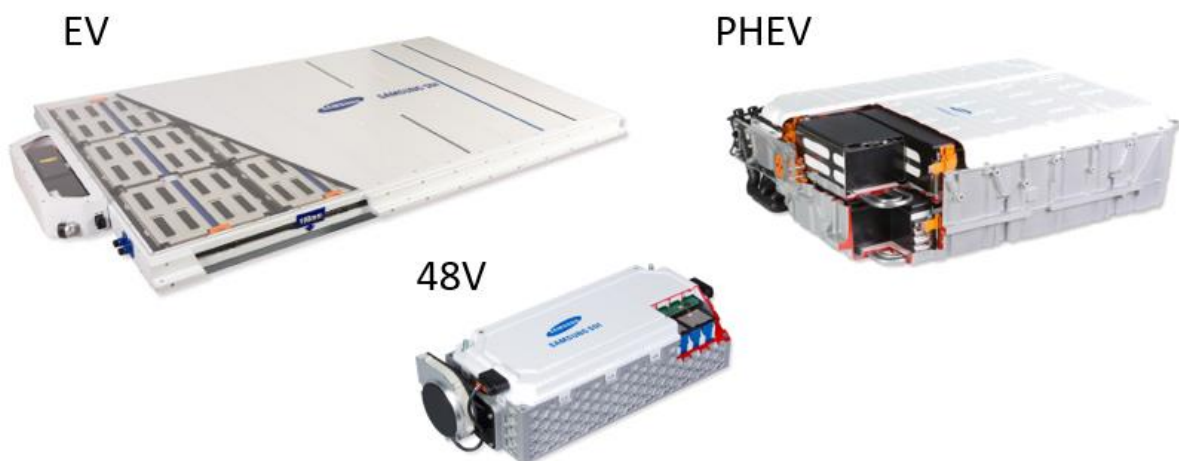


Abbildung 15: FEM Simulation der Ausbreitung des Thermal Runaways in einem fiktiven Modul aus acht fiktiven prismatischen Li-Ionen Zellen. (links) Temperatur im Querschnitt des Moduls. (rechts) Temperaturen in den individuellen Zellen.

### 3.6 Integration ins Batteriesystem

Parallel zur Materialentwicklung wurde im Projektteam die Integration der neuartigen Materialien in ein Batteriekonzept betrachtet. Samsung SDI Battery Systems hat hierbei die führende Rolle übernommen und die Entwicklungen der anderen Partner in ein Pack- und Modulkonzept übernommen. Gleichzeitig wurden die dabei gewonnenen Erkenntnisse und die abgeleiteten Anforderungsprofile an das Projektkonsortium berichtet, um eine optimale Abstimmung des Batteriekonzepts und der eingesetzten Thermofolien zu erreichen.

Die Kernkompetenzen von Samsung SDI Battery Systems sind Modulentwicklung, Batteriepackentwicklung, Prototypenfertigung sowie Batteriepackfertigung. Dies beinhaltet die Anwendung neuester Zelltechnologie, die Entwicklung akkurater Softwarefunktionen, die Entwicklung von Elektronik, Elektrik und nicht zuletzt die Entwicklung des Batteriegehäuses. Hier findet die mechanische und thermische Integration Berücksichtigung, wobei ein besonderer Fokus auf höchsten Sicherheitsstandards liegt. Hauseigene Testlaboratorien versichern, dass die höchsten Sicherheitsziele, beste Qualität und erforderliche Standards der Automobilindustrie erfüllt werden.



**Abbildung 16: Samsung SDI Battery Systems entwickelt Batterien für die elektrifizierten Antriebsstränge der Zukunft: für rein elektrische Fahrzeuge (EV), Plug-In Hybride (PHEV) und als Mild Hybride (48V).**

Die hohen Anforderungen der Fahrzeugindustrie (und letztendlich auch der Endkunden) an die Reichweite der Elektrofahrzeuge und somit an die Energiedichte des Batteriepacks erfordert eine dichte Packung der Zellen in den Batteriepacks. Im unwahrscheinlichen Fall eines Thermal Runaway einer Batteriezelle kann diese dichte Packung zur Ausbreitung (Propagation) des Thermal Runaway führen. Das Ziel im Packdesign ist somit die thermische Isolation der Zellen zueinander und allgemein das Wärmemanagement im Thermal Runaway. Auf Basis eines konkreten, bereits vorhandenen CAD-Konzepts eines großen Energiespeichers wurden die Wärmebrücken einer Zelle zu ihren Nachbarn, zu anderen Strukturen, zur Umgebung sowie die entsprechenden Wärmekapazitäten ermittelt. Dies

## Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

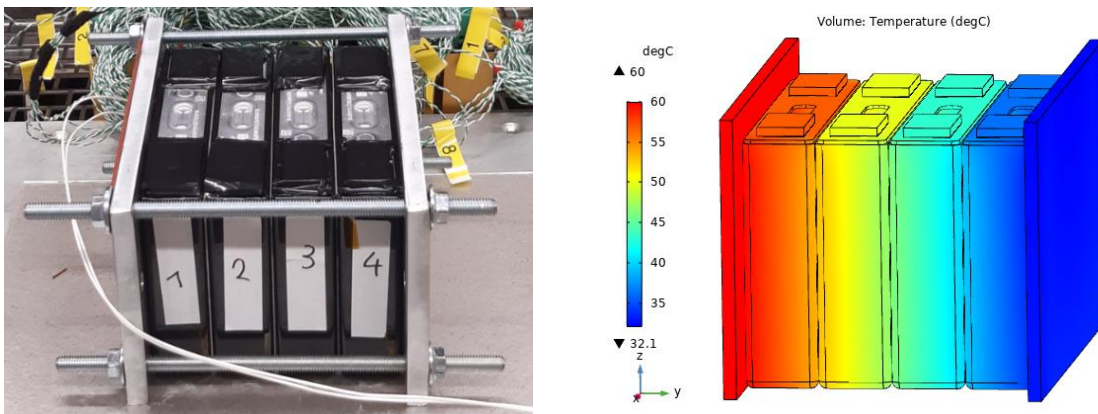
Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

passierte anhand der Querschnitte, Längen, Materialdaten und Literaturdaten. Die Wärmebrücken wurden anschließend in Simulationen beurteilt.

Aus den Erkenntnissen dieser Studie wurde dann ein neues Design entwickelt, um eine deutlich verbesserte Sicherheit im Fall des Thermal Runaway zu erzielen. Im Zellstack wurde die im Projekt entwickelte intumeszente Folie zwischen den Zellen eingebaut. Diese minimiert im Fehlerfall den direkten Wärmefluss zu den Nachbarn der beschädigten Zelle. Die restlichen Wärmebrücken wurden gemäß den Anforderungen im Konzept optimiert. Das Verhalten der Batterie bei einem Thermal Runaway wurde bei Samsung SDIBS aus thermischer, elektrischer und mechanischer Sicht simuliert. Alle Simulationsergebnisse wurden mit geeigneten Prinzipversuchen abgeglichen und validiert.

Besondere Beachtung fand die Evaluierung der mechanischen Festigkeit des Konzepts. Aufgrund der nötigen Einspannung der Batteriezellen (Stichwort Zell-Swelling) wirkt auch auf die im Projekt entwickelten Zellspacer eine nicht zu vernachlässigende Kraft. Die Kompressionskraft wurde aus den Zelldaten abgeleitet, mithilfe von mechanischen Simulationen bestätigt und in Entwicklungsschleifen mit dem Projektteam abgestimmt.

Im Anschluss an die Entwicklung wurden bei SDIBS Testmodule im neuen Design aufgebaut und mit diesen Modulen Tests durchgeführt. Dabei wurde evaluiert, wie der Einsatz der entwickelten Folien das Propagationsverhalten verändert.



**Abbildung 17: Prinzipversuch zur Modellvalidierung inkl. Validierung durch Simulation.**

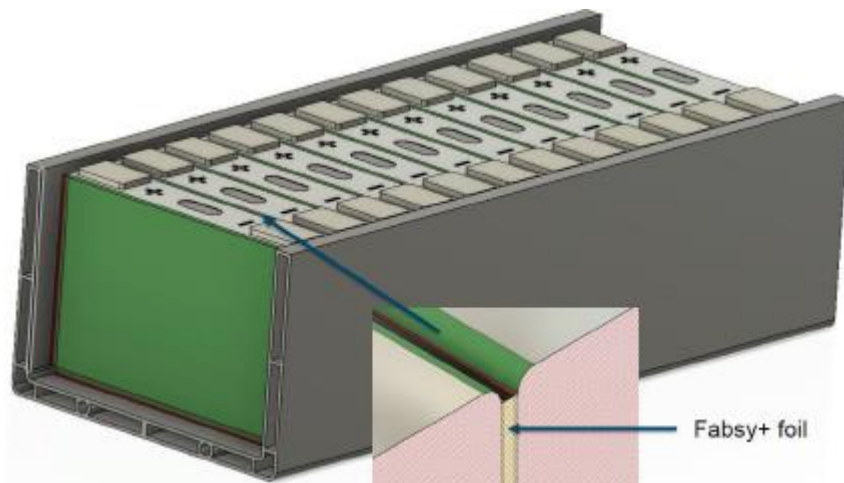


Abbildung 18: Konzeptzeichnung des neuen Batteriemoduldesigns.

## 3.7 Lichtbogentests

Eines der Ziele war die Erforschung und Findung relevanter Signalparameter für eine zuverlässige Lichtbogendetektion im Batteriesystem. Dabei sollte der Einsatz der Lichtbogenerkennung als Batterieüberwachung in Serien-Elektrofahrzeugen vorbereitet werden. Hierzu waren mehrere Arbeitsschritte notwendig:

- Anpassung der Messelektronik zur Signalerfassung an die Spannungen und Strombereiche eines Batteriesystems.
- Aufnahme und Auswertung der Signale von Kontaktlichtbögen im Batteriesystem die mittels Lichtbogengenerator erzeugt werden
- Identifikation der relevanten Signalparameter und entsprechende Erweiterung der Erkennungsalgorithmen
- Prinziptests und Datenaufnahme am Batterieprüfstand, begleitende Auswertung der Testdaten und daraus abgeleitete Adaption der Mustererkennung zur Detektion und Klassifikation.

### 3.7.1 Erkennung defekter elektrischer Verbinder

Einer der wesentlichen Nachteile von Gleichstromsystemen (DC) ist, dass an Kontaktübergängen, welche nicht direkt verbunden sind, Lichtbögen (Arcs) entstehen können (z.B.: schlecht befestigte Klemmstellen, fehlerhafte Löt- und Schweißverbindungen). Diese wiederum führen zum Abbrand der Kontaktstellen.

Auf Grund der hohen Energie in Batterie- und PV-Systemen kann es in weiterer Folge auch zu großflächigeren Bränden kommen (Vaaßen, 2007) (Brooks, 2011). (Siehe Abbildung 19)



**Abbildung 19: Beispiele zu real auftretenden Lichtbögen (links: Aufschmelzen einer schadhaften Kontaktstelle direkt im PV Modul, mitte und rechts: Brand am Stranganschlußkasten)**

Es gibt bereits seit einigen Jahren, getrieben aus dem PV Markt, Bestrebungen DC Lichtbögen zu detektieren und entsprechend abzuschalten (Haeberlin, 2010).

Die USA stellen sich dabei als Vorreiter dar, und fordern bereits normativ eine Erkennung und Abschaltung von Lichtbögen zumindest in der seriellen Verkabelung (UL1699B, 2011) (NEC, 2011).

Zur Lichtbogenerkennung in Batteriesystemen sind akustische oder optische Verfahren bekannt (Cattin, 2013) (Dahmani, 2015). Neuerdings wurden auch Verfahren die auf Strom / Spannungssignalanalyse basieren für den Einsatz in Batteriesystemen betrachtet (Strobl, 2014) (Augeard, 2015).

Der Einfluss der hohen Lastdynamik in Elektrofahrzeugen auf die Fehlauflösungsrate ist nicht dokumentiert und konnte im Rahmen dieses Projekts erprobt werden. Darüber hinaus wurde der Einsatz der Mustererkennung zur Bestimmung der Kontaktfestigkeit bei der Produktion von Batteriesystemen grundlegend untersucht.

Für den Trainingszyklus der Batterielichtbogenerkennung wurden nach dem Aufbau eines Hardware-Prototyps mehrere Sequenzen von Lichtbogentests durchgeführt. Der Fokus der Datenerfassung lag auch auf Arcs im Batteriestrang während dynamischer Fahrprofilemulationen am Zyklisierer. Der Zyklisierer ist ein Simulator zur Ladung / Entladung der Batterie, wie beim Realbetrieb im Fahrzeug.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 20 dargestellt. Der Lichtbogengenerator ist am Minuspol des Batteriepacks geschaltet. Alternativ wurden auch Arcs am Pluspol gezogen. Die Prototypenbox „ABME“ mit den Stromsensoren befindet sich im Minuszweig bzw. alternativ im Pluszweig. Sensorik, Signalkonditionierung und Wandlung sowie Verarbeitung und Speicherung auf SD-Karte erfolgt mit den ABME Modulen. Zur besseren Zuordnung der Datensätze wird in den Modulen eine Echtzeituhr verwendet.

Hierzu konnten durch Kopplung vom Arc Generator mit der Teststandsoftware mittels periodischer automatischer Triggerung der Lichtbogenzündung ab dem zündbaren Strom von 10 A in Summe 134 Datensätze aufgenommen werden. Weiters wurden auch Lichtbögen im positiven Pfad der Batterie gezündet sowie Arcs bis zu 120 A aufgezeichnet.

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

Insgesamt konnten somit 618 Datensätze mit unterschiedlichen Lichtbogenparametern (Separationsgeschwindigkeit zwischen 0,5 mm/s und 20 mm/s; Abstand zwischen 0,5 mm und 10 mm, siehe Tabelle 3) gespeichert werden.

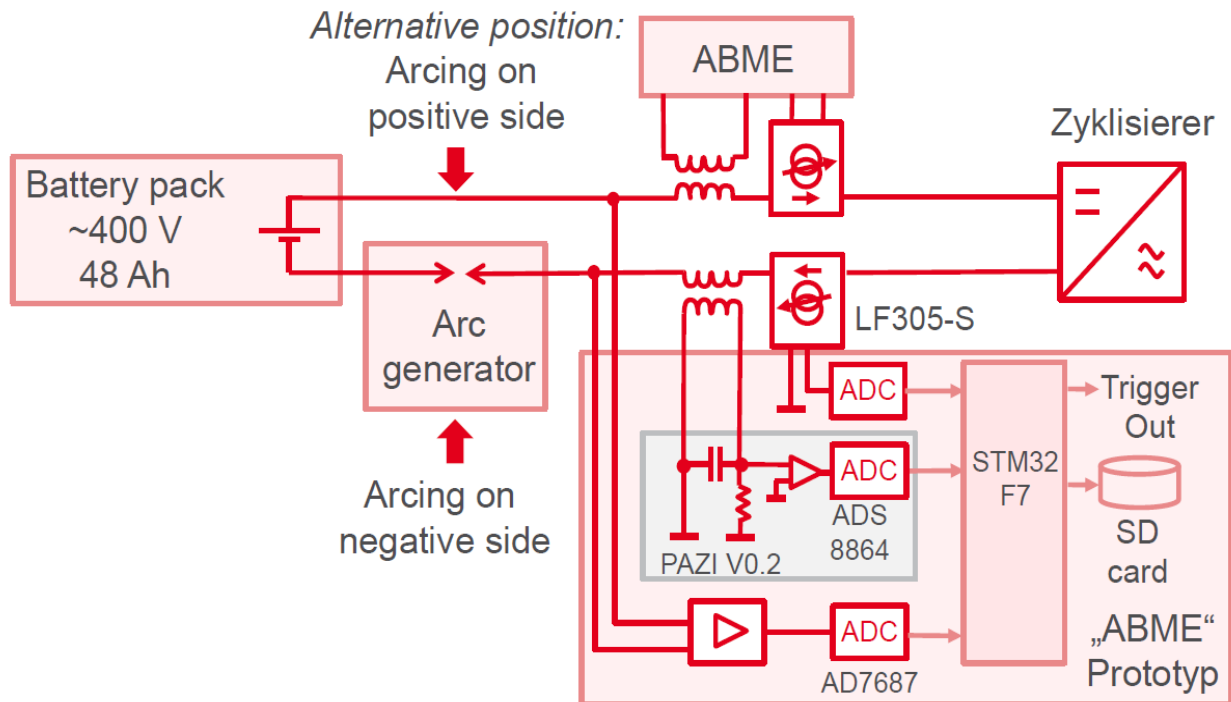


Abbildung 20: Skizze des Versuchsaufbaus

Tabelle 3: Testzyklen

Testlauf	# Test s	Betriebsart Zyklisierer	Strom [A]	Lichtbogen Leistung [W]	d; v [mm]; [mm/s]
0	41	Entladen & Laden	+/-20	~400	0.5; 0.5
1	48	Entladen & Laden	+/-20	~400	0.5 ... 2; 0.5 ... 5
2	19	Laden	+50	~1000	0.5 ... 5; 0.5 ... 10
3	85	Entladen	-20 & -40	~400 & ~800	0.5 ... 2; 0.5 ... 5
4	163	Laden & Entladen	+/-10 ... +/-80	~250 ... ~2500	0.5 ... 4; 0.5 ... 15
5 <sup>1</sup>	26	Laden + Dyn. Profil	+50	~400	0.5; 1
6	50	Laden & Entladen	+100 & -100	~1800 ... ~2700	1 ... 4; 1 ... 15
7	120	Dyn. Profil	~+/- 100	~250 ... ~2500	0.5; 1

<sup>1</sup> Arcs sind anfangs abgerissen. Erst nach dem Referenzieren der Elektroden für die Kontaktüberprüfung konnte eine stabile Zündung erreicht werden.

8	66	Dyn. Profil, Laden & Entladen	+120	~400 ... 4638	0.5 ... 5; 1 ... 10
Gesamt:	618				

### 3.7.2 Vorverarbeitung und Aufbereitung der Daten

In Tabelle 3 sind die unterschiedlichen Tests zusammengefasst. Von den 618 Datensätzen konnten 599 für den Trainingszyklus verwendet werden. Bei 19 Datensätzen gab es Speicherfehler vom externen RAM am ABME Modul zur SD-Karte. Im ersten Schritt der Auswertung wurden für den Trainingszyklus die Rohdaten aufbereitet und jeder Datensatz manuell klassifiziert und kommentiert. Ein Beispiel für einen Rohdatensatz zeigt Abbildung 21. Dabei ist das Signal  $I_{dc}$  vom Stromsensor LF305-S,  $U_{dc}$  von der differentiellen hochohmigen Spannungsmessung und  $P_{azi}$  das eigentliche Rohsignal  $s[mN+n]$ , welches mit 375 kS/s abgetastet wurde und eine Auflösung von 16 bit hat. Durch Blockverarbeitung lässt sich in der Echtzeitanwendung die Rechenlast reduzieren. Die Anzahl der Samples pro Block  $N \in \mathbb{N}$  ist in unserem Fall 2048. Die diskrete Zeit  $mN+n$  ergibt sich mit dem Blockindex  $m \in \mathbb{Z}$  und dem Sampleindex  $n \in \mathbb{Z}$  innerhalb eines Blockes.

Im Rahmen der Vorverarbeitung wurde das Spektrum  $S_m[k]$  mittels gefensterter Kurzzeit Fourier Transformation entsprechend  $S_m[k] = \sum_{n=-N}^{N-1} w[n]s[mN+n]e^{-i2\pi\frac{(n+N)k}{2N}}$  berechnet. Hier ist  $k \in [0,1]$  der Frequenzindex. Als Fensterfunktion wurde ein Hann Fenster  $w[n] = 0.5(1 - \cos\frac{2\pi(n+N)}{2N})$  gewählt.

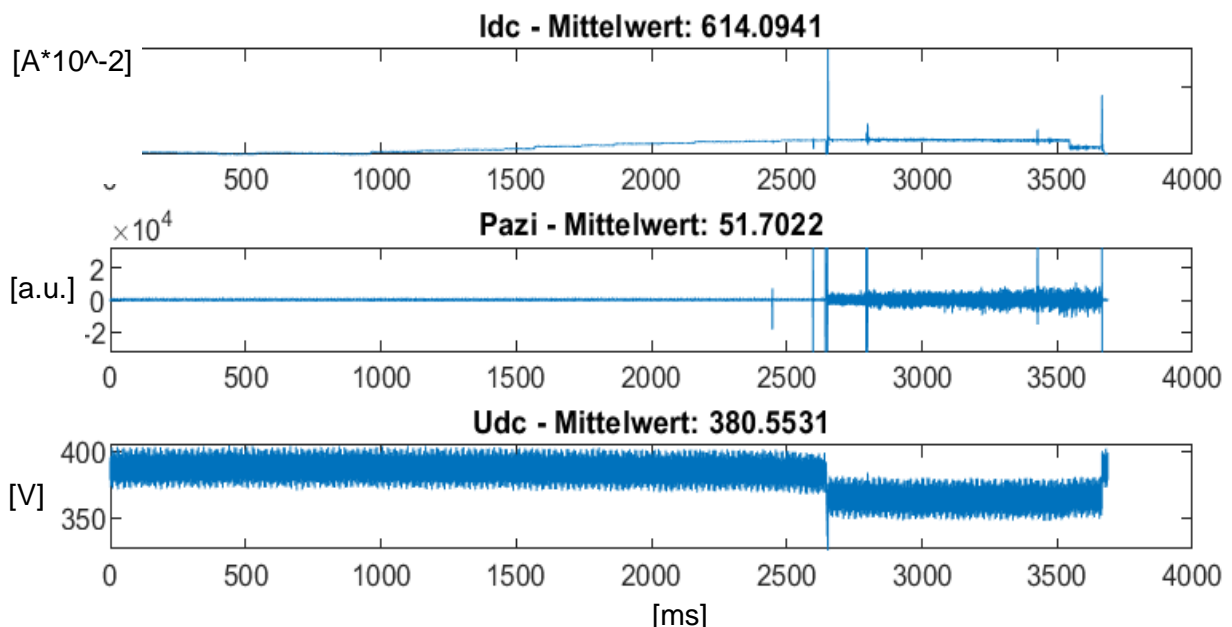


Abbildung 21: Rohdatensatz aufgezeichnet mit dem ABME Prototyp.

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

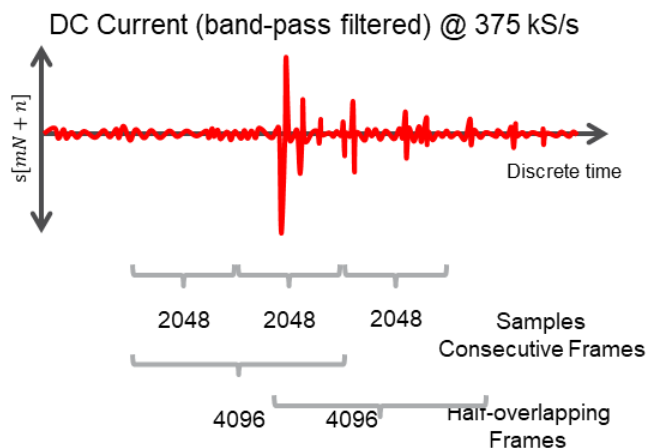


Abbildung 22: Aufteilung des Rohsignals für die Blockverarbeitung

### 3.7.3 Manuelle Klassifizierung

Für die manuelle Klassifizierung wurden die Oszilloskop Messungen von Strom und Spannung am Lichtbogen sowie Spannungen an der Batterie und am Zyklierer verwendet. Zusätzliche Information lieferten die Plots der Rohdaten, die spektrale Darstellung im Wasserfalldiagramm sowie Plots der gemittelten Spektren vor und nach einer Lichtbogenzündung. Dabei wurde der Zündzeitpunkt semiautomatisch festgelegt. Unter anderem wurde bei den Hintergrundmessungen ein interessanter Bereich gewählt (z.B. das Zu / Wegschalten vom Zyklierer od. Beschleunigungs / Bremssequenzen in den dynamischen Fahrprofilen). Als Beispiele sind im folgenden zwei Datensätze dargestellt: Entladen bei 120 A (Abbildung 23 & Abbildung 24) und dynamisches Fahrprofil bei 23 A (Abbildung 25 & Abbildung 26).

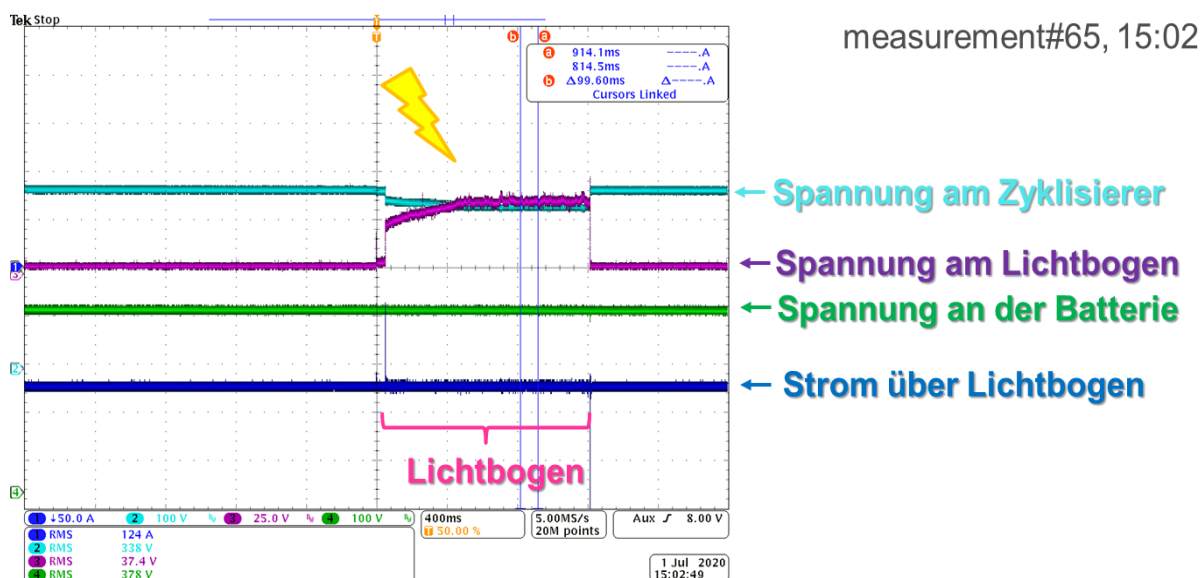


Abbildung 23: Entladen bei 120 A, Lichtbogen mit 1 mm/s und 5 mm Elektrodenabstand

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

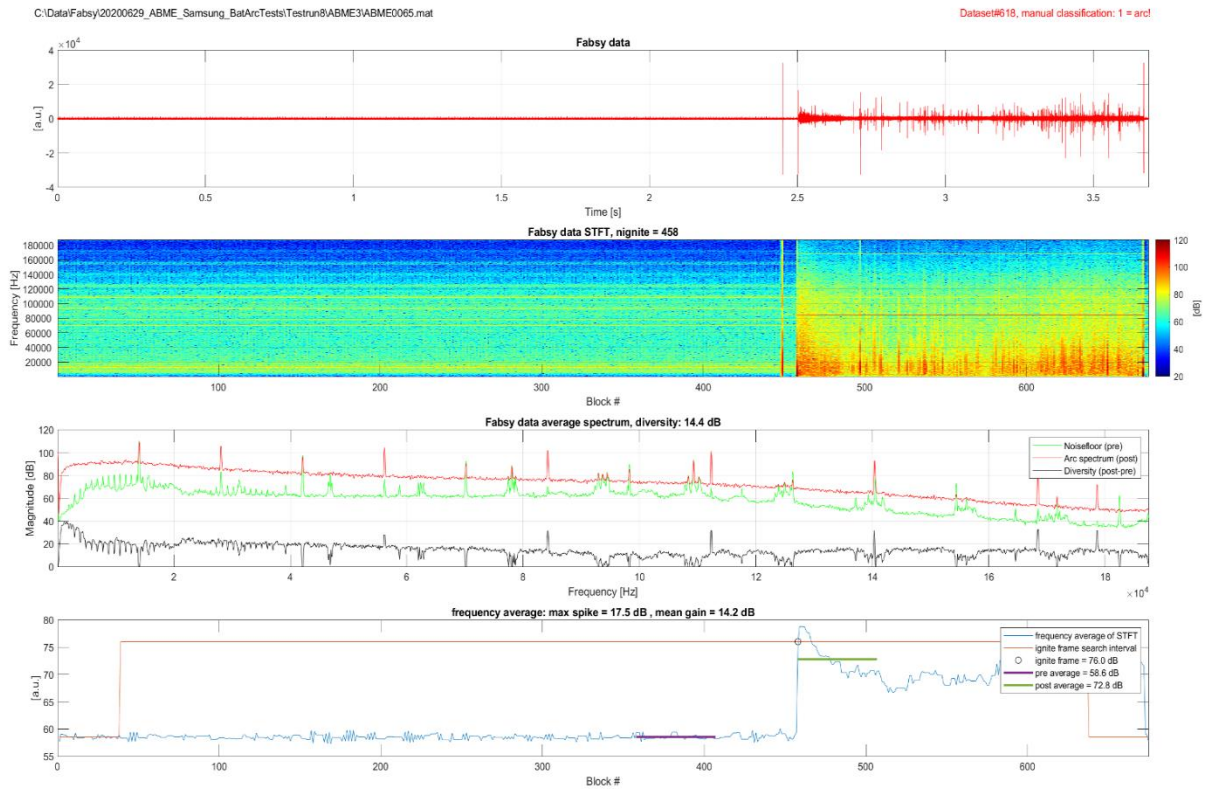
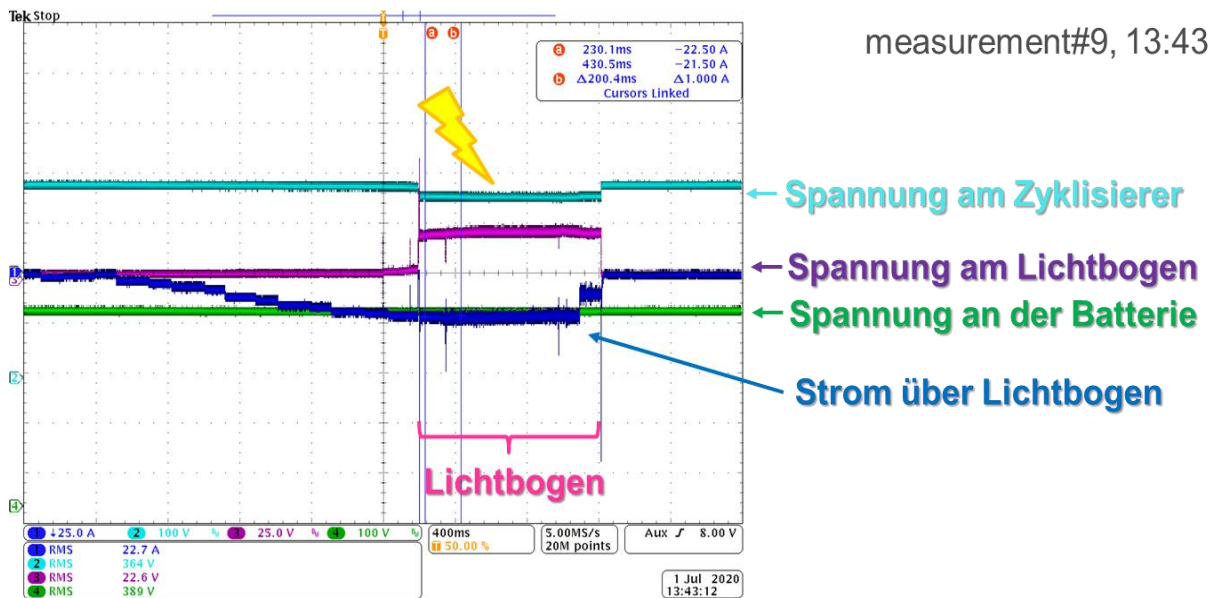


Abbildung 24: Entladen bei 120 A, Spektrale Auswertung und Bestimmung des Zündzeitpunktes

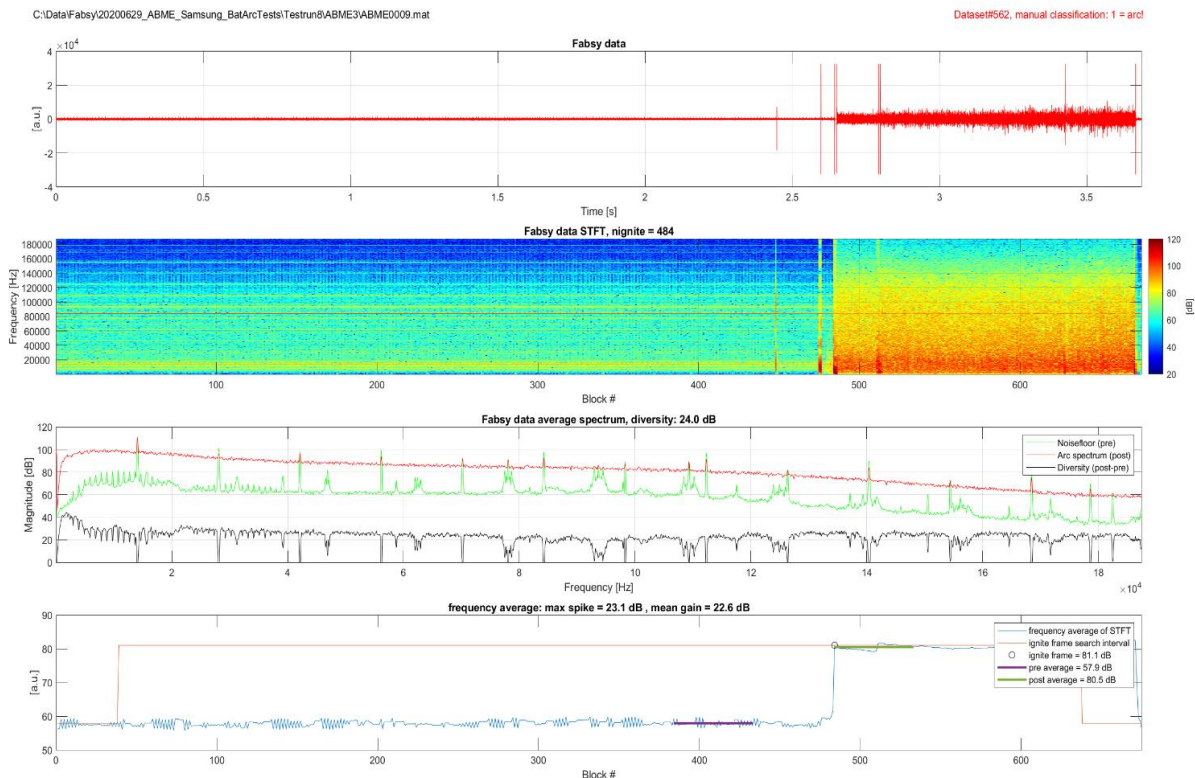


measurement#9, 13:43

Abbildung 25: Dynamisches Profil, Lichtbogen beim Entladen mit 23 A, 1 mm/s, 0.5 mm Elektrodenabstand

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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



**Abbildung 26: Dynamisches Profil, Spektrale Auswertung und Bestimmung des Zündzeitpunktes**

Die Bereiche mit Lichtbögen kann man aus den Oszilloskop Messungen eindeutig bestimmen. Hier ist die Spannung zwischen den Elektroden des Lichtbogengenerators typischerweise im Bereich von 20 V bis 40 V. Während der Zündung vom Lichtbogen kann es zu einem kurzen Einbruch des Stroms kommen. Dies ist als Ausschlag in der DC Messung gut sichtbar (Abbildung 23). Während der Lichtbogen brennt, ist nur eine leichte Schwankung im DC Strom sichtbar. Erst im AC ausgekoppelten Sensorsignal (oberster Plot in Abbildung 24) ist das hochfrequente Rauschen des Lichtbogens erkennbar. Noch klarer ersichtlich wird dies durch die Spektralanalyse (STFT Plot in Abbildung 24). Das mittlere Spektrum während dem Lichtbogen und vor dem Lichtbogen (Grundrauschen) zeigt die typische Schaltfrequenz und Oberwellen im Umrichter des Zyklisierers. Die Differenz der gemittelten Spektren ist die Grundlage zur Berechnung der Gesamtdiversität als ein Maß für den Unterschied zwischen Lichtbogen und Grundrauschen. Zur Mittelung der frequenzabhängigen Diversität wurde der Medianwert über das gesamte Differenzspektrum gebildet. Damit wurden Schaltfrequenzen sowie Resonanzüberhöhungen ausgeblendet. Bei hohen Strömen wird die Diversität geringer (14.4 dB bei 124 A in Abbildung 24 verglichen zu 24 dB bei 23 A in Abbildung 26). Für jeden Block wurde auch ein Frequenzmittelwert des STFT Spektrums gebildet (unterster Plot in Abbildung 24 und Abbildung 26). Dieser wurde für die semi-automatischen Zündzeitpunktbestimmung verwendet. Für alle Datensätze wurden die Zündzeitpunkte eruiert und manuell überprüft und angepasst. Um die Datenbasis zu erhöhen, wurden auch Datensätze einer zweiten Testkampagne entsprechend segmentiert und integriert. Die

Datenbasis ist in Tabelle 4 zusammengefasst. Sie umfasst 519 Datensätze mit Lichtbögen sowie 294 Datensätze mit anderen Ereignissen (Zyklisiererzuschalten, Umschalten sowie Sequenzen aus den dynamischen Fahrprofilen). Insgesamt waren somit 813 Datensätze für das Training verfügbar.

**Tabelle 4: Datenbasis der Battierarctests**

Date	arcs	#no arcs (bkgr)	#not valid	Total:
20200629	434	165	19	618
20180731	86	129	20	235

### 3.7.4 Feature extraktion

Die Rohfeatures wurden zum Vektor  $\mathbf{f}_m = (\mu_m \zeta_m \xi_m \dots \kappa_{m,1} \dots \kappa_{m,N_b})^T$  mit der Länge 136 zusammengefasst.

Dabei ist der Mittelwert  $\mu_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s[mN + n]$ , das Minimum  $\zeta_m = \min_{n \in [0, N]} s[mN + n]$ , das Maximum  $\xi_m = \max_{n \in [0, N]} s[mN + n]$ , die Varianz  $\sigma_m^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (s[mN + n] - \mu_m)^2$ , die Standardabweichung  $\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (s[mN + n] - \mu_m)^2}$ , der Median  $\tilde{\mu}_m = \text{median} s[mN + n]$ , die Schräge  $\varsigma_m = \frac{1}{N} \left( \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (s[mN + n] - \mu_m)^2 \right)^{-1.5} \sum_{n=0}^{N-1} (s[mN + n] - \mu_m)^3$ , die Wölbung  $\kappa_m = \frac{1}{N} \left( \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (s[mN + n] - \mu_m)^2 \right)^{-2} \sum_{n=0}^{N-1} (s[mN + n] - \mu_m)^4$ . Mit  $N_b$  Frequenzbins pro Teilband (in unserem Fall sind das 32 Bänder à 5869.4 Hz) ergeben sich weiters die Teilbandmittelwerte  $\mu_{m,b} = \frac{1}{N_b} \sum_{k=bN_b}^{(b+1)N_b-1} S_m[k]$ , die Teilbandvarianzen  $\sigma_{m,b}^2 = \frac{1}{N_b-1} \sum_{n=bN_b}^{(b+1)N_b-1} (S_m[k] - \mu_{m,b})^2$ , die Teilbandschiefen  $\varsigma_{m,b} = \frac{1}{N_b} \left( \frac{1}{N_b} \sum_{n=bN_b}^{(b+1)N_b-1} (S_m[k] - \mu_{m,b})^2 \right)^{-1.5} \sum_{n=bN_b}^{(b+1)N_b-1} (S_m[k] - \mu_{m,b})^3$  und die Teilbandwölbungen  $\kappa_{m,b} = \frac{1}{N_b} \left( \frac{1}{N_b} \sum_{n=bN_b}^{(b+1)N_b-1} (S_m[k] - \mu_{m,b})^2 \right)^{-2} \sum_{n=bN_b}^{(b+1)N_b-1} (S_m[k] - \mu_{m,b})^4$ .

Als letzter Schritt der Vorverarbeitung wurde für jeden Datensatz ein Featurevektor  $\mathbf{f} = (\boldsymbol{\mu}_{pre}^T \dots \boldsymbol{\kappa}_{pre}^T \boldsymbol{\mu}_{post}^T \dots \boldsymbol{\kappa}_{post}^T \boldsymbol{\mu}_\Delta^T \dots \boldsymbol{\kappa}_\Delta^T)^T$  der Länge 2856 aus der Rohfeaturesequenz  $\mathbf{f}_m$  berechnet. Dazu wurde die Sequenz in aufeinanderfolgende  $M \in \mathbb{N}$  Beobachtungsblöcke unterteilt. In unserem Fall waren das je 50 Blöcke, was einer Beobachtungszeit von 273 ms entspricht (Abbildung 27). Dies war gleichzeitig auch die durchschnittliche Dauer bis zur Triggerung der Erkennung eines Lichtbogens im System. Eingeteilt wurde auch in den Pretriggerbereich mit gleicher Länge  $M$  wie der Posttriggerbereich. Zwischen Pre- & Posttriggerbereich lagen nochmals  $M$  Blöcke Übergangsbereich die nicht für die Modellbildung verwendet wurden. Hier konnte es zu Vorzündungen kommen, aber auch gewöhnliche Umschaltvorgänge mit kurzen Schaltlichtbögen, die nicht zu Fehlauflösungen führen sollten. Die einzelnen Features aus Pre- & Posttriggerbereich berechnen sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \text{Mittelwert:} \quad & \boldsymbol{\mu}_{pre} = \frac{1}{N} \sum_{m=\tilde{m}-2M}^{\tilde{m}-M-1} \mathbf{f}_m & \boldsymbol{\mu}_{post} = \frac{1}{N} \sum_{m=\tilde{m}}^{\tilde{m}+M-1} \mathbf{f}_m & \boldsymbol{\mu}_\Delta = \boldsymbol{\mu}_{post} - \boldsymbol{\mu}_{pre} \\
 \text{Minimum:} \quad & \boldsymbol{\zeta}_{pre} = \min_{m \in [\tilde{m}-2M, \tilde{m}-M-1]} \mathbf{f}_m & \boldsymbol{\zeta}_{post} = \min_{m \in [\tilde{m}, \tilde{m}+M-1]} \mathbf{f}_m & \boldsymbol{\zeta}_\Delta = \boldsymbol{\zeta}_{post} - \boldsymbol{\zeta}_{pre} \\
 \text{Maximum:} \quad & \boldsymbol{\xi}_{pre} = \max_{m \in [\tilde{m}-2M, \tilde{m}-M-1]} \mathbf{f}_m & \boldsymbol{\xi}_{post} = \max_{m \in [\tilde{m}, \tilde{m}+M-1]} \mathbf{f}_m & \boldsymbol{\xi}_\Delta = \boldsymbol{\xi}_{post} - \boldsymbol{\xi}_{pre} \\
 \text{Varianz:} \quad & \boldsymbol{\sigma}_{pre}^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{m=\tilde{m}-2M}^{\tilde{m}-M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{pre})^2 & \boldsymbol{\sigma}_{post}^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{m=\tilde{m}}^{\tilde{m}+M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{post})^2 & \boldsymbol{\sigma}_\Delta^2 = \boldsymbol{\sigma}_{post}^2 - \boldsymbol{\sigma}_{pre}^2
 \end{aligned}$$

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

Standardabweichung:  $\sigma_{pre} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=\tilde{m}-2M}^{\tilde{m}-M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{pre})^2}$   $\sigma_{post} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=\tilde{m}}^{\tilde{m}+M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{post})^2}$   $\sigma_{\Delta} =$

$\sigma_{post} - \sigma_{pre}$

Schiefe:  $\zeta_{pre} = \frac{1}{M} \left( \frac{1}{M} \sum_{m=\tilde{m}-2M}^{\tilde{m}-M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{pre})^2 \right)^{-1.5} \sum_{m=\tilde{m}-2M}^{\tilde{m}-M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{pre})^3$   
 $\zeta_{post} = \frac{1}{M} \left( \frac{1}{M} \sum_{m=\tilde{m}}^{\tilde{m}+M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{post})^2 \right)^{-1.5} \sum_{m=\tilde{m}}^{\tilde{m}+M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{post})^3$   $\zeta_{\Delta} = \zeta_{post} - \zeta_{pre}$

Kurtosis:  $\kappa_{pre} = \frac{1}{M} \left( \frac{1}{M} \sum_{m=\tilde{m}-2M}^{\tilde{m}-M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{pre})^2 \right)^{-2} \sum_{m=\tilde{m}-2M}^{\tilde{m}-M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{pre})^4$   
 $\kappa_{post} = \frac{1}{M} \left( \frac{1}{M} \sum_{m=\tilde{m}}^{\tilde{m}+M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{post})^2 \right)^{-2} \sum_{m=\tilde{m}}^{\tilde{m}+M-1} (\mathbf{f}_m - \boldsymbol{\mu}_{post})^4$   $\kappa_{\Delta} = \kappa_{post} - \kappa_{pre}$

Hier sind  $\mu_{\Delta}$ ,  $\zeta_{\Delta}$ ,  $\xi_{\Delta}$ ,  $\sigma_{\Delta}^2$ ,  $\sigma_{\Delta}$ ,  $\zeta_{\Delta}$  und  $\kappa_{\Delta}$  Differenzen zwischen Pre- & Posttriggerbereich.

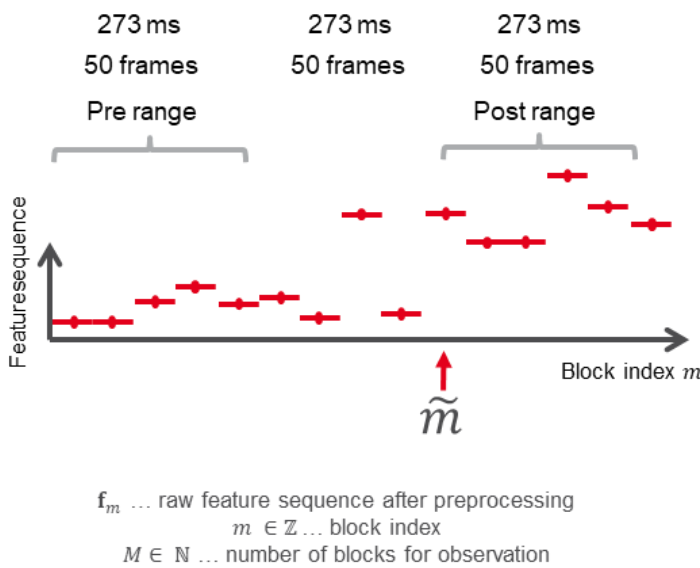


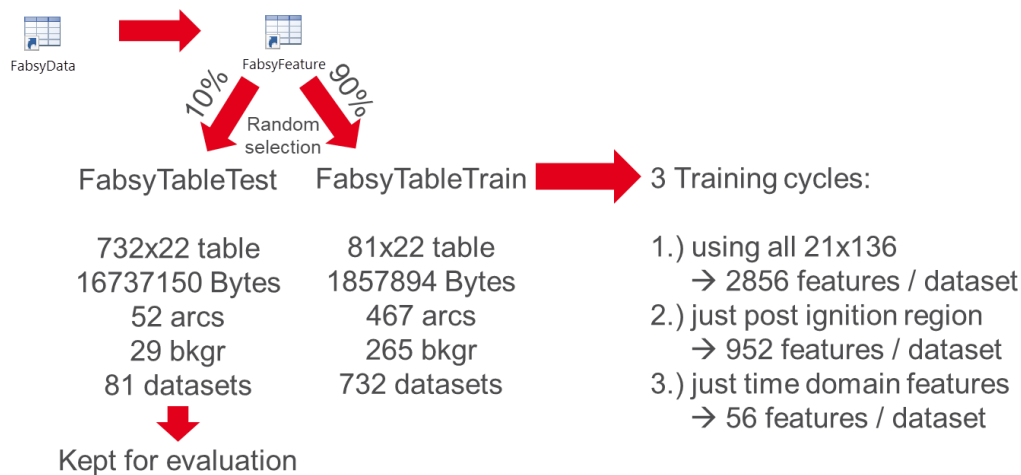
Abbildung 27: Bestimmung des Featurevektors aus der Sequenz von 150 Rohfeatures.

### 3.7.5 Training und Evaluierung

Aus der Datenbasis von 813 Datensätzen wurden zufällig 10% der Lichtbögen sowie 10% der Hintergrundereignisse ausgewählt und abgetrennt (siehe Abbildung 20). Dieses Evaluierungsset wurde später zur Bestimmung der Detektionskennzahlen verwendet. 90% der Daten wurden ins Training geschickt, was 732 Datensätzen entspricht. Drei Zyklen wurden durchgeführt. Beim ersten Zyklus wurde der gesamte Featurevektor verwendet. Beim zweiten Zyklus wurden nur die Posttriggerbereich Features einbezogen (die Pretriggerbereich Features wurden als zusätzliche Hintergrundbereichsdatensätze miteinbezogen, damit erhöhte sich die Anzahl der Datensätze für das Training hier auf 1464). Beim letzten Zyklus wurden schließlich nur die Zeitbereichsfeatures verwendet, wodurch sich eine Reduktion auf 56 Einzelfeatures pro Datensatz ergab. Dies ergab in der Implementierung einen Vorteil durch Reduktion der Rechenlast.

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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



**Abbildung 28: Aufteilung der Datenbasis in Evaluierungs- und Traininsset.**

Bei Verwendung aller Features erhält man mit einem Support vector machine (SVM) Klassifizierer und kubischer Kernelfunktion eine Genauigkeit von 98.8% (Abbildung 29), als einfacher Klassifizierer erreichte k-nearest neighbour (KNN) mit 10 Nachbarn ebenfalls 98%. Im zweiten Zyklus wurde das Training mit 952 Features wiederholt und dabei auch eine Optimierung der Modelle durchgeführt (siehe Abbildung 30). Cubic SVM und gradient boosting classifier (GBC) erreichen beide eine Genauigkeit von 99.5%. Am Testset zeigte sich allerdings, dass der GBC jeweils 1 Lichtbogen nicht erkannte und 1 Hintergrunddatensatz (siehe dazu Abbildung 28) falsch zuordnete, womit sich am Testset eine Trefferrate von 98.5% und eine Falsch-Positiv-Rate von 3.5% ergab. Bemerkenswert ist das beide SVM Klassifizierer (linearer und kubischer Kernel) 100% Genauigkeit am Testset erreichten.

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

1.1	Tree	Accuracy: 97.3%	
Last change: Fine Tree		2856/2856 features	
1.2	Tree	Accuracy: 97.3%	
Last change: Medium Tree		2856/2856 features	
1.3	Tree	Accuracy: 97.3%	
Last change: Coarse Tree		2856/2856 features	
1.4	Linear Discriminant	Failed	
Last change: Linear Discriminant		2856/2856 features	
1.5	Quadratic Discriminant	Failed	
Last change: Quadratic Discriminant		2856/2856 features	
1.6	Logistic Regression	Accuracy: 95.6%	
Last change: Logistic Regression		2856/2856 features	
1.7	Naive Bayes	Accuracy: 96.6%	
Last change: Gaussian Naive Bayes		2856/2856 features	
1.8	Naive Bayes	Accuracy: 80.5%	
Last change: Kernel Naive Bayes		2856/2856 features	
1.9	SVM	Accuracy: 98.5%	
Last change: Linear SVM		2856/2856 features	
1.10	SVM	Accuracy: 98.8%	
Last change: Quadratic SVM		2856/2856 features	
<b>1</b>	<b>1.11</b>	<b>SVM</b>	<b>Accuracy: 98.9%</b>
Last change: Cubic SVM		2856/2856 features	
	1.12	SVM	Accuracy: 63.8%
Last change: Fine Gaussian SVM		2856/2856 features	
	1.13	SVM	Accuracy: 98.6%
Last change: Medium Gaussian SVM		2856/2856 features	
	1.14	SVM	Accuracy: 98.4%
Last change: Coarse Gaussian SVM		2856/2856 features	
<b>3</b>	<b>1.15</b>	<b>KNN</b>	<b>Accuracy: 98.6%</b>
Last change: Fine KNN		2856/2856 features	
	1.16	KNN	Accuracy: 98.0%
Last change: Medium KNN		2856/2856 features	
	1.17	KNN	Accuracy: 94.8%
Last change: Coarse KNN		2856/2856 features	
	1.18	KNN	Accuracy: 98.1%
Last change: Cosine KNN		2856/2856 features	
	1.19	KNN	Accuracy: 97.1%
Last change: Cubic KNN		2856/2856 features	
	1.20	KNN	Accuracy: 97.8%
Last change: Weighted KNN		2856/2856 features	
	1.21	Ensemble	Accuracy: 63.8%
Last change: Boosted Trees		2856/2856 features	
	1.22	Ensemble	Accuracy: 97.5%
Last change: Banned Trees		2856/2856 features	
	<b>1.23</b>	<b>Ensemble</b>	<b>Accuracy: 98.8%</b>
Last change: Subspace Discriminant		2856/2856 features	<b>2</b>
	1.24	Ensemble	Accuracy: 77.9%
Last change: Subspace KNN		2856/2856 features	
	1.25	Ensemble	Accuracy: 90.8%
Last change: RUSBoosted Trees		2856/2856 features	
2	Tree	Accuracy: 97.3%	
Last change: 'Iterations' = '50'		2856/2856 features	
3	Tree	Accuracy: 97.7%	
Last change: 'Surrogate decision splits' = 'Off'		2856/2856 features	
4	Ensemble	Accuracy: 98.4%	
Last change: Optimizable Ensemble		2856/2856 features	
5	SVM	Accuracy: 98.8%	
Last change: 'Optimize Kernel Scale' = 'false'		2856/2856 features	
6	Ensemble	Accuracy: 97.7%	
Last change: 'Number of learners' = '200'		2856/2856 features	
7	Ensemble	Accuracy: 98.0%	
Last change: 'Maximum number of splits' = '50'		2856/2856 features	
8	Ensemble	Accuracy: 98.0%	
Last change: 'Maximum number of splits' = '3'		2856/2856 features	
9	Ensemble	Accuracy: 97.8%	
Last change: 'Number of learners' = '500'		2856/2856 features	
10	Ensemble	Accuracy: 97.5%	
Last change: 'Number of learners' = '10'		2856/2856 features	
	<b>11</b>	<b>Ensemble</b>	<b>Accuracy: 98.0%</b>
Last change: 'Maximum number of splits' = '300'		2856/2856 features	<b>4</b>

Abbildung 29: Genauigkeit bei 5-facher Kreuzvalidierung mit 2856 Features

1	SVM	Accuracy: 99.5%
Last change: Cubic SVM		952/952 features
2	KNN	Accuracy: 99.1%
Last change: Fine KNN		952/952 features
3	Tree	Accuracy: 99.4%
Last change: 'Iterations' = '50'		952/952 features
4	Ensemble	Accuracy: 99.0%
Last change: Subspace Discriminant		952/952 features
5	Ensemble	Accuracy: 99.5%
Last change: 'Optimize learning rate' = 'false'		952/952 features
6	SVM	Accuracy: 99.2%
Last change: Linear SVM		952/952 features

**SVM: 100% on testset!**

1 missed arc on testset  
→ TPR 98,1%

1 false positive on testset  
→ FPR 3,5%

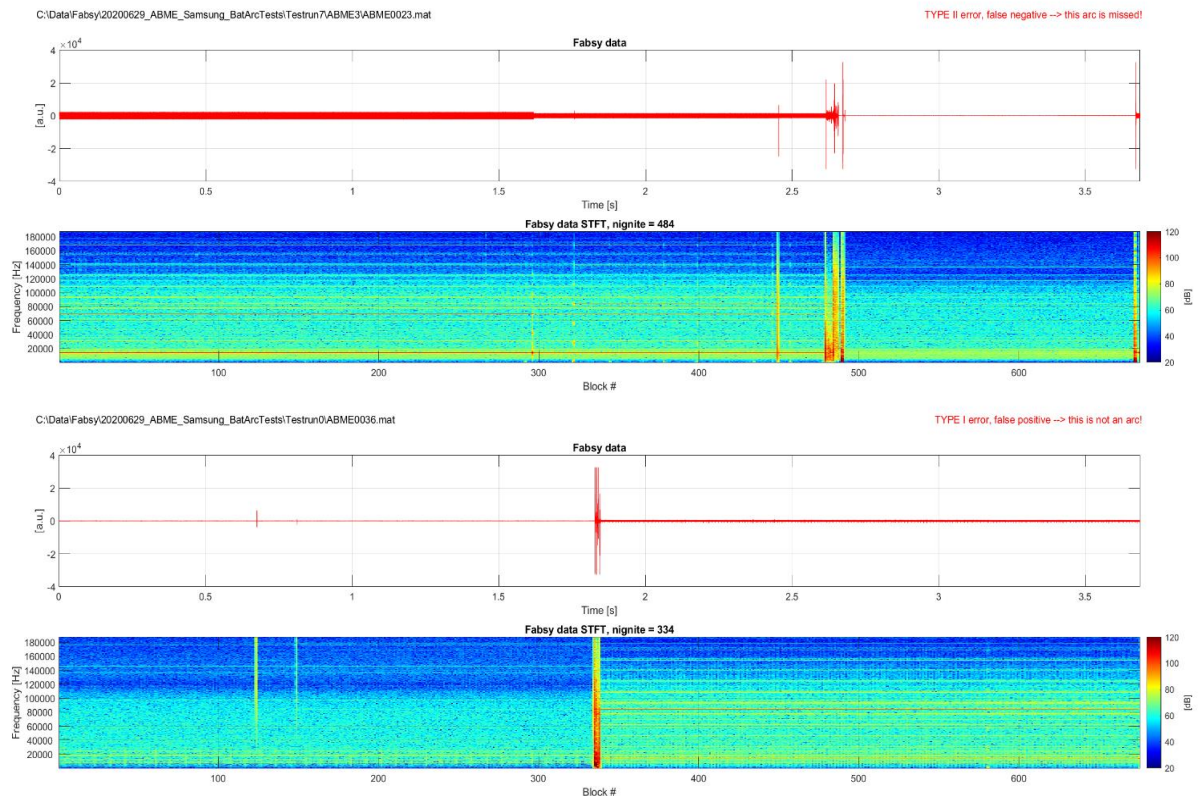
**GBC**

<b>Current Model</b>	
<b>Model 5: Trained</b>	
<b>Results</b>	
Accuracy	99.5%
Total misclassification cost	8
Prediction speed	~1900 obs/sec
Training time	2971.8 sec
<b>Model Type</b>	
Preset:	Optimizable Ensemble
Ensemble method:	Bag
Learner type:	Decision tree
Number of predictors to sample:	Select All
<b>Optimized Hyperparameters</b>	
Maximum number of splits:	291
Number of learners:	189
<b>Hyperparameter Search Range</b>	
Number of learners:	10-500
Maximum number of splits:	1-1463
<b>Optimizer Options</b>	
Optimizer:	Bayesian optimization
Acquisition function:	Expected improvement per second plus
Iterations:	50
Training time limit:	false
<b>Feature Selection</b>	
All features used in the model, before PCA	
<b>PCA</b>	
PCA disabled	
<b>Misclassification Costs</b>	
Cost matrix:	default

Abbildung 30: Modelloptimierung bei 952 Features

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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



**Abbildung 31: Falsch zugeordnete Datensätze aus dem Testset für den 2. Trainingsschritt.**

Bei weiterer Reduktion der Features ergab sich eine Verschlechterung der Genauigkeit. Die Ergebnisse dafür sind in Abbildung 32 dargestellt. Bemerkenswert ist, dass trotz starker Reduktion der Features von ursprünglichen 2856 auf 56 relativ einfach bestimmbare Zeitbereichsfeatures im Falle der Cubic SVM die Genauigkeit nur um 0.8% auf 98.1% sanken. Allerdings zeigte sich am Testset, dass 2 Lichtbögen hoher Leistung nicht erkannt wurden. Dies lässt den Schluss zu, dass zusätzliche Features für eine Erkennrate über 99% gebraucht werden.

Eine genaue Vorverarbeitung mit korrekter Segmentierung der Trainingsdaten in Arc / Nichtarc Regionen ist unbedingt nötig. Tests ohne Segmentierung erreichten nur 60% Genauigkeit am Testset (trotz hoher Genauigkeit am Trainingsset). Eine hohe Anzahl an Features erhöhte nicht automatisch die Genauigkeit. Im Fall der cubic SVM war die Genauigkeit bei Einbeziehung aller 2856 Features mit 98.9% sogar um 0.5% geringer als bei der Reduktion auf 952 Features. Das Modell bildete dabei die differentiellen Features implizit ab.

Zur Reduktion der Rechenlast kann eine lineare SVM verwendet werden. Im Vergleich zu GBC und cubic SVM ergab sich nur eine um 0.3% geringere Genauigkeit. Am Testset erreichte auch die lineare SVM 100% Genauigkeit.

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

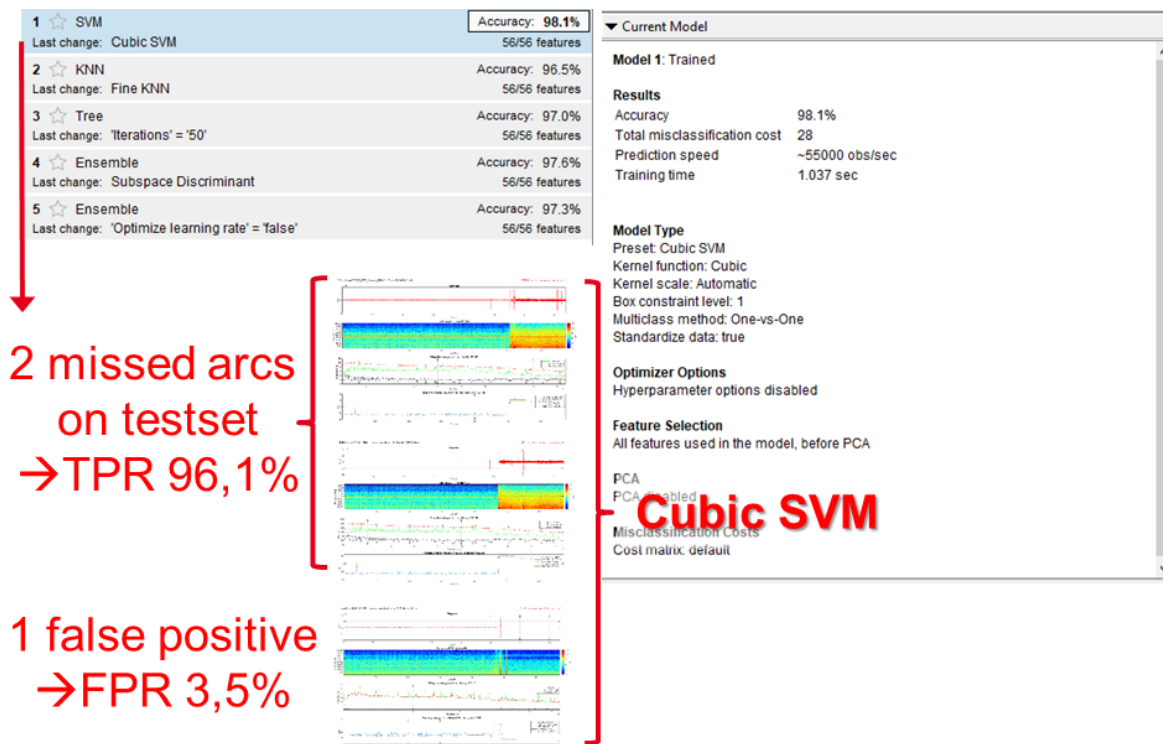


Abbildung 32: Training mit 56 Zeitbereichsfeatures.

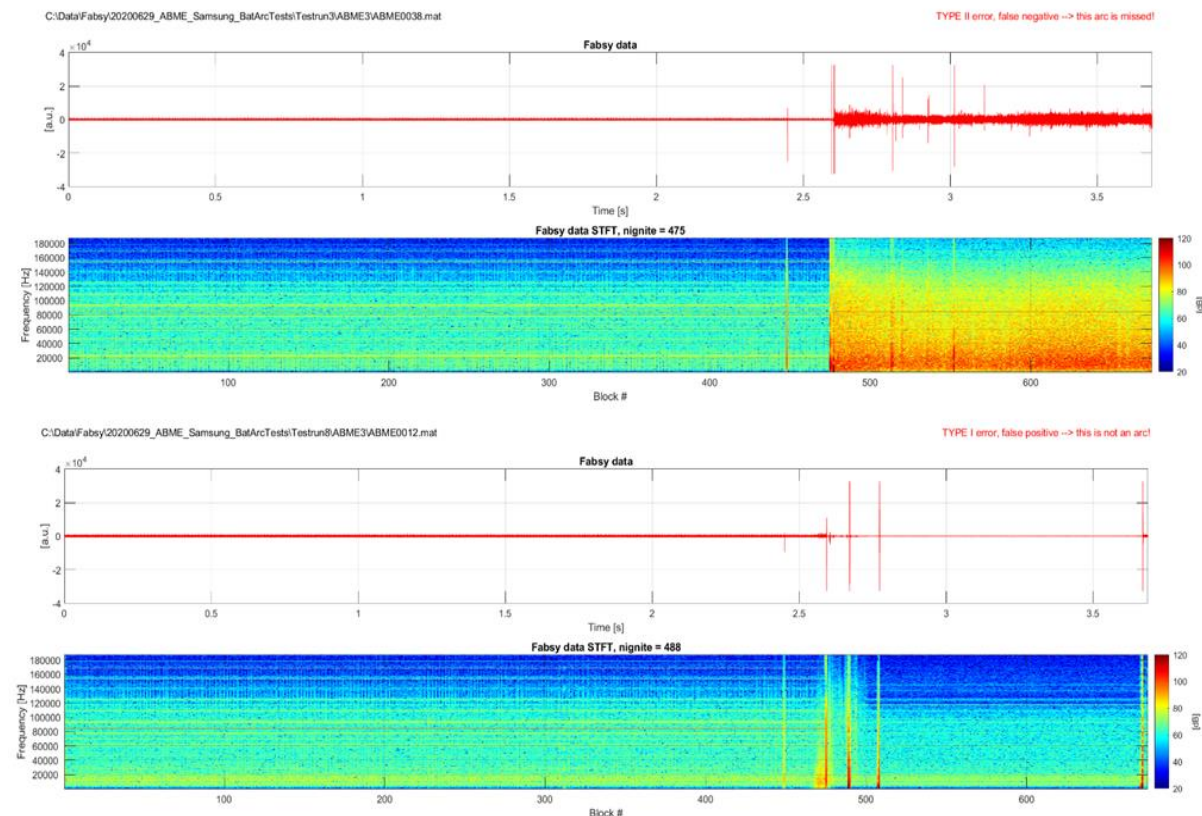


Abbildung 33: Falsch zugeordnete Datensätze aus dem Testset für den 3. Trainingsschritt.

### 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das Projektkonsortium entwickelte Materialien und Überwachungsmethoden zur Erhöhung der Batteriesicherheit.

Die Projektpartner entwickelten neuartige kostengünstige Verbundfolien für die thermische und elektrische Isolation zwischen den Li-Ionen Zellen. Diese Folien werden auch Spacer genannt und übernehmen mehrere Aufgaben. Im Normalbetrieb sorgen sie für eine sekundäre elektrische Isolation zwischen den Zellen und können einen Teil der alterungsbedingten Zellausdehnung aufnehmen. Im Fehlerfall isolieren sie die Zellen auch thermisch und verlangsamen die Wärmeausbreitung. Durch ihre Hochtemperaturbeständigkeit und Isolationsfestigkeit verhindern sie die Entstehung von Lichtbögen in einem mechanisch beschädigten Batteriesystem. Für deren großtechnische Herstellung eignet sich das Rolle-zu-Rolle-Verfahren. Verschiedene Varianten der Spacer wurden im Projekt ausgiebig mechanisch, thermisch und elektrisch (Lichtbogen) vermessen.

Für die Charakterisierung der Spacer-Eigenschaften (mechanisch, elektrisch) bei Temperaturen bis 600°C und gleichzeitig hohen mechanischen Belastungen musste ein neuartiger Prüfstand entwickelt und in Betrieb genommen werden. Zur Vervollständigung der Fehlerfallsimulation wurden auch die Li-Ion Zellen auf einen bestehenden Prüfstand bei hoher Übertemperatur vermessen. Es wurde die Ausdehnung der Zellen und die Wärmefreisetzung bei verschiedenen Ladezuständen quantifiziert.

Die auf den Prüfständen gemessenen Materialparameter waren ein wichtiger Input für die Fehlerfallsimulationen. Mit den Simulationen wurden verschiedene neue Batteriekonzepte bewertet. Schließlich wurde ein Batteriedemonstrator aufgebaut und im Fehlerfall getestet. Ein weiterer Schwerpunkt war die automatische Detektion von Gleichstromlichtbögen im Batteriesystem. Dazu wurden in mehreren Versuchsaufbauten von Batteriesystemen gespeiste Lichtbögen bei dynamischen und stationären Strombelastungen aufgezeichnet. Die Datensätze dienten in Folge dem Training des Lichtbogenerkennungsalgorithmus. Dieser konnte nach dem Training einen Lichtbogen von einem natürlichen dynamischen Betrieb unterscheiden.

## 5 Ausblick und Empfehlungen

Im Projekt wurden Konzepte zur Erhöhung der Batteriesicherheit ausgearbeitet. Es wurden verschiedene funktionelle Kompositfolien hergestellt, vermessen und in Thermal Runaway Propagation Versuchen erprobt. Des Weiteren wurden Simulationsmodelle für die Ausbreitung des Thermal Runaway ausgearbeitet.

Möglichkeiten für Materialentwicklungen in der Zukunft sind:

- Nutzung von vorgeformten Isolationsplatten für Batterieteile
- Einsatz von biologisch abbaubaren Isolationsmaterialien
- Mehrkomponentenplatten zur Reduktion der Anzahl der Bauteile
- Isolationsplatten mit Zusatzfunktionen (Sensorik, z.B. mechanischer Druck, Temperatur)

Es konnte demonstriert werden, dass sich die Methode der Lichtbogenerkennung erfolgreich skalieren und im Bereich der Fahrzeugbatterien anwenden lässt. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Hardware-Prototyp aufgebaut und Daten an einer Standardfahrzeugbatterie am Fahrzeugsimulator aufgezeichnet. Unter Verwendung der Datenbank mit 813 Datensätzen konnten unterschiedliche Mustererkennungsalgorithmen getestet werden. Die besten Ergebnisse wurden mittels Support Vector und Gradient Boosting Verfahren erzielt. Des Weiteren wurde gezeigt, dass für die Lichtbogenerkennung die Einbeziehung von Frequenzbereichsfeatures von Vorteil ist. Die im Rahmen dieses Projekts erweiterte Methodik, die aus der PV Lichtbogenerkennung bekannt war, verdeutlicht, wie Mustererkennungsverfahren in Zukunft zur Fahrzeugsicherheit beitragen können.

## 6 Literaturverzeichnis

- Augeard, A., Singo, T., Desprez, P., & Abbaoui, M. (2015). Numerical methods for detecting DC arc fault in lithium-ion batteries. 2015 Proceedings of the 61st IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, San Diego, CA, IEEE.
- Brooks, B. (2011). The Bakersfield Fire. SolarPro 4.2, Feb/Mar 2011.
- Cattin, V., Perichon, P., Dahmani, J., Schwartzmann, B., & Heiries, V. (2013). Detection of electric arcs in large batteries. Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), Barcelona, 2013, pp. 1-9. IEEE.
- Dahmani, J., Cattin, J., & Perichon, P. (2015). Battery protected against arcs, US20150061696, US Patent App. 14/390,928.
- Haeberlin, H. (2010). Arc Detector as an External Accessory Device for PV Inverters for Remote Detection of Dangerous Arcs on the DC Side of PV Plants. European Photovoltaic Solar Energy Conference Valencia. Spain.
- NEC. (2011). National Electrical Code, 2011 Edition, NFPA 70, National Fire Protection Association, Quincy, MA. .

# Energieforschungsprogramm - 03. Ausschreibung

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

- Strobl, C. (2014). Arc Fault Detection - a Model-based Approach. 2014 Proceedings of the 27th International Conference on Electrical Contacts. Dresden, Germany: IEEE.
- UL1699B. (2011). Underwriters Laboratories (UL), Subject I 699B, Outline of Investigation for Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection, April 29, 2011.
- Vaaßen, W., & Zornikau, J. (2007). Lichtbogenproblematik bei PV-Anlagen. 4. Workshop Photovoltaik-Modultechnik, TÜV Rheinland, Köln, 2007.

## 7 Anhang

## 8 Kontaktdaten

### Projektleitung:

Virtual Vehicle Research GmbH.  
Inffeldgasse 21a, 8010 Graz, Austria  
[office@v2c2.at](mailto:office@v2c2.at)  
[www.v2c2.at](http://www.v2c2.at)

### Forschungspartner:

Polymer Competence Center Leoben GmbH  
Roseggerstrasse 12, A-8700 Leoben  
[office@pccl.at](mailto:office@pccl.at)  
[www.pccl.at](http://www.pccl.at)

### Industriepartner:

SAMSUNG SDI Battery Systems GmbH  
Frikusweg 1, 8141 Premstätten, Austria  
[office.sdibs@samsung.com](mailto:office.sdibs@samsung.com)  
<https://samsungsdibs.at/>

### ISOVOLTA AG

Werk Werndorf, Vianovastrasse 20, 8402 Werndorf  
[wdf@isovolta.com](mailto:wdf@isovolta.com)  
<https://www.isovolta.com/>

### Fronius International GmbH

Froniusplatz 1, 4600 Wels  
[contact@fronius.com](mailto:contact@fronius.com)  
[www.fronius.com](http://www.fronius.com)