

Technologieforum „Großflächige Druckmessung“, 8. Oktober 2024

---

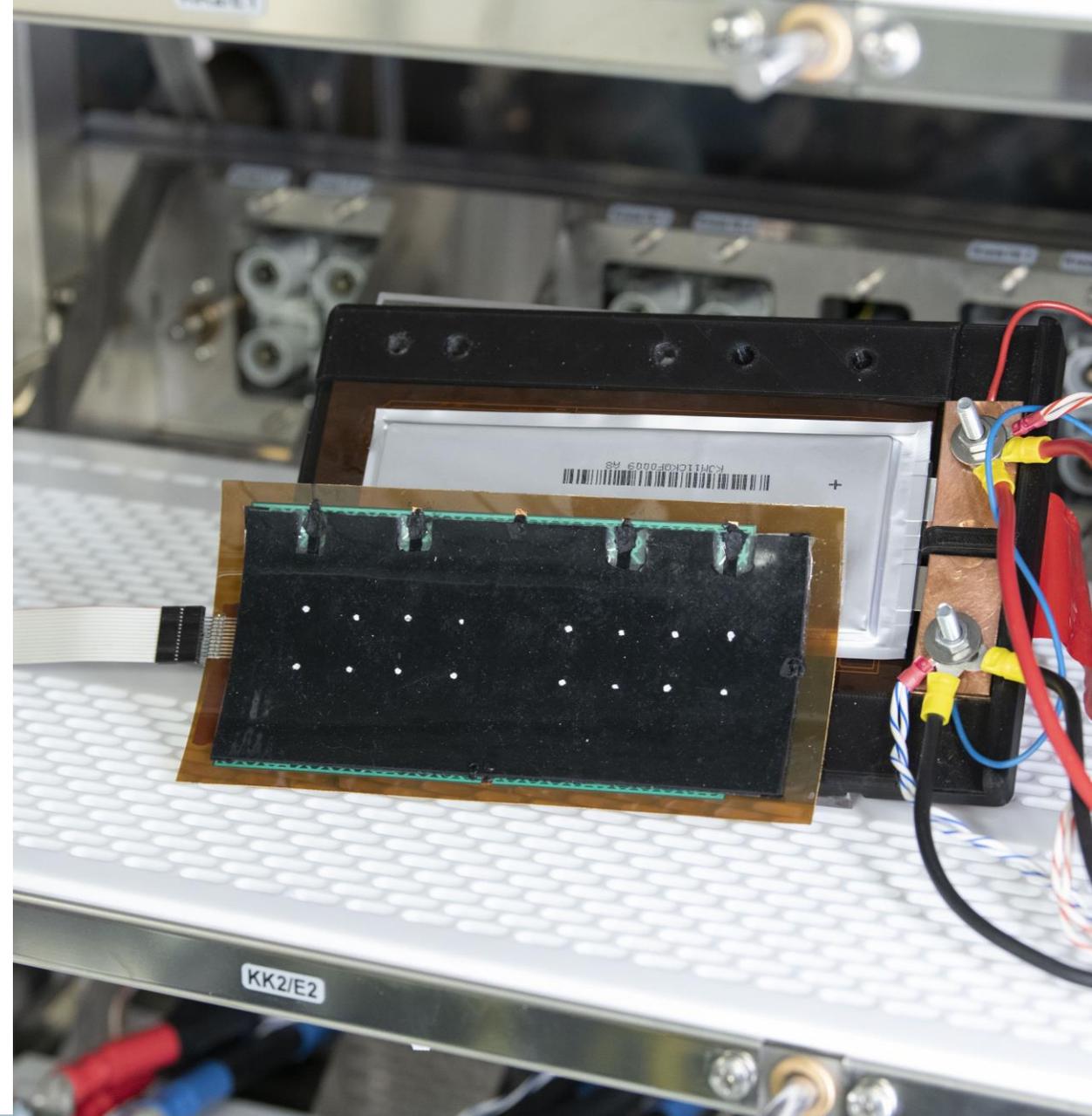
# Drucküberwachung in Batteriemodulen mittels Dielektrischer Elastomer Sensoren DES

Johannes Ziegler (Fraunhofer ISC)

# Drucküberwachung in Batteriemodulen

## mittels Dielektrischer Elastomer Sensoren DES

1. Motivation
2. Funktionsweise von DES
3. Drucküberwachung in Batteriemodulen
  - Experimentelles Setup
  - Ergebnisse
4. Zusammenfassung & Ausblick



# Motivation

---

- **Lithium-Ionen** (Pouch) Zellen unterliegen einer **reversiblen Volumenausdehnung** (Dickenänderung) während des Lebenszyklus: **Einlagerung von Li-Ionen** in Funktionsschichten in Abhängigkeit des **Ladezustands** (State of Charge **SoC**)
- **Permanente Dickenänderung** der Zelle bei **Zellalterung** oder im **Schadensfall**
- Information über die **Zellausdehnung** interessant für:
  - **Frühzeitige Erkennung** von Schadensevents (**Thermal Runaway**)
  - Zusatzparameter für **intelligente Batteriemanagementsysteme BMS**: Steigerung **Schnellladefähigkeit & erhöhte Lebensdauer**



<https://de.wikipedia.org/wiki/Pouch-Zelle>

# Funktionsweise von Dielektrischen Elastomer Sensoren DES

## Dielektrische Elastomere

**Dehnbarer Kondensator** bestehend aus elastomeren Schichten: **Elastomerfilm**, der beidseitig mit **dehnbaren und hoch leitfähigen Elektroden** beschichtet ist

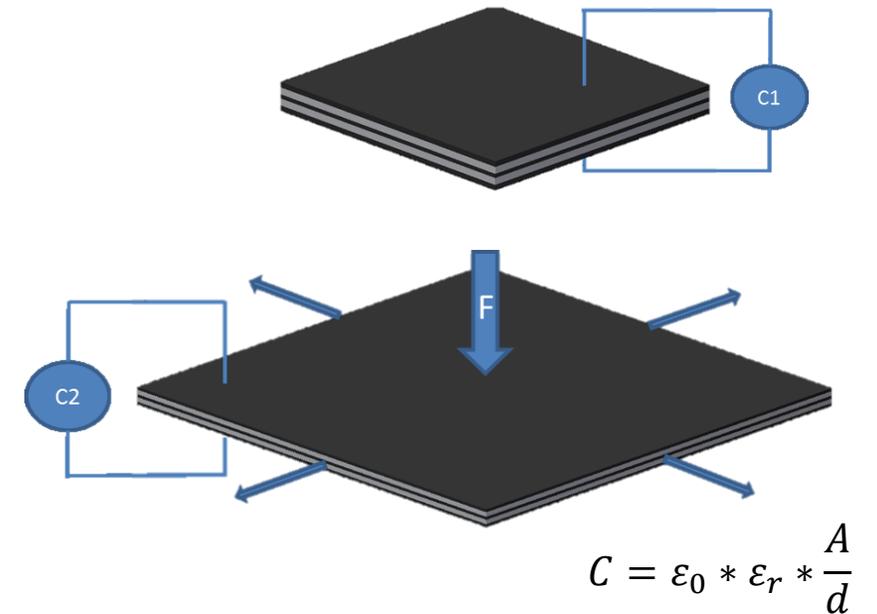
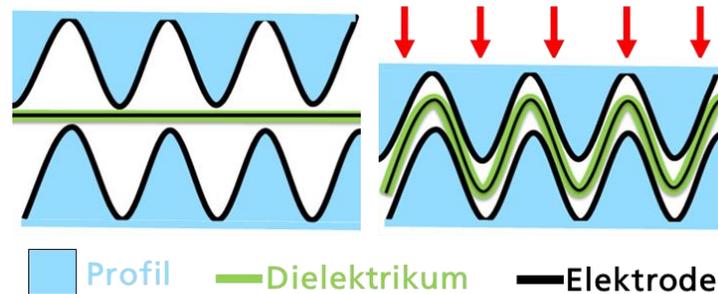
- **Elastomerfilm**: Silikon, Polyurethan, Acrylelastomer, Hybridpolymere
- **Hoch dehnbar** (> 100 % lineare Dehnung)
- **Dehbare Elektroden**: Elastomer gefüllt mit Ruß, Graphit oder Metallpartikeln
- Sehr gute **elektrische Leitfähigkeit** auch **unter Dehnung**
- Applikation als **Sensor, Aktor** und **Energy Harvester**



# Funktionsweise von Dielektrischen Elastomer Sensoren DES

## Dielektrische Elastomere als Deformationssensor

- **Mechanische Verformung** (Zug oder Druck) führt zu einer Dickenreduktion und gleichzeitig zu einem Anstieg der Oberflächen → **Kapazität als Messparameter** erhöht sich
- **Sensorkalibrierung** ermöglicht direkte Umrechnung in **Kompression** und **Druck** innerhalb der Firmware (Elektronik)
- Mittels **angepasster Strukturkörper** kann die **Empfindlichkeit** unter Druck **erhöht werden**



# Funktionsweise von Dielektrischen Elastomer Sensoren DES

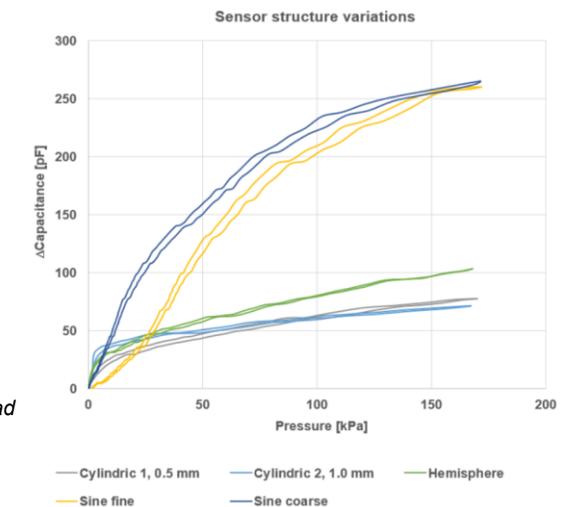
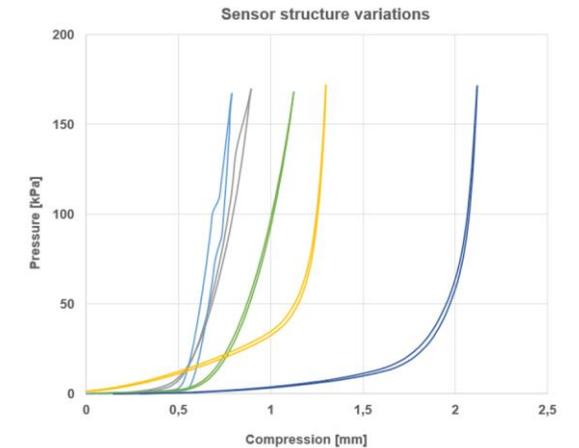
## Dielektrische Elastomere als Deformationssensor

- **Geometrie** und **Materialhärte** beeinflussen die **Steifigkeit des Sensors** und damit auch die **Sensorempfindlichkeit**

→ nahezu **unbegrenzte Sensordesigns** für jedes Anwendungsszenario!

Structure	Dimensions
	Carrier layer: 0.5 mm Diameter: 1 mm Height: 0.5 mm Structure distance (symm. axis): 4 mm Sensor height: ~ 2.2 mm
	Carrier layer: 0.5 mm Diameter: 2 mm Height: 1 mm Structure distance (symm. axis): 6 mm Sensor height: ~ 3.2 mm
	Carrier layer: 1 mm Diameter: 2 mm Height: 1 mm Structure distance (symm. axis): 4 mm Sensor height: ~ 4.5 mm
	Carrier layer: 1 mm Amplitude/height: 1 mm Wave length: 3 mm Sensor height: ~ 4 mm
	Carrier layer: 1 mm Amplitude/height: 2 mm Wave length: 5 mm Sensor height: ~ 6 mm

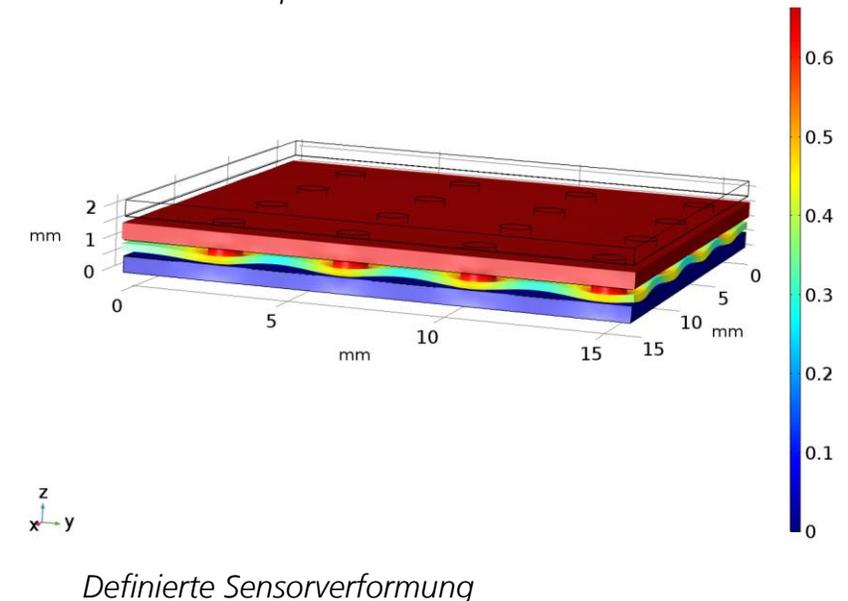
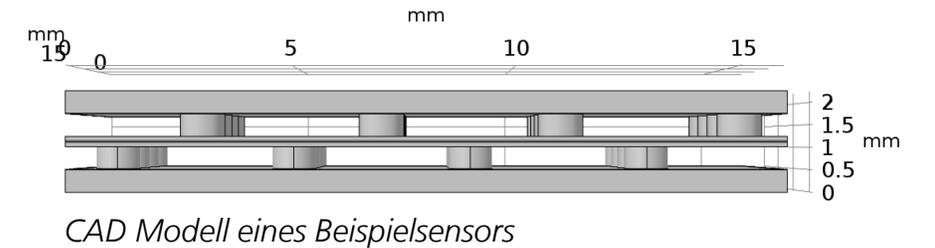
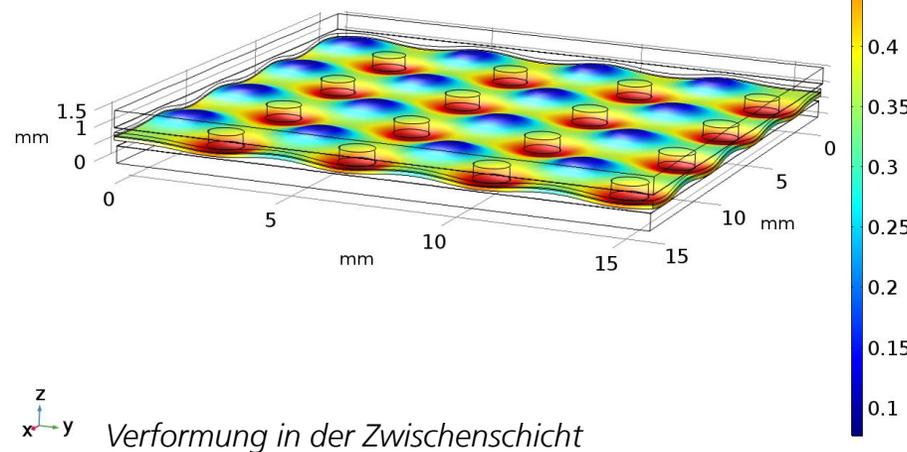
“Dielectric elastomer sensors adapted for monitoring compression load of clamped battery cells”; Proceedings Volume 12482, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXV; 124820J (2023)  
<https://doi.org/10.1117/12.2658246>



# Funktionsweise von Dielektrischen Elastomer Sensoren DES

## Dielektrische Elastomere als Deformationssensor

- Mittels **mechanischer und elektromechanischer Simulation** (COMSOL Multiphysics) des Sensorkörpers kann das **ideale Sensordesign** anwendungsspezifisch simuliert werden  
→ **Signifikante Verkürzung** der **Entwicklungszeiten!**



# Drucküberwachung in Batteriemodulen

---

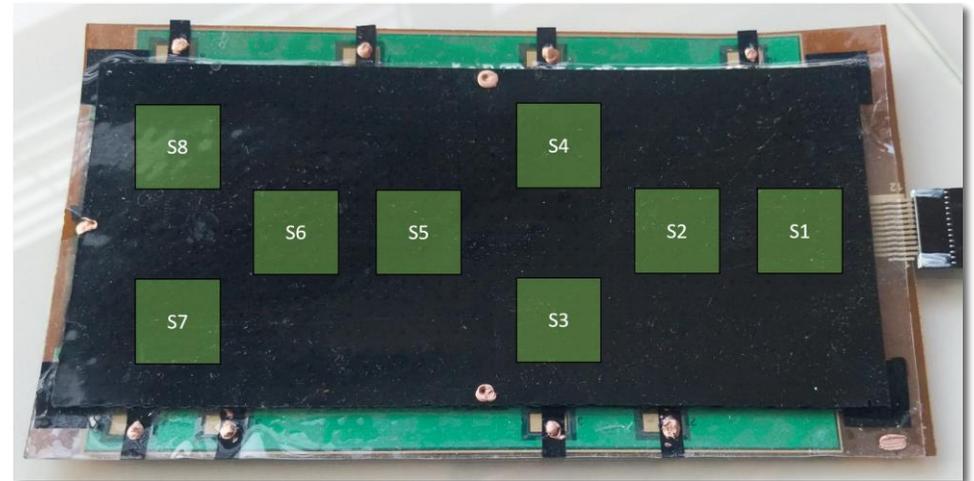
## Überwachung des Gesundheitszustands der Batteriezelle durch Messung der Ausdehnung und des Modulinnendrucks von verspannten Batteriezellen

- Einsatz von **weichen Zeltrennelementen**:
  - **Abfederung Atmung**
  - **Mechanische Entkopplung** der Zellen
  - Erzeugung eines **homogenen Modulinnendrucks**

# Drucküberwachung in Batteriemodulen

## Überwachung des Gesundheitszustands der Batteriezelle durch Messung der Ausdehnung und des Modulinnendrucks von verspannten Batteriezellen

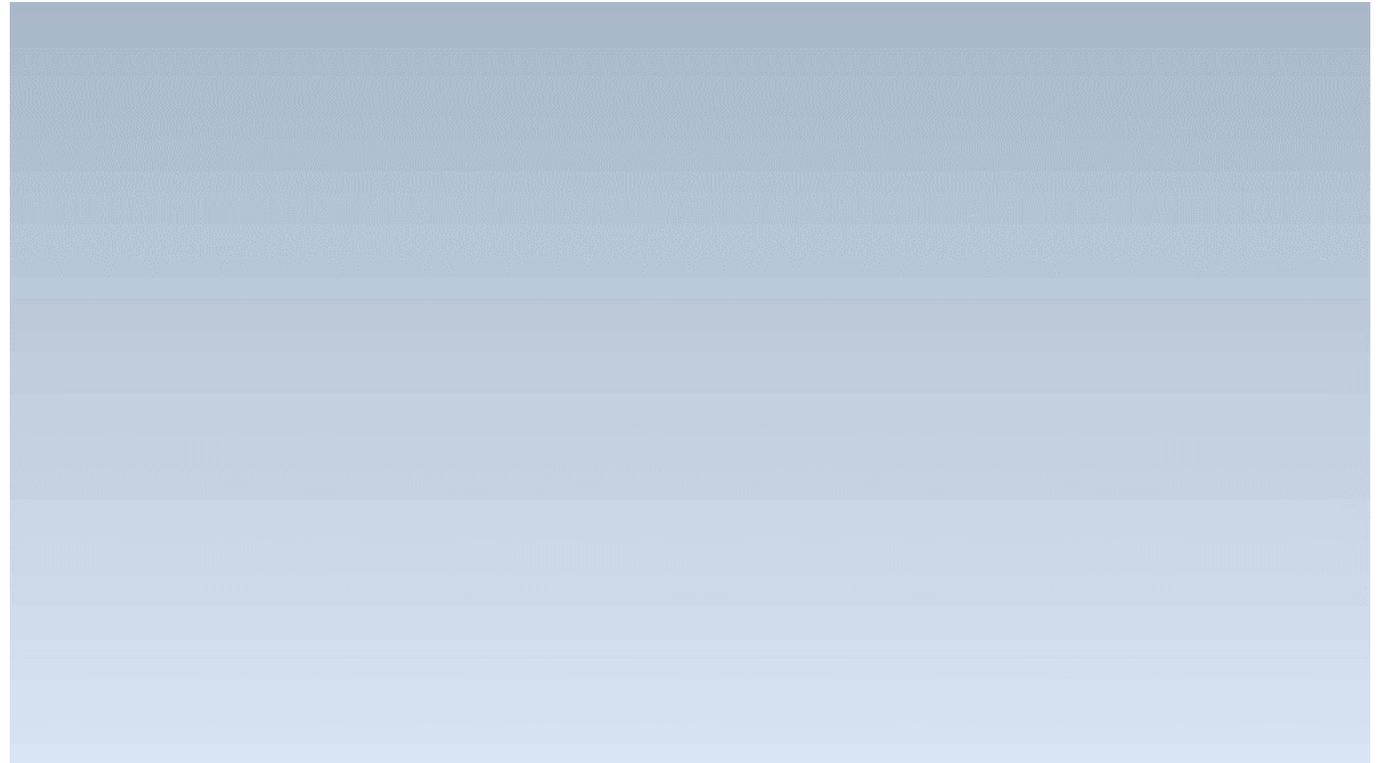
- Austausch eines solchen Elements durch **flächigen Drucksensor**:
  - Sensor überwacht die **kumulierte Ausdehnung** aller parallel verspannten Zellen  
→ Umrechnung in **Modulinnendruck** möglich
  - Flächige Sensorik **mit Ortauflösung** (Bereich  $\sim \text{cm}^2$ ):  
**keine mechanischen Druckstellen!**
  - Sensorempfindlichkeit und -steifigkeit **anpassbar**  
**an die Zell & Modulvoraussetzungen**



# Drucküberwachung in Batteriemodulen

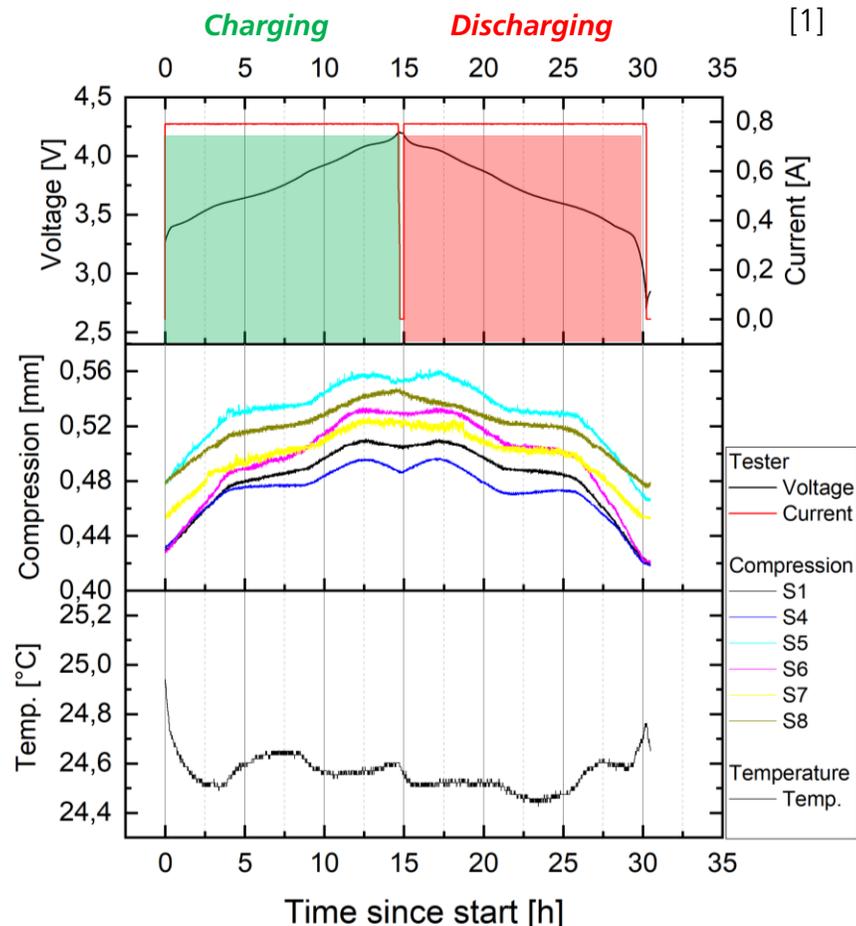
## Experimentelles Setup

- **Mechanisch verspannter Aufbau:**  
Angelehnt an **Modulverspannung**  
(Vorspannung zwischen **15 und 42 kPa**)
- Experiment **bei 25 °C**
- Zyklisierung: **Laden und Entladen mit C/15 (0,8 A)**
- Zusätzliche Überwachung Temperatur



# Drucküberwachung in Batteriemodulen

## Ergebnisse - Ladezustandsüberwachung



### Ergebnisse:

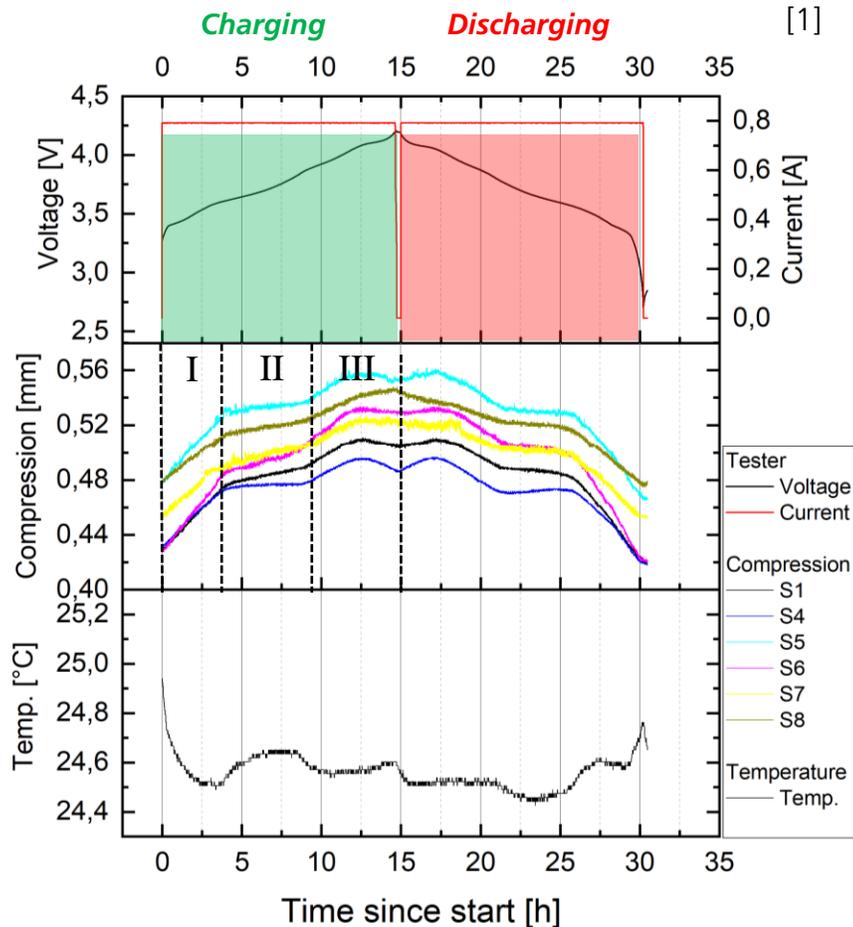
- **Laden:** Einlagerung von Li-Ionen in das Anodenmaterial → **Volumenausdehnung**
- **Entladen:** Auslagerung → **Volumenkontraktion**
- **Zellausdehnung** wird in **Kompression des Sensors** übertragen  
→ **Sensorkapazität steigt** während des **Ladens** und **sinkt** während des **Entladens**
- **Temperatur** nahezu **konstant:** keine Temperatureinflüsse bei der Messung

→ **Ausdehnung und Kontraktion der Zelle können sehr genau aufgelöst werden!**

[1] "Continuous monitoring the expansion of lithium-ion cells using dielectric elastomer sensors DES", 22. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, (2024)

# Drucküberwachung in Batteriemodulen

## Ergebnisse - Ladezustandsüberwachung



### Ergebnisse:

- Einlagerung in **mehreren Stufen**<sup>[2]</sup> mit **unterschiedlichen Geschwindigkeiten**  
I: Hohe Ausdehnungsrate  
II: reduzierte Ausdehnungsrate  
III: Hohe Ausdehnungsrate, aber überlagert durch gegenläufige Kontraktion der Kathode  
→ Relatives Minimum der Ausdehnung im voll geladenen Zustand

→ **Hohe Sensorempfindlichkeit: Verfolgung von elektrochemischen Prozessen**

[1] "Continuous monitoring the expansion of lithium-ion cells using dielectric elastomer sensors DES", 22. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, (2024)

[2] Daubinger P., Ebert F., Hartmann S., Giffin G. A. (2021). Impact of electrochemical and mechanical interactions on lithium-ion battery performance investigated by operando dilatometry. Journal of Power Sources, Volume 488, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229457>

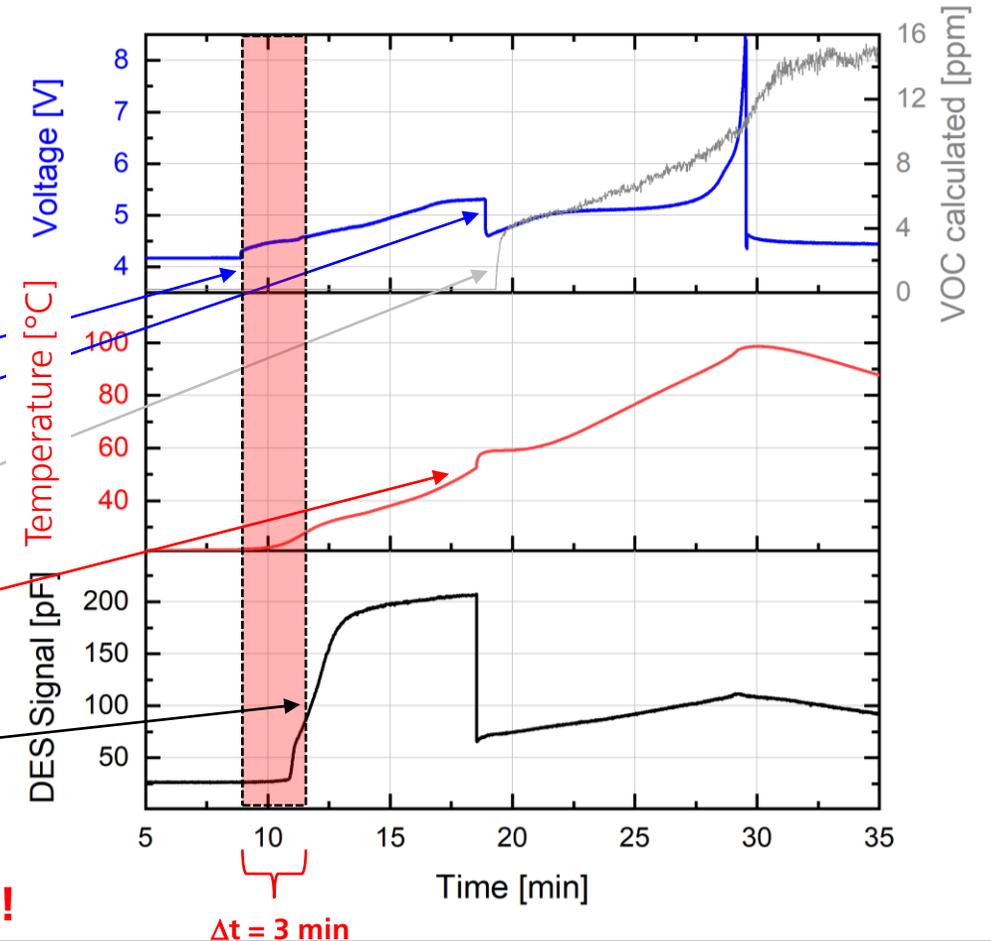
# Drucküberwachung in Batteriemodulen

## Ergebnisse – Detektion von Schadensereignissen

### Missbrauchstest:

- **Overcharging Test** nach IEC 62660-3
- **Gas Sensor (VOC)** als **Referenzsensor**

- **t = 9 min:** Beginn der Überladung
- **t = 18.5 min:** Einbruch Spannung  
→ Aufplatzen der Zelle
- **t = 19 min:** VOC Sensor positiv
- **t = 18 min:** Temp. Sensor > 50 °C
- **t = 12 min:** DES > 100 pF (400 % Anstieg)



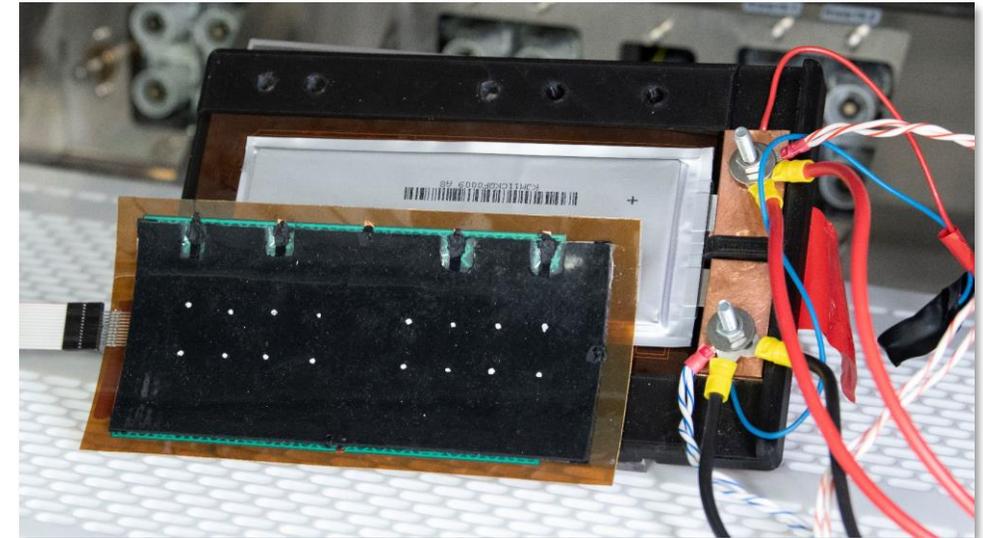
→ **Abnormales DES Signal 3 min nach Start der Überladung!**

# Drucküberwachung in Batteriemodulen

## Zusammenfassung

### → Weiches Zelltrennelement mit mehreren Funktionen:

- Erzeugung eines homogenen Verspannungsdrucks im Modul
- Gleichzeitige Messung der Zellausdehnung und des Modulinnendrucks (Ortsauflösung möglich)
- Erkenntnisse über den Ladezustand (State of Charge SoC) und elektrochemische Prozesse
- Zusatzdaten für intelligentes Batteriemanagementsystem: Ableitung des Gesundheitszustands (State of Health SoH)
- Frühzeitige Erkennung von Schadensevents (Overcharging): Informationen über State of Safety (SoS)



# Danksagungen

---

**Vielen Dank an die  
Projektteams von  
SPARTACUS & PHOENIX**



*This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 957221*

<https://www.spartacus-battery.eu/>

**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!**



*This project has received funding from the European Union's research and innovation programme Horizon Europe under the grant agreement No. 101103702 and the involvement in No. 101104022 (Battery 2030 CSA3).*

<https://phoenix-smartbatteries.eu/>

# Kontakt

---

Johannes Ziegler  
Center Smart Materials & Adaptive Systems  
Tel. +49 931 4100-601  
[johannes.ziegler@isc.fraunhofer.de](mailto:johannes.ziegler@isc.fraunhofer.de)  
[www.isc.fraunhofer.de](http://www.isc.fraunhofer.de)  
[www.cesma.de](http://www.cesma.de)