

# T-Cell

## Thermisches Batterie-Management

*HEAT BATT SIM & thermische Ersatzzelle*

**A3PS-Dialog** 20 Jahre A3PS

**LORBECK** Roland, **ORTNER** Robin, **SCHUTTING** Eberhard, **GRABNER** Peter, **EICHLSEDER** Helmut, **TRAPP** Christian  
*Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme, Technische Universität Graz*

02.Juni 2026



# AGENDA

## INSTITUT

Allgemeines  
Bereiche

## ABTEILUNG ANTRIEBSSYSTEME

VKM Projekte  
Thermomanagement  
Gesamtfahrzeug  
Stationäre  
Energiesysteme

## TCELL HARDWARE

### Ersatzzelle

Aufbau  
Kommunikation

### Zellenprüfstand

Elektrische Last  
Netzteil  
Testzelle  
Beheizung / Kühlung

## TCELL SIMULATION

### ECM (Elektrochemie)

Ersatzschaltbild  
EIS Messungen  
OCV Kennlinie

### TNM (thermisches Netzwerk)

Parametrierung  
Aufbau / Variabilität

### HEAT BATT SIM

Einsatzmöglichkeit  
Benutzeroberfläche

## ERGEBNISSE

### Validierung ECM

Stromspur  
Spannungsverlauf

### Validierung TNM

Temperatur Zellohülle  
Auswertung  
Wärmebildkamera

## AUSBLICK

### PCA

Analyse der  
Einflussgrößen  
Prüfstands-Performance

### PINN

Physikalisches  
Datenmodell  
Abschätzung der  
Performance gegenüber  
empirischer Simulation



# AGENDA

## INSTITUT

Allgemeines  
Bereiche

## ABTEILUNG ANTRIEBSSYSTEME

VKM Projekte  
Thermomanagement  
Gesamtfahrzeug  
Stationäre  
Energiesysteme

## TCELL HARDWARE

### Ersatzzelle

Aufbau  
Kommunikation

### Zellenprüfstand

Elektrische Last  
Netzteil  
Testzelle  
Beheizung / Kühlung

## TCELL SIMULATION

### ECM (Elektrochemie)

Ersatzschaltbild  
EIS Messungen  
OCV Kennlinie

### TNM (thermisches Netzwerk)

Parametrierung  
Aufbau / Variabilität

### HEAT BATT SIM

Einsatzmöglichkeit  
Benutzeroberfläche

## ERGEBNISSE

### Validierung ECM

Stromspur  
Spannungsverlauf

### Validierung TNM

Temperatur Zellohülle  
Auswertung  
Wärmebildkamera

## AUSBLICK

### PCA

Analyse der  
Einflussgrößen  
Prüfstands-Performance

### PINN

Physikalisches  
Datenmodell  
Abschätzung der  
Performance gegenüber  
empirischer Simulation

The information contained in this document may be a confidential attorney-client communication or may otherwise be privileged or confidential. It is the property of Research Area AS and shall not be used, disclosed to others, or reproduced without the express written consent of Research Area AS.



# ABTEILUNG ANTRIEBSSYSTEME



## Brennverfahrensentwicklung und Simulation

- Konventionelle Konzepte
- Hybridstrategien
- alternative Kraftstoffe
- Dual-Fuel BV

## Thermomanagement Gesamtfahrzeug

(VKM, Brennstoffzelle, batterieelektrische Fahrzeuge)

## Resiliente Energiesysteme

- stationäre / mobile Anwendungen

**Wasserstoffmotoren für schwere Nutzfahrzeuge und Baumaschinen**

**Energiemanagement hybridisierter und batterieelektrischer Fahrzeuge**

**Hierarchisches Energiemanagement und Energiefluss-Optimierung**



# AGENDA

## INSTITUT

Allgemeines  
Bereiche

## ABTEILUNG ANTRIEBSSYSTEME

VKM Projekte  
Thermomanagement  
Gesamtfahrzeug  
Stationäre  
Energiesysteme

## TCELL HARDWARE

### Ersatzzelle

Aufbau  
Kommunikation

### Zellenprüfstand

Elektrische Last  
Netzteil  
Testzelle  
Beheizung / Kühlung

## TCELL SIMULATION

### ECM (Elektrochemie)

Ersatzschaltbild  
EIS Messungen  
OCV Kennlinie

### TNM (thermisches Netzwerk)

Parametrierung  
Aufbau / Variabilität

### HEAT BATT SIM

Einsatzmöglichkeit  
Benutzeroberfläche

## ERGEBNISSE

### Validierung ECM

Stromspur  
Spannungsverlauf

### Validierung TNM

Temperatur Zellohülle  
Auswertung  
Wärmebildkamera

## AUSBLICK

### PCA

Analyse der  
Einflussgrößen  
Prüfstands-Performance

### PINN

Physikalisches  
Datenmodell  
Abschätzung der  
Performance gegenüber  
empirischer Simulation



# AGENDA

## INSTITUT

Allgemeines  
Bereiche

## ABTEILUNG ANTRIEBSSYSTEME

VKM Projekte  
Thermomanagement  
Gesamtfahrzeug  
Stationäre  
Energiesysteme

## TCELL HARDWARE

### Ersatzzelle

Aufbau  
Kommunikation

### Zellenprüfstand

Elektrische Last  
Netzteil  
Testzelle  
Beheizung / Kühlung

## TCELL SIMULATION

### ECM (Elektrochemie)

Ersatzschaltbild  
EIS Messungen  
OCV Kennlinie

### TNM (thermisches Netzwerk)

Parametrierung  
Aufbau / Variabilität

### HEAT BATT SIM

Einsatzmöglichkeit  
Benutzeroberfläche

## ERGEBNISSE

### Validierung ECM

Stromspur  
Spannungsverlauf

### Validierung TNM

Temperatur Zellohülle  
Auswertung  
Wärmebildkamera

## AUSBLICK

### PCA

Analyse der  
Einflussgrößen  
Prüfstands-Performance

### PINN

Physikalisches  
Datenmodell  
Abschätzung der  
Performance gegenüber  
empirischer Simulation



# PROJEKT TCELL - HARDWARE

## Aufbau Ersatzzelle

Die Ersatzzelle besteht aus:

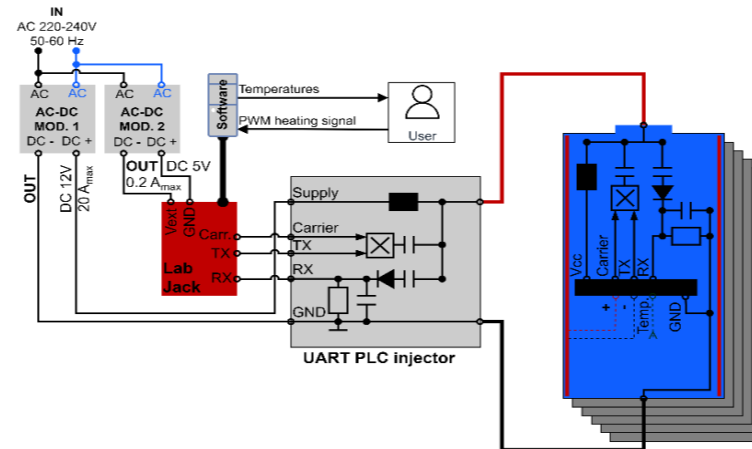
- 0.25mm Edelstahlhülle
- Heizplatine
- 3D gedruckter Aufnahme
- Interner Logik (Platine)



Sie ist äußerlich baugleich einer elektrochemisch aktiven Zelle.

## Kommunikation

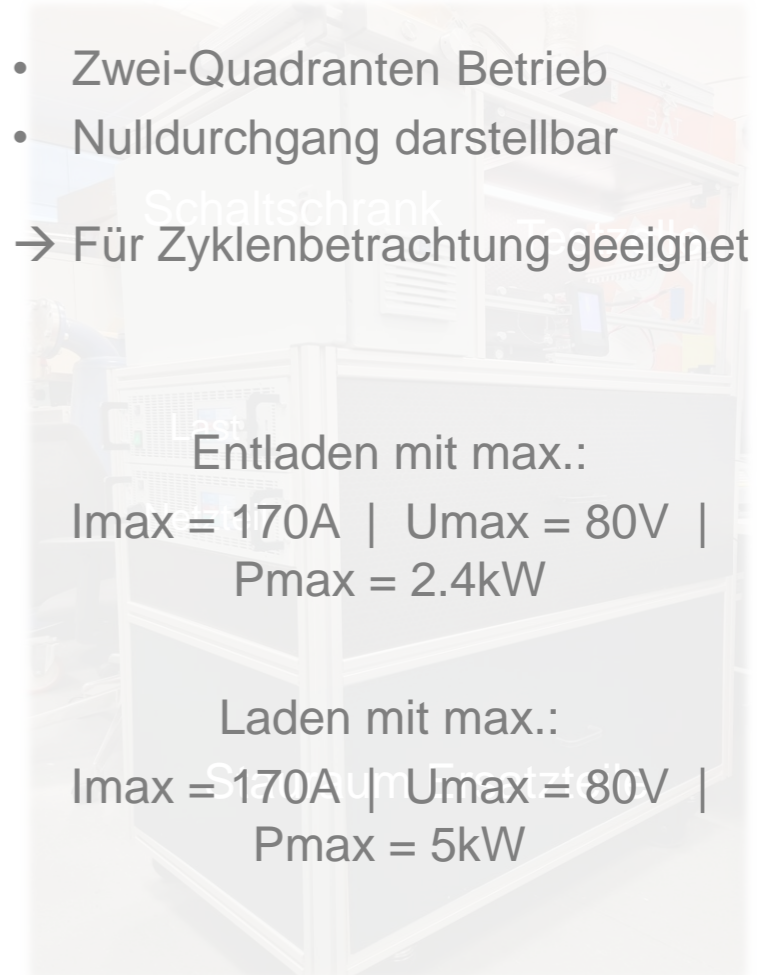
- Verwendung von PLC → power line communication
- 12 Volt Betriebsspannung
- UART Kommunikationsprotokoll



- Kommunikation per zugeteilter Adresse pro Ersatzzelle
- 98 Zellen getrennt regelbar.

## Aufbau Zellenprüfstand

- Zwei-Quadranten Betrieb
  - Nulldurchgang darstellbar
- Für Zyklenbetrachtung geeignet



Entladen mit max.:  
 $I_{max} = 170A$  |  $U_{max} = 80V$  |  
 $P_{max} = 2.4kW$

Laden mit max.:  
 $I_{max} = 170A$  |  $U_{max} = 80V$  |  
 $P_{max} = 5kW$





# AGENDA

## INSTITUT

Allgemeines  
Bereiche

## ABTEILUNG ANTRIEBSSYSTEME

VKM Projekte  
Thermomanagement  
Gesamtfahrzeug  
Stationäre  
Energiesysteme

## TCELL HARDWARE

### Ersatzzelle

Aufbau  
Kommunikation

### Zellenprüfstand

Elektrische Last  
Netzteil  
Testzelle  
Beheizung / Kühlung

## TCELL SIMULATION

### ECM (Elektrochemie)

Ersatzschaltbild  
EIS Messungen  
OCV Kennlinie

### TNM (thermisches Netzwerk)

Parametrierung  
Aufbau / Variabilität

### HEAT BATT SIM

Einsatzmöglichkeit  
Benutzeroberfläche

## ERGEBNISSE

### Validierung ECM

Stromspur  
Spannungsverlauf

### Validierung TNM

Temperatur Zellohülle  
Auswertung  
Wärmebildkamera

## AUSBLICK

### PCA

Analyse der  
Einflussgrößen  
Prüfstands-Performance

### PINN

Physikalisches  
Datenmodell  
Abschätzung der  
Performance gegenüber  
empirischer Simulation



# AGENDA

## INSTITUT

Allgemeines  
Bereiche

## ABTEILUNG ANTRIEBSSYSTEME

VKM Projekte  
Thermomanagement  
Gesamtfahrzeug  
Stationäre  
Energiesysteme

## TCELL HARDWARE

Ersatzzelle  
Aufbau  
Kommunikation

## Zellenprüfstand

Elektrische Last  
Netzteil  
Testzelle  
Beheizung / Kühlung

## TCELL SIMULATION

### ECM (Elektrochemie)

Ersatzschaltbild  
EIS Messungen  
OCV Kennlinie

### TNM (thermisches Netzwerk)

Parametrierung  
Aufbau / Variabilität

### HEAT BATT SIM

Einsatzmöglichkeit  
Benutzeroberfläche

## ERGEBNISSE

### Validierung ECM

Stromspur  
Spannungsverlauf

### Validierung TNM

Temperatur Zellohülle  
Auswertung  
Wärmebildkamera

## AUSBLICK

### PCA

Analyse der  
Einflussgrößen  
Prüfstands-Performance

### PINN

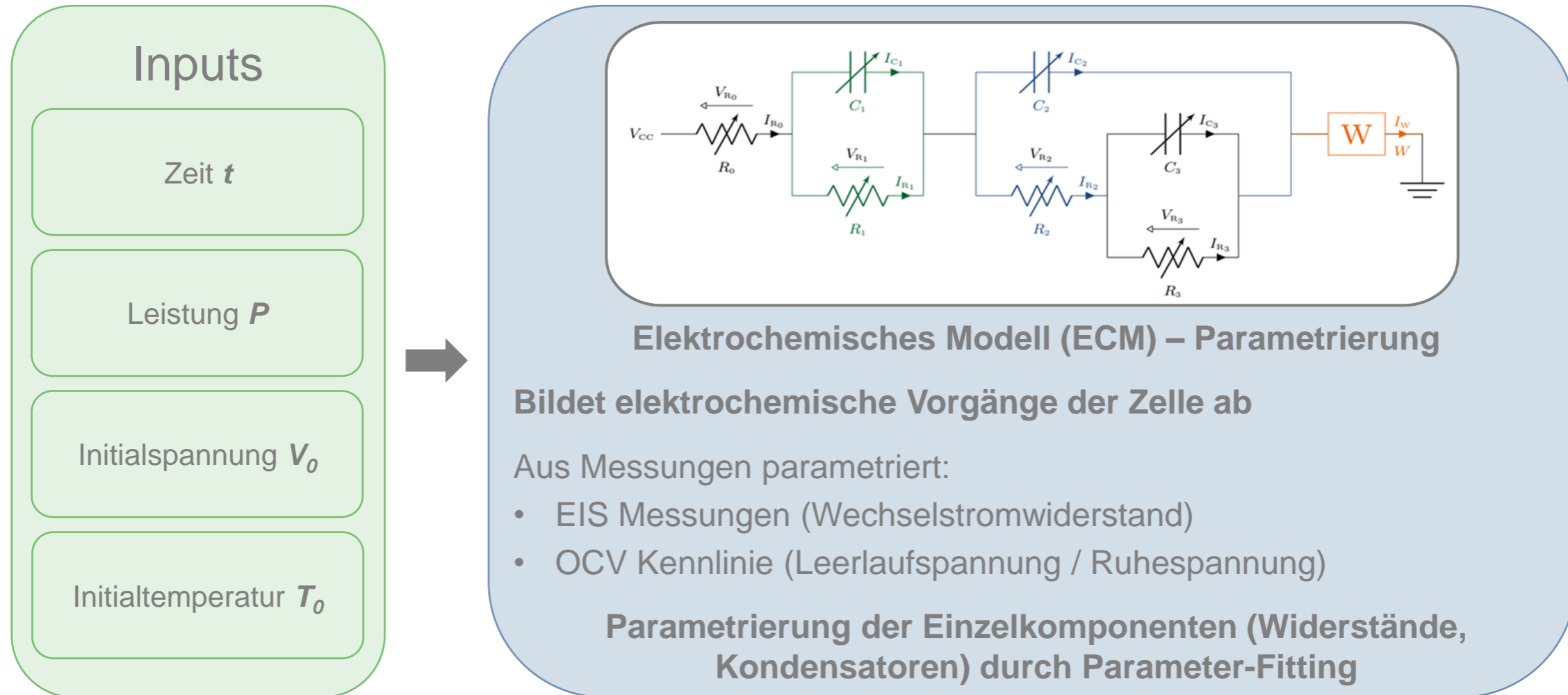
Physikalisches  
Datenmodell  
Abschätzung der  
Performance gegenüber  
empirischer Simulation

The information contained in this document may be a confidential attorney-client communication or may otherwise be privileged or confidential. It is the property of Research Area AS and shall not be used, disclosed to others, or reproduced without the express written consent of Research Area AS.



# PROJEKT TCELL - SIMULATION

## Hybride Elektrochemische & Thermische Batterie Simulation (HEAT BATT-SIM)



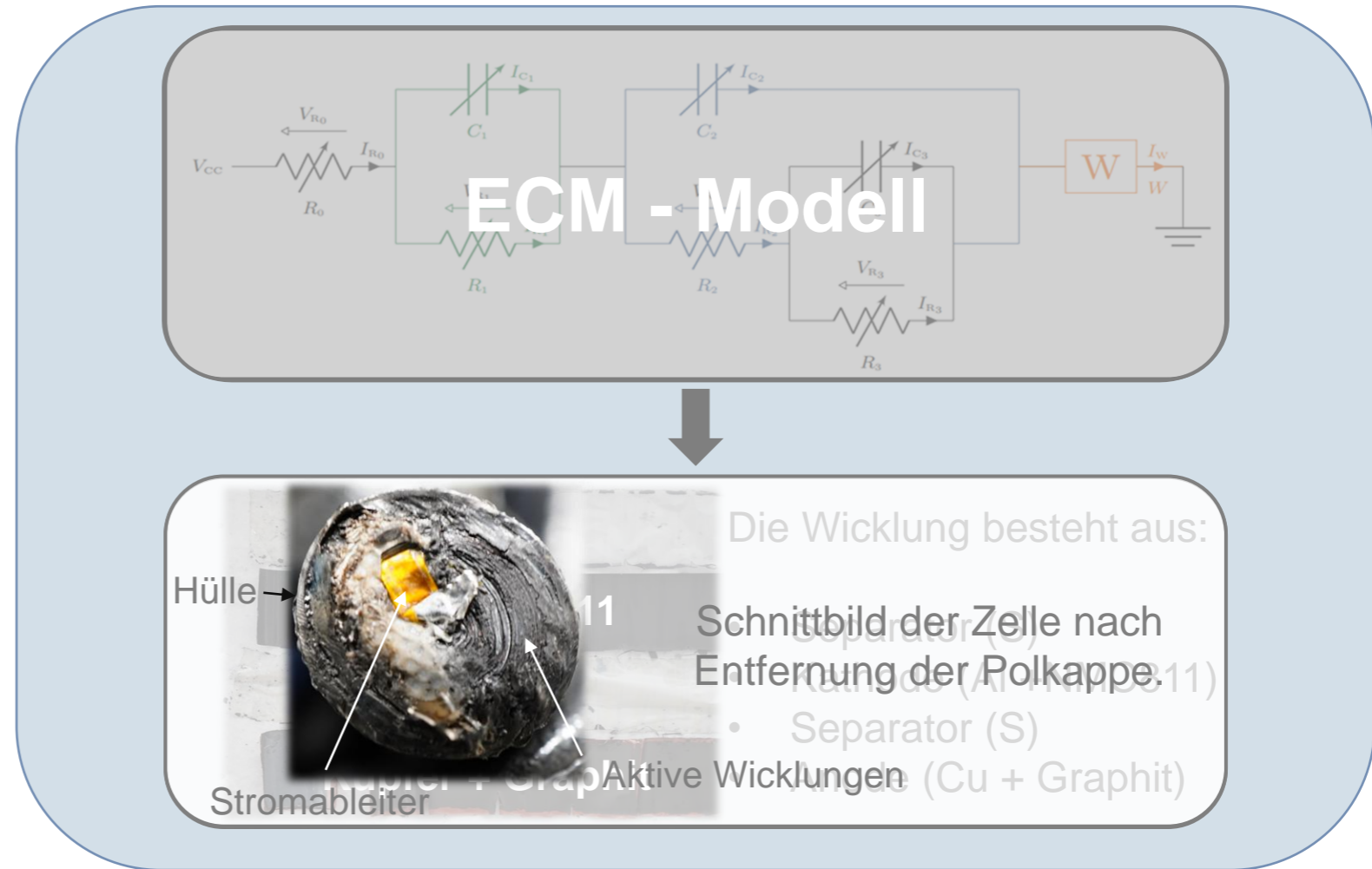
The information contained in this document may be a confidential attorney-client communication, or may otherwise be privileged or confidential. It is the property of Research Area AS and shall not be used, disclosed to others, or reproduced without the express written consent of Research Area AS.





# PROJEKT TCELL - SIMULATION

## Hybride Elektrochemische & Thermische Batterie Simulation (HEAT BATT-SIM)

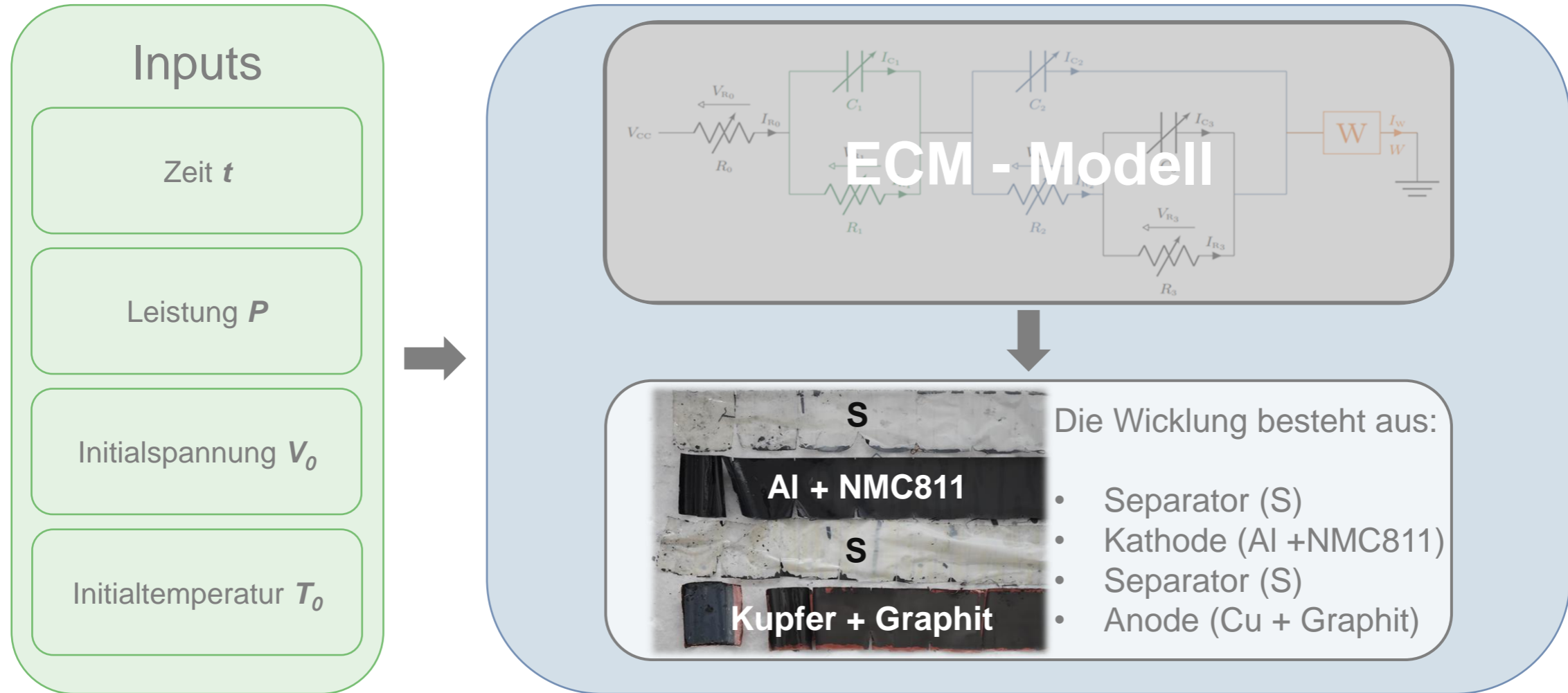


The information contained in this document may be a confidential attorney-client communication, or may otherwise be privileged or confidential. It is the property of Research Area AS and shall not be used, disclosed to others, or reproduced without the express written consent of Research Area AS.



# PROJEKT TCELL - SIMULATION

## Hybride Elektrochemische & Thermische Batterie Simulation (HEAT BATT-SIM)



The information contained in this document may be a confidential attorney-client communication, or may otherwise be privileged or confidential. It is the property of Research Area AS and shall not be used, disclosed to others, or reproduced without the express written consent of Research Area AS.





# PROJEKT TCELL - SIMULATION

## Hybride Elektrochemische & Thermische Batterie Simulation (HEAT BATT-SIM)

### Inputs

Zeit  $t$

Leistung  $P$

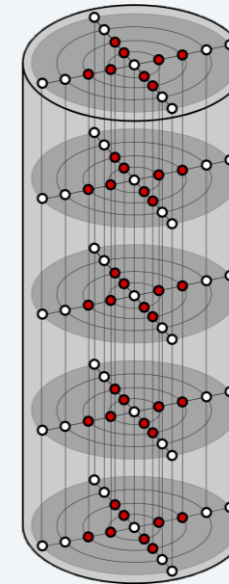
Initialspannung  $V_0$

Initialtemperatur  $T_0$



### Parameter des thermischen Netzwerks (8D Matrix):

- **p** parallele Module im Pack
- **s** serielle Module im Pack
- **x** parallele Zellen in einem Modul
- **y** serielle Zellen in einem Modul
- **z** axiale Schichten pro Zelle
- **i** Anzahl Wicklungen in einer Zelle
- **j** Schichten pro Wicklung
- **k** Sektoren-Aufteilung in Umfangsrichtung

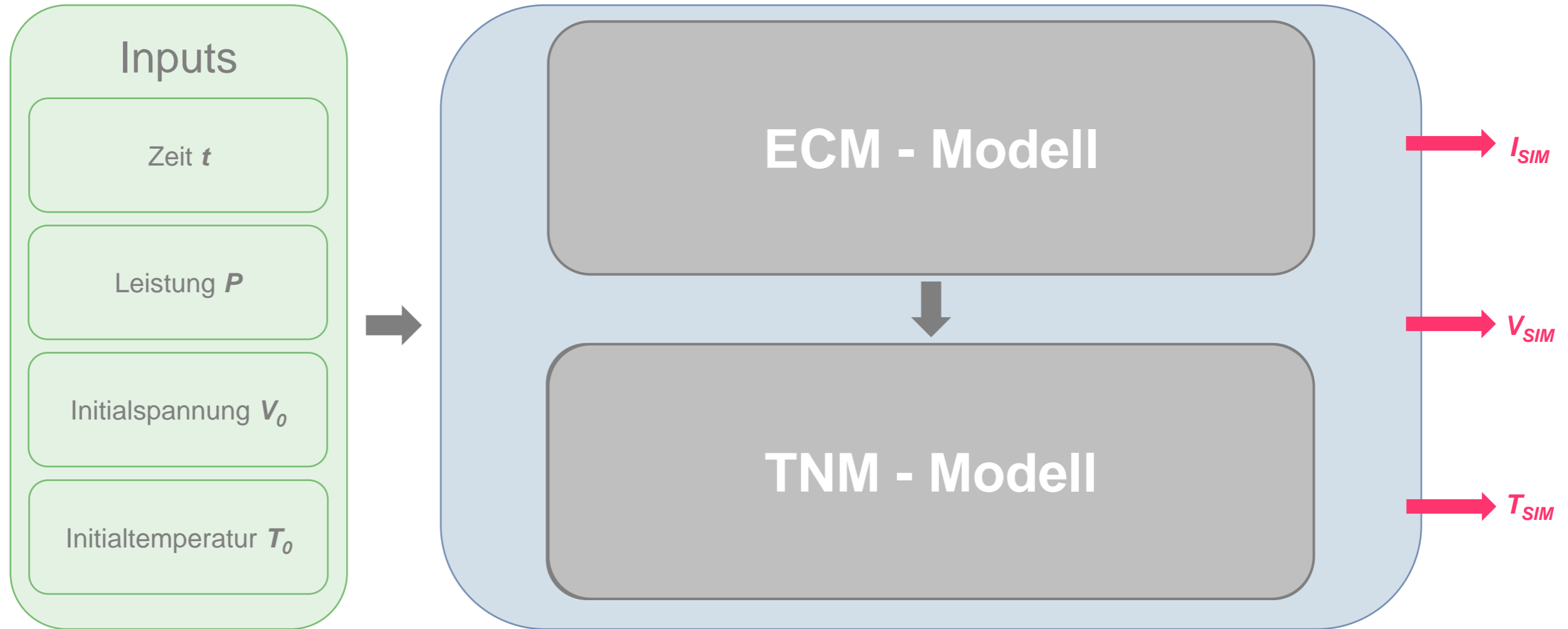


ECM und TNM bilden zusammen die HEAT BATT-SIM  
(Hybride **E**lectrochemical **A**nd **T**hermal **BATT**ery **SIM**ulation)



# PROJEKT TCELL - SIMULATION

## Hybride Elektrochemische & Thermische Batterie Simulation (HEAT BATT-SIM)





# AGENDA

## INSTITUT

Allgemeines  
Bereiche

## ABTEILUNG ANTRIEBSSYSTEME

VKM Projekte  
Thermomanagement  
Gesamtfahrzeug  
Stationäre  
Energiesysteme

## TCELL HARDWARE

### Ersatzzelle

Aufbau  
Kommunikation

### Zellenprüfstand

Elektrische Last  
Netzteil  
Testzelle  
Beheizung / Kühlung

## TCELL SIMULATION

### ECM (Elektrochemie)

Ersatzschaltbild  
EIS Messungen  
OCV Kennlinie

### TNM (thermisches Netzwerk)

Parametrierung  
Aufbau / Variabilität

### HEAT BATT SIM

Einsatzmöglichkeit  
Benutzeroberfläche

## ERGEBNISSE

### Validierung ECM

Stromspur  
Spannungsverlauf

### Validierung TNM

Temperatur Zelloberfläche  
Auswertung  
Wärmebildkamera

## AUSBLICK

### PCA

Analyse der  
Einflussgrößen  
Prüfstands-Performance

### PINN

Physikalisches  
Datenmodell  
Abschätzung der  
Performance gegenüber  
empirischer Simulation

The information contained in this document may be a confidential attorney-client communication or may otherwise be privileged or confidential. It is the property of Research Area AS and shall not be used, disclosed to others, or reproduced without the express written consent of Research Area AS.



# AGENDA

## INSTITUT

Allgemeines  
Bereiche

## ABTEILUNG ANTRIEBSSYSTEME

VKM Projekte  
Thermomanagement  
Gesamtfahrzeug  
Stationäre  
Energiesysteme

## TCELL HARDWARE

### Ersatzzelle

Aufbau  
Kommunikation

### Zellenprüfstand

Elektrische Last  
Netzteil  
Testzelle  
Beheizung / Kühlung

## TCELL SIMULATION

### ECM (Elektrochemie)

Ersatzschaltbild  
EIS Messungen  
OCV Kennlinie

### TNM (thermisches Netzwerk)

Parametrierung  
Aufbau / Variabilität

### HEAT BATT SIM

Einsatzmöglichkeit  
Benutzeroberfläche

## ERGEBNISSE

### Validierung ECM

Stromspur  
Spannungsverlauf

### Validierung TNM

Temperatur Zelloberfläche  
Auswertung  
Wärmebildkamera

## AUSBLICK

### PCA

Analyse der  
Einflussgrößen  
Prüfstands-Performance

### PINN

Physikalisches  
Datenmodell  
Abschätzung der  
Performance gegenüber  
empirischer Simulation

The information contained in this document may be a confidential attorney-client communication or may otherwise be privileged or confidential. It is the property of Research Area AS and shall not be used, disclosed to others, or reproduced without the express written consent of Research Area AS.

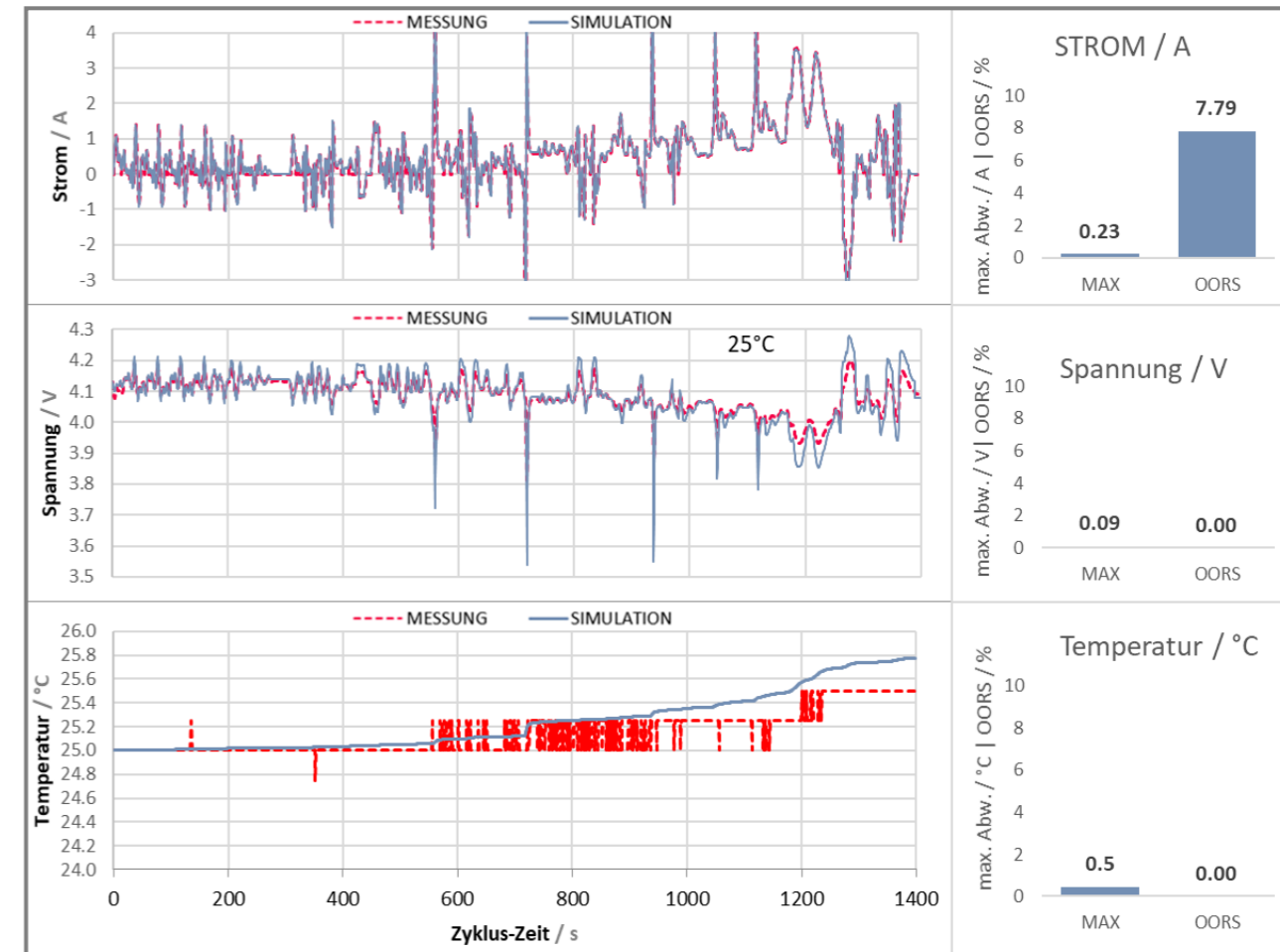
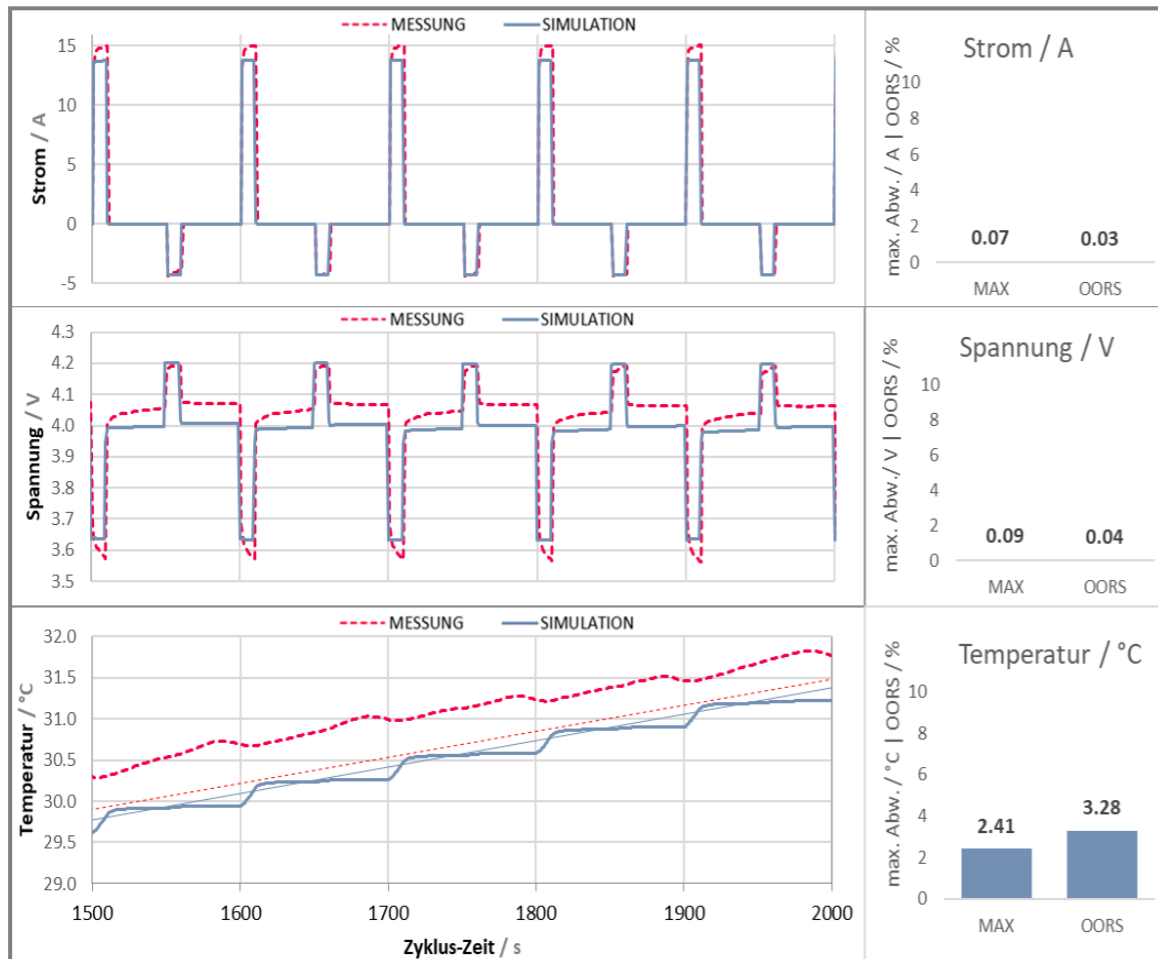


# PROJEKT TCELL - ERGEBNISSE

## Validierung HEAT BATT SIM

### Batterie Stress-Test bei 25°C T<sub>Umgebung</sub>

### Real World Zyklus bei 25°C T<sub>Umgebung</sub>





# AGENDA

## INSTITUT

Allgemeines  
Bereiche

## ABTEILUNG ANTRIEBSSYSTEME

VKM Projekte  
Thermomanagement  
Gesamtfahrzeug  
Stationäre  
Energiesysteme

## TCELL HARDWARE

### Ersatzzelle

Aufbau  
Kommunikation

### Zellenprüfstand

Elektrische Last  
Netzteil  
Testzelle  
Beheizung / Kühlung

## TCELL SIMULATION

### ECM (Elektrochemie)

Ersatzschaltbild  
EIS Messungen  
OCV Kennlinie

### TNM (thermisches Netzwerk)

Parametrierung  
Aufbau / Variabilität

### HEAT BATT SIM

Einsatzmöglichkeit  
Benutzeroberfläche

## ERGEBNISSE

### Validierung ECM

Stromspur  
Spannungsverlauf

### Validierung TNM

Temperatur Zelloberfläche  
Auswertung  
Wärmebildkamera

## AUSBLICK

### PCA

Analyse der  
Einflussgrößen  
Prüfstands-Performance

### PINN

Physikalisches  
Datenmodell  
Abschätzung der  
Performance gegenüber  
empirischer Simulation



# AGENDA

## INSTITUT

Allgemeines  
Bereiche

## ABTEILUNG ANTRIEBSSYSTEME

VKM Projekte  
Thermomanagement  
Gesamtfahrzeug  
Stationäre  
Energiesysteme

## TCELL HARDWARE

### Ersatzzelle

Aufbau  
Kommunikation

### Zellenprüfstand

Elektrische Last  
Netzteil  
Testzelle  
Beheizung / Kühlung

## TCELL SIMULATION

### ECM (Elektrochemie)

Ersatzschaltbild  
EIS Messungen  
OCV Kennlinie

### TNM (thermisches Netzwerk)

Parametrierung  
Aufbau / Variabilität

### HEAT BATT SIM

Einsatzmöglichkeit  
Benutzeroberfläche

## ERGEBNISSE

### Validierung ECM

Stromspur  
Spannungsverlauf

### Validierung TNM

Temperatur Zelloberfläche  
Auswertung  
Wärmebildkamera

## AUSBLICK

### PCA

Analyse der  
Einflussgrößen  
Prüfstands-Performance

### PINN

Physikalisches  
Datenmodell  
Abschätzung der  
Performance gegenüber  
empirischer Simulation



# PROJEKT TCELL - AUSBLICK

## Physikbasiertes neuronales Netzwerk (PINN)

### Inputs

Zeit  $t$ Leistung  $P$ Strom<sub>(norm.)</sub>  $I_0$ kum. Energie  $P_c$ Leistungsänderung  $dP$ Initialspannung  $V_0$ Initialtemperatur  $T_0$ 

### Berücksichtigte Verlustkomponenten:

- Datenverlust Messung – Vorhersage:

- Strom:  $L_I = MSE(I_{vorh}, I_{mess})$
- Spannung:  $L_V = MSE(V_{vorh}, V_{mess})$
- Temperatur:  $L_T = MSE(T_{vorh}, T_{mess})$

- Temperaturmessung Glättung  $L_{glätt} = (T_{t+1} - T_t)^2$

- Physikalische Gesetzmäßigkeiten:**

- Energie-Temperatur Kopplung  $L_{T_{phys}}$
- Spannungsmonotonie  $L_{V_{phys}}$
- Temperaturdynamiken  $L_{T_{dyn}}$

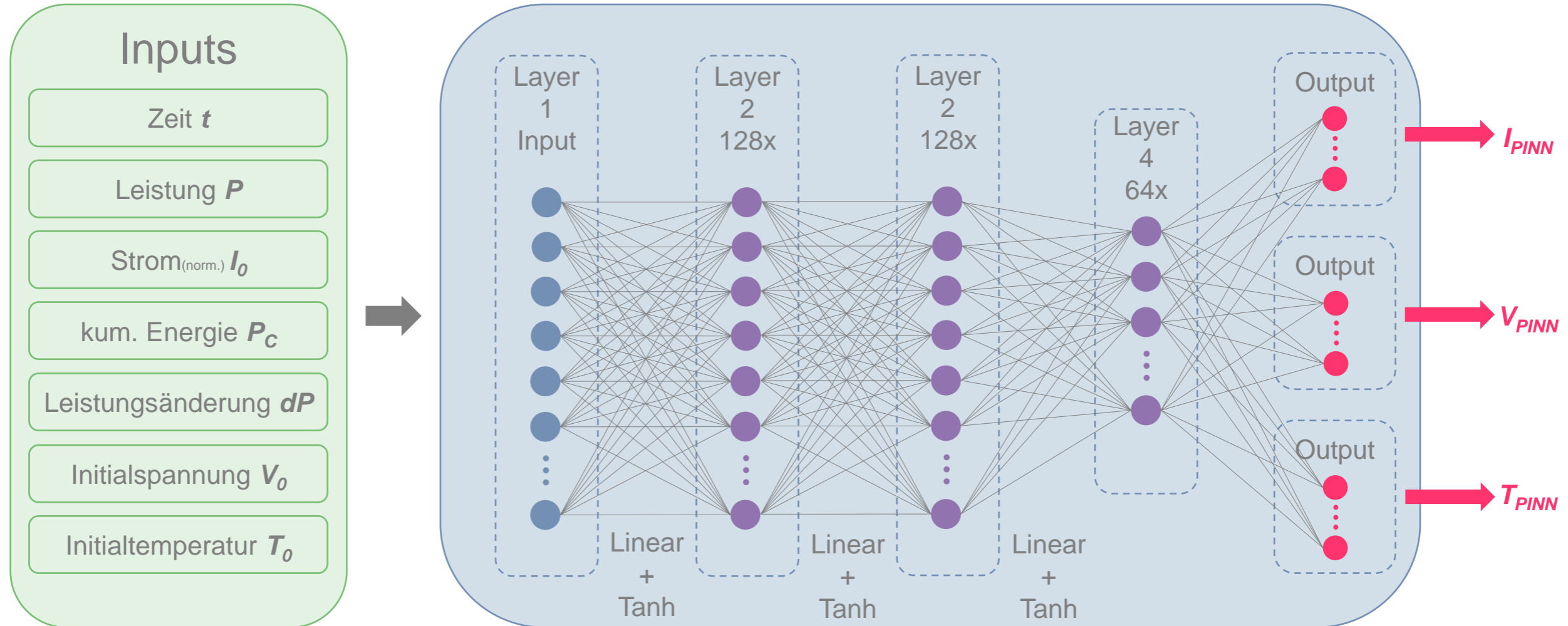
- Gesamtverlust:  $L = 3.0 * L_I + 0.7 * L_V + 2.5 * L_T + 0.2 * L_{glätt} + 1.5 * L_{T_{phys}} + 1.0 * L_{V_{phys}} + 1.0 * L_{T_{dyn}}$

 $I_{PINN}$ 
 $V_{PINN}$ 
 $T_{PINN}$



# PROJEKT TCELL - AUSBLICK

## Physikbasiertes neuronales Netzwerk (PINN)



The information contained in this document may be a confidential attorney-client communication or may otherwise be privileged or confidential. It is the property of Research Area AS and shall not be used, disclosed to others, or reproduced without the express written consent of Research Area AS.



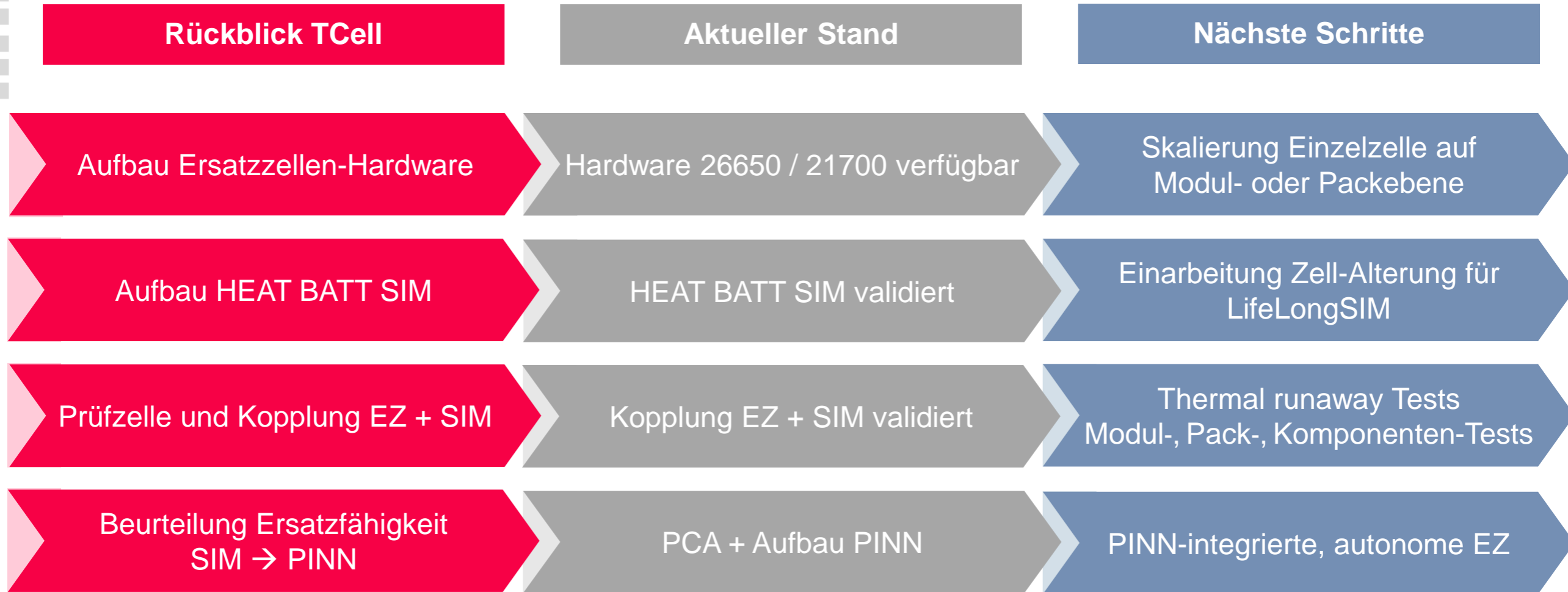
# PROJEKT TCELL - AUSBLICK

## Physikbasiertes neuronales Netzwerk (PINN)





# PROJEKT TCELL - CONCLUSIO



The information contained in this document may be a confidential attorney-client communication or may otherwise be privileged or confidential. It is the property of Research Area AS and shall not be used, disclosed to others, or reproduced without the express written consent of Research Area AS.

# T-Cell HEAT BATT SIM

Vielen Dank!

