



# Battery Passport & Prozessoptimierung für die Batteriezellproduktion



## SynBatt

Batteriezellproduktion

**ENLARGE**

# Motivation

## Herausforderung an Batteriezellherstellung

### Die Fragmentierung der Datenlandschaft

In der Batteriezellproduktion ist die reine Erfassung von Prozessdaten nicht hinreichend. Entscheidend ist eine strukturierte, eindeutige Zuordnung der Daten zu einer konkreten Zelle sowie zu einem Los. Nur auf Basis einer solchen produktbezogenen Datenbasis lassen sich regulatorische Anforderungen (z. B. Battery Passport) belastbar erfüllen und prozesskettenweite Optimierungsansätze methodisch fundiert anwenden.

In der industriellen Praxis wird diese Umsetzung häufig durch heterogene Anlagenlandschaften erschwert. In einer Linie interagieren Systeme unterschiedlicher Hersteller, sodass durchgängige Datenschnittstellen und Kommunikationsprotokolle nicht konsistent verfügbar sind. Daraus resultieren u. a. heterogene Datenformate, uneinheitliche Eventdefinitionen und inkonsistente physikalische Einheiten, was einen erhöhten Integrationsaufwand bei Zeitstempeln, Identifikatoren und Einheitenkonvertierungen verursacht. Zusätzlich erhöhen zahlreiche Prozessschritte sowie der Wechsel zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Abschnitten die Komplexität der Nachverfolgbarkeit über Schrittgrenzen hinweg.

Eine einheitliche Maschinenkommunikation stellt daher eine notwendige Voraussetzung dar, um Datenerhebung, Produktzuordnung und darauf aufbauende Anwendungen robust, skalierbar und herstellerübergreifend umzusetzen.



### Traceability und die regulatorische Pflicht

Die Einführung des digitalen Batteriepasses ist keine Option, sondern durch die EU-Batterieverordnung eine regulatorische Notwendigkeit. Die größte Hürde liegt hier in der lückenlosen Traceability. Um die Anforderungen zu erfüllen, müssen Hersteller die Herkunft und den Prozessweg jedes Bauteils präzise dokumentieren. Diese Herausforderung dient jedoch gleichzeitig als Hebel: Wer seine Daten für den Pass im Griff hat, schafft die notwendige Transparenz, um die gesamte Wertschöpfungskette resilienter und effizienter zu gestalten.

- **Compliance:** Verpflichtende Einführung des Batteriepasses ab 2027 für Industrie- und EV-Batterien
- **Nachweisbarkeit:** Sicherstellung der Materialherkunft und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks entlang der Kette.
- **Skalierbarkeit:** Aufbau einer Infrastruktur, die mit wachsenden regulatorischen Anforderungen mitwächst.

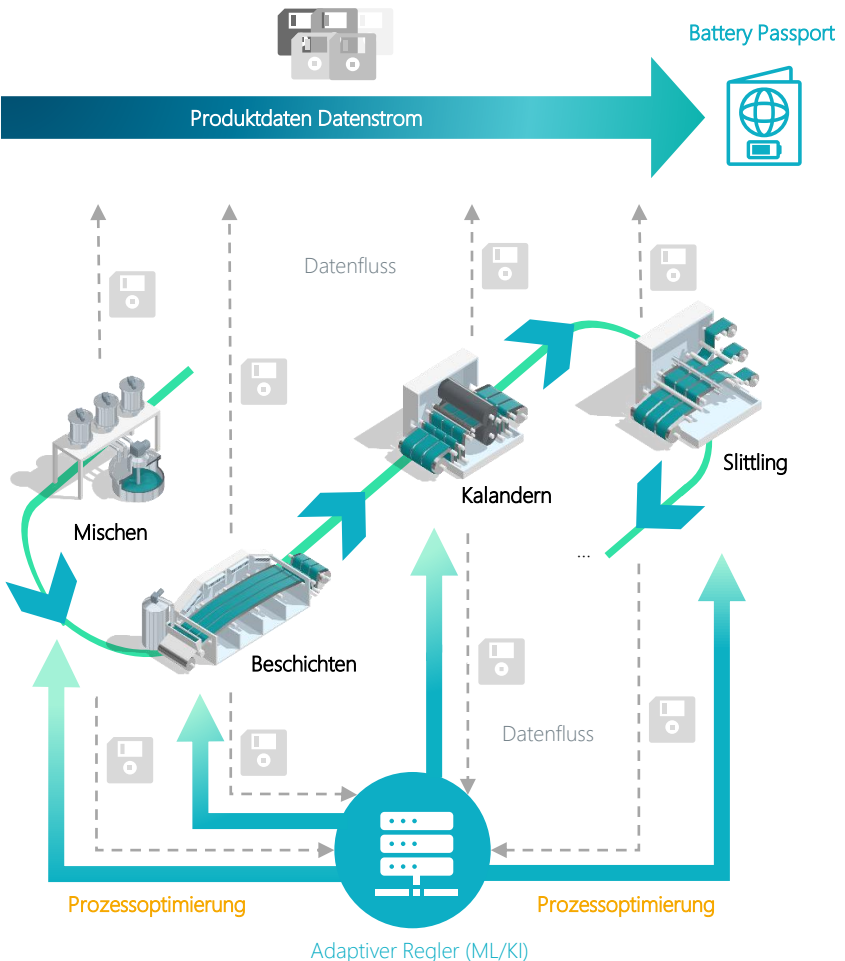
# Motivation

## Synergie aus Regulatorik und operativer Exzellenz

### Vertikale Datenstrom und intelligente Rückkopplung

In der hochkomplexen Batteriezellfertigung fallen in jeder Prozessstufe große Mengen an Prozess- und Qualitätsdaten an. Diese Informationen bilden das Fundament für den digitalen Battery Passport. Durch die lückenlose Aggregation dieser Daten in einem vertikalen Datenstrom wird nicht nur die regulatorische Konformität sichergestellt, sondern ein digitaler Zwilling geschaffen, der die gesamte Wertschöpfungsgeschichte jeder einzelnen Zelle transparent und nachvollziehbar macht.

Der entscheidende Wettbewerbsvorteil entsteht jedoch erst durch die aktive Veredelung der gesammelten Daten. Anstatt die Informationen lediglich zu archivieren, fungieren sie als Befähiger für Machine Learning (ML) und Künstliche Intelligenz (KI). Adaptive Regler können die hochdimensionalen Fertigungsdaten in Echtzeit analysieren, komplexe Wirkzusammenhänge identifizieren und optimierte Parameter zurück in die Produktion spielen.



# Prozessoptimierung

## Technische Grundlagen

### Systematische Vorgehensweise

Um eine belastbare Optimierung zu erreichen, wird ein dreistufiges Prozessmodell genutzt.

- 1. Datenerhebung und –analyse:** Hierbei liegt der Fokus auf der präzisen Erfassung des Ist-Zustands durch moderne Sensorik, begleitet von einer tiefgehenden historischen Datenanalyse. Ergänzend wird eine systematische Versuchsplanung durchgeführt, um alle relevanten Einflussfaktoren zu identifizieren.
- 2. Datenverarbeitung und Optimierung:** Durch Datenbereinigung und anschließende Datenintegration aus verschiedenen Quellen entsteht ein digitales Abbild der Produktion. Auf dieser Grundlage können Optimierungsalgorithmen und Machine-Learning Ansätze zum Einsatz kommen, um die idealen Prozessparameter für maximale Effizienz zu ermitteln.
- 3. Implementierung und Anpassung:** Dabei werden adaptive Steuerungssysteme eingeführt, die autonom und in Echtzeit auf Schwankungen reagieren können. Eine kontinuierliche Prozessüberwachung schließt den Regelkreis und stellt sicher, dass die Produktqualität dauerhaft gewährleistet bleibt.

### Potenziale durch Prozessoptimierung

Die traditionelle regelbasierte Optimierung kann durch die Analyse und Anpassung von Produktionsprozessen die Durchlaufzeiten reduzieren und die Ausschussrate senken. Datenbasierte Methoden wie Machine Learning und künstliche Intelligenz können dabei Muster in hochdimensionalen Datensätzen identifizieren, die mit konventionellen Ansätzen schwer erfassbar sind und ermöglichen damit:

- **Predictive Maintenance:** Vorausschauende Erkennung von Verschleißerscheinungen an Anlagen, um ungeplante Stillstände zu vermeiden und Wartungsintervalle zu optimieren.
- **Anomalie Erkennung:** Echtzeit-Identifikation von subtilen Prozessabweichungen zur Vermeidung von Serienfehlern.
- **Prozesseffizienz:** Dynamische Anpassung von Prozessparametern zur Maximierung des Durchsatzes und der Produktionsgeschwindigkeit.



### Vergleich: Regelbasiert vs. KI-basierte Methoden

Die Auswahl der passenden Methodik hängt maßgeblich von der Datenverfügbarkeit und der Komplexität des Problems ab:

Aspekte	Regelbasierte Optimierung	KI-basierte Optimierung
Datengrundlage	Physikalisches Wissen und Expertenregeln	Historische & Echtzeit Datenmuster
Verfügbare Datensatzgröße	Geringer durch strukturierte Logik	Hoch wegen großer, gelabelter Datensätze
Mögliche Komplexität	Lineare Ursache-Wirkungs-Ketten	Nicht-lineare und komplexe Interaktionen
Anwendung	Bekannte Grenzwerte & Standards	„Black-Box“ Prozesse und Prädiktion

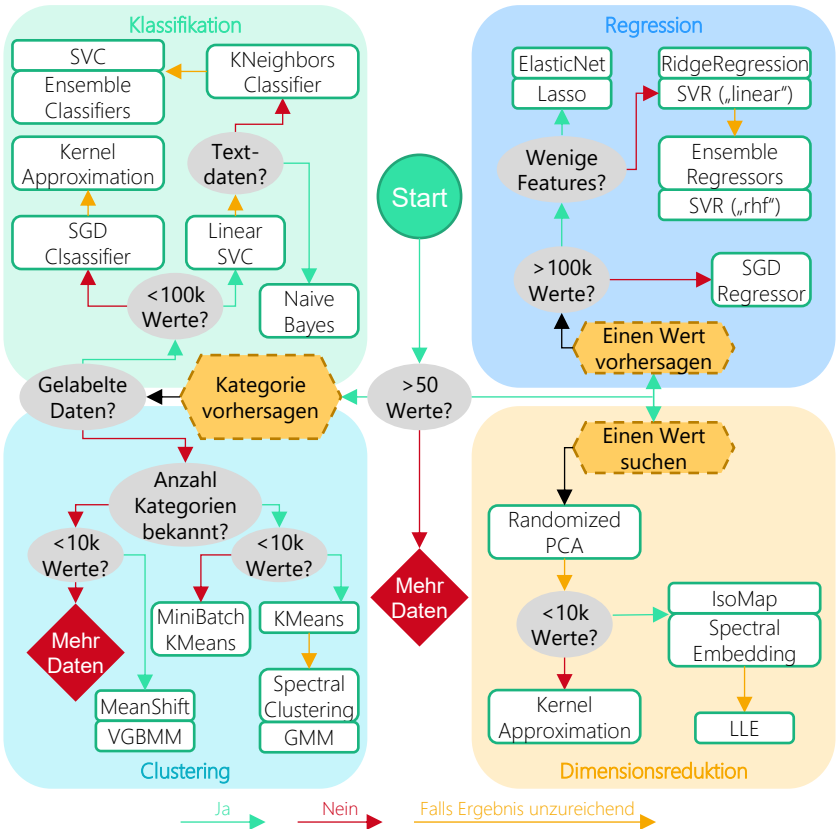
# Prozessoptimierung

## Systematik der Algorithmen-Selektion

### Kriterien bei der Methodenwahl

Die Auswahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens folgt einer strengen logischen Hierarchie, die primär durch den **Stichprobenumfang**, die **Art der Zielvariable** und die **Verfügbarkeit von gelabelten Daten** determiniert wird. Initial ist die Quantität der Datensätze entscheidend: Unterschreitet die Datenbasis eine kritische Masse (z. B.  $< 50$  Beobachtungen), ist eine statistisch valide Modellierung nicht zielführend. Oberhalb dieser Schwelle verzweigt sich der Entscheidungspfad je nach analytischem Ziel in die Kernbereiche Klassifikation, Regression, Clustering oder Dimensionsreduktion.

- **Klassifikation:** Anwendung bei kategorialen Zielgrößen. Bei weniger als 100.000 Datensätzen wird primär der Linear SVC oder der K-Neighbors-Classifer evaluiert.
- **Regression:** Einsatz zur Vorhersage kontinuierlicher Werte. Hierbei bilden Lasso- oder Ridge-Verfahren die Basis, während bei großen Datenmengen ( $> 100k$ ) auf den SGD Regressor skaliert wird.
- **Clustering:** Nutzung zur Strukturaufdeckung in ungelabelten Daten, etwa zur Identifikation unbekannter Prozesszustände mittels K-Means oder Mean Shift.
- **Dimensionsreduktion:** Transformation hochdimensionaler Merkmalsräume in eine effizientere Darstellung zur Extraktion der signifikantesten Einflussfaktoren und Minimierung von Datenrauschen, beispielsweise mittels Principal Component Analysis (PCA) oder Isomap.



# Angewendete Optimierung

## Datengetriebene Optimierung der Formation

Aufbauend auf der standardisierten Datenerfassung und durchgängigen Traceability wurde ein prototypisches System zur datengetriebenen Optimierung der Batteriezellfertigung entwickelt. Der Fokus liegt auf der Formierung von Rundzellen unter Einbeziehung der gesamten Prozesskette. Der entwickelte Prototyp stellt dabei eine konkrete Anwendung dieses Ansatzes dar.

Anhand der Optimierung der Formierung wird exemplarisch gezeigt, wie historische Produktionsdaten gezielt zur Ableitung von Prozessparametern genutzt werden können.

Die Formierung stellt dabei einen besonders geeigneten Anwendungsfall dar. Sie hat einen direkten Einfluss auf die Qualität der finalen Zelle und erfolgt am Ende der Prozesskette, sodass Daten aus einer Vielzahl vorgelagerter Prozessschritte für die Analyse zur Verfügung stehen.

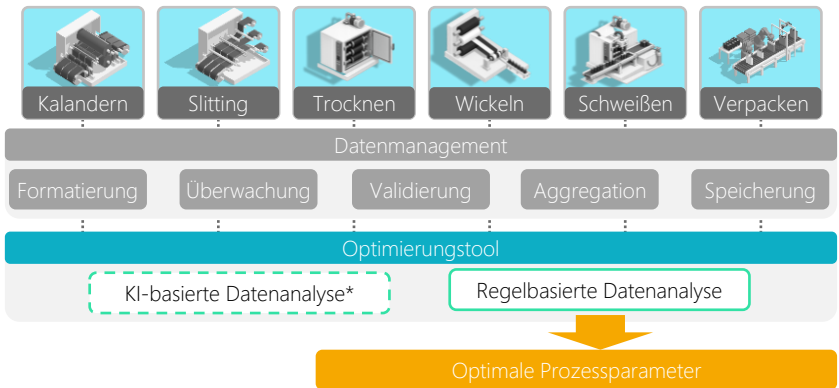
## Systemansatz

- Nutzung historischer Produktionsdaten aus der Formierung
- Einbeziehung vorgelagerter Prozessschritte
- Eindeutige Zuordnung aller Daten zu einzelnen Zellen (Traceability)
- Standardisierte Schnittstellen zur Maschinenintegration

## Datenbasis und Systemintegration

Das Optimierungssystem ist über eine standardisierte Schnittstelle mit dem Traceability-System **FFTrace** verbunden.

FFTrace aggregiert Produktionsdaten in Form von Traceability-Events, die Maschinen-, Produkt- und Qualitätsdaten umfassen und eindeutig einzelnen Batteriezellen zugeordnet sind. Dadurch entsteht eine konsistente, zellbezogene Datenbasis entlang der gesamten Prozesskette. Diese strukturierte Datengrundlage ermöglicht eine gezielte Auswertung historischer Produktionsverläufe auf Einzelzellebene.



Das entwickelte Tool liest zellbezogene, aggregierte Produktionsdaten aus FFTrace, analysiert historische Prozess- und Qualitätsdaten, identifiziert relevante Einflussgrößen und Zusammenhänge, leitet optimierte Formierungsprozeduren ab.

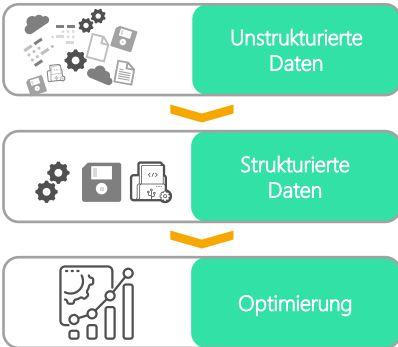
Der Ansatz besitzt Systemcharakter und wird in Form eines prototypischen Demonstrators umgesetzt. Im Mittelpunkt steht die individuelle Datenanalyse auf Zellebene, die eine datenbasierte Unterstützung der Prozessparametrierung ermöglicht und perspektivisch um KI-gestützte Analyseverfahren erweitert werden kann.

# Potenziale und Anwendung

## Identifizierte Potenziale

### Prozessübergreifende Optimierung

- Verknüpfung von Daten entlang der gesamten Prozesskette
- Erkennung komplexer Wirkzusammenhänge



### Verbesserte Prozessführung

- Gezieltere Parametrierung der Formierung
- Stabilisierung der Zellperformance

### Skalierbarkeit durch Standardisierung

- Übertragbarkeit auf weitere Linien und Standorte
- Grundlage für durchgängige digitale Produktionssysteme

### Individuelle Datenanalyse

- Auswertung auf Einzelzellebene durch FFTrace
- Berücksichtigung individueller Produktionshistorien
- Anpassung von Formierungsparametern auf Basis zellindividueller Daten

### Effiziente Datennutzung

- Nutzung bestehender Traceability-Daten über Dokumentation hinaus
- Reduzierung experimenteller Aufwände

## Erwarteter Mehrwert

**Produktion**

- Reduzierter Ausschuss durch gezielte Parametrierung
- Verkürzte Anlaufphasen bei neuen Produktlinien & Prozessanpassungen

**Entwicklung**

- Schnellere Ableitung optimaler Prozessparameter
- Verbesserte Entscheidungsbasis durch fundierte Datenbasis

**Infrastruktur**

- Effizientere Nutzung bestehender Dateninfrastruktur
- Aufbau datengetriebener Anwendungen

## Einordnung und Perspektive

Der vorgestellte Ansatz kann in verschiedenen Bereichen der Batteriezellfertigung eingesetzt werden, etwa zur Optimierung von Formierungsprozessen in der Serienproduktion, zur Unterstützung von Pilot- und Entwicklungsanlagen sowie zur Analyse bestehender Produktionslinien. Durch standardisierte Schnittstellen ist zudem eine Integration in bestehende Produktions- und Traceability-Systeme möglich.

Aufbauend auf der vorhandenen Dateninfrastruktur kann der Ansatz zukünftig durch Machine Learning und KI erweitert werden, um komplexe Zusammenhänge automatisiert zu erkennen und die Prozessführung weiter zu verbessern.

# Battery Passport

## Hintergrund und Anforderungen

### Der Weg zum obligatorischen digitalen Battery Passport 2027

Die EU-Verordnung 2023/1542 ist ein zentrales Element des europäischen Green Deals und zielt darauf ab, die Kreislaufwirtschaft für Batterien zu systematisieren. Batterien sollen in Europa nicht länger als Wegwerfprodukte, sondern als wertvolle Ressourcen behandelt werden.

Was als visionärer Entwurf der Europäischen Kommission begann, hat sich mittlerweile zu einem verbindlichen Gesetz entwickelt. Damit schafft die EU erstmals einen rechtlichen Rahmen, der Transparenz über den gesamten Lebenszyklus einer Batterie fordert. Der digitale Battery Passport ist dabei das Herzstück dieser Initiative. Er fungiert als digitaler Lebenslauf und wird ab Februar 2027 zur Pflicht. Für Unternehmen bedeutet das den Übergang von der freiwilligen Nachhaltigkeit hin zu systematischer, digitaler Nachvollziehbarkeit.



### Spezifikation und Informationsgehalt

Der digitale Battery Passport fungiert als digitaler Zwilling, der über einen physisch am Gehäuse angebrachten QR-Code zugänglich gemacht wird. Er ist verpflichtend für Traktionsbatterien (EV), Batterien für leichte Verkehrsmittel (LMT) sowie Industriebatterien mit einer Kapazität von mehr als 2 kWh. Das Ziel ist eine lückenlose Transparenz über den gesamten Lebenszyklus. Die zu hinterlegenden Daten umfassen dabei sowohl statische Produktinformationen als auch dynamische Leistungsdaten.

- **Nachhaltigkeitsparameter:** Ausweis des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks sowie Quoten für den Einsatz von Rezyklaten (Lithium, Kobalt, Nickel, Blei):
- **Technische Spezifikationen:** Detaillierte Angaben zu Kapazität, Leistung, Haltbarkeit und dem aktuellen State of Health (SOH) über das Batteriemanagementsystem.
- **Zirkularität:** Informationen zur Reparierbarkeit, chemischen Zusammensetzung sowie Nachweise zur Einhaltung von Menschenrechten und Umweltstandards in der Lieferkette.



### EU Battery Passport



Herstellungsdaten



Material



Leistungsdaten



Carbon Footprint



Zustandsüberwachung



Entsorgung

# Battery Passport

## Implementierung

### Interoperabilität mittels OPC UA im Projekt ENLARGE

Die technische Realisierung des digitalen Battery Passport erfordert eine nahtlose Kommunikation zwischen heterogenen Anlagensystemen. Innerhalb des Projekts ENLARGE wird hierfür auf den Industriestandard **OPC UA** gesetzt.

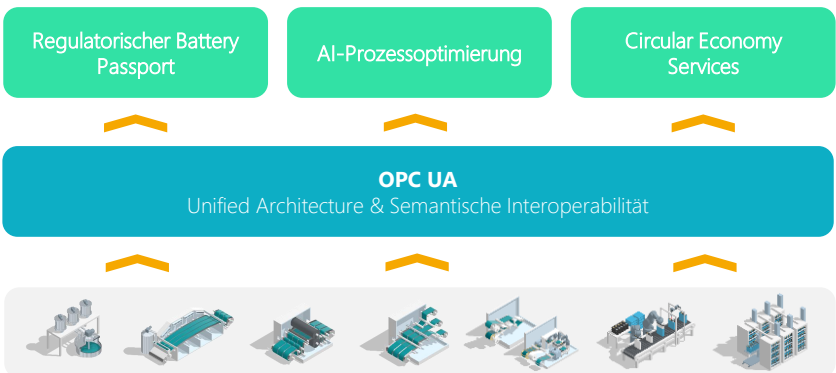
OPC UA ist eine plattformunabhängige, serviceorientierte Architektur, die über den reinen Datentransport hinausgeht. Durch die Definition standardisierter Informationsmodelle (Companion Specifications) ermöglicht OPC UA eine semantische Interoperabilität: Maschinen unterschiedlicher Hersteller sprechen eine einheitliche Sprache. Dies stellt sicher, dass Prozessparameter, Zeitstempel und Eventdefinitionen über die gesamte Fertigungslinie hinweg konsistent erfasst und ohne manuellen Transformationsaufwand in den Battery Passport überführt werden können.

- **Herstellerunabhängigkeit:** Standardisierte Schnittstellen für Bestands- und Neuanlagen.
- **Informationsmodellierung:** Strukturierung von Rohdaten in kontextualisierte, maschinenlesbare Informationen.
- **Security by Design:** Integrierte Verschlüsselungs- und Authentifizierungsmechanismen für den sicheren Datenaustausch.

### Über die regulatorische Compliance hinaus

Die durch OPC UA geschaffene Dateninfrastruktur fungiert als Enabler für weiterführende industrielle Anwendungen. Die hochgradige Datendurchgängigkeit erlaubt es, über den statischen Lebenszyklus hinaus operative Vorteile zu generieren. Durch die Verknüpfung der Batteriepass-Daten mit modernen Analysetools entstehen Synergien, die die Wirtschaftlichkeit der Produktion nachhaltig steigern und neue Geschäftsmodelle im Sinne der Kreislaufwirtschaft ermöglichen.

- **Predictive Maintenance:** Nutzung harmonisierter Maschinendaten zur Vorhersage von Wartungsintervallen.
- **Supply Chain Resilience:** Echtzeit-Transparenz über Materialflüsse zur proaktiven Steuerung der Lieferkette.
- **Second-Life-Optimierung:** Präzise Bewertung des Restwerts (State of Health) für die automatisierte Sortierung und Wiederverwendung von Zellen.
- **Automatisierte Zertifizierung:** Reduktion des administrativen Aufwands durch digitale Nachweise von Nachhaltigkeitskriterien.



# Battery Passport

## Architektur

### Transparenz vom Rohstoff bis zum Recycling: Der digitale Battery Passport

Lückenlose Transparenz über den Batterielebenszyklus erfordert eine durchgängige, standardisierte Datenarchitektur. ENLARGE realisiert dies über drei klar getrennte Schichten, die zusammen den Weg vom Maschinensignal zum regulatorisch konformen Battery Passport schließen.

#### Schicht 1: Prozessnahe Datensysteme

Systeme erzeugen Daten entlang der gesamten Wertschöpfungskette: FFTrace und OPC UA in der Batteriezellproduktion, MES und LIMS in der Qualitätssicherung, WMS und ERP in Logistik und Handel. Das strukturelle Problem dieser Ebene: Jedes System deckt nur seinen eigenen Ausschnitt ab und kommuniziert in proprietären Formaten.

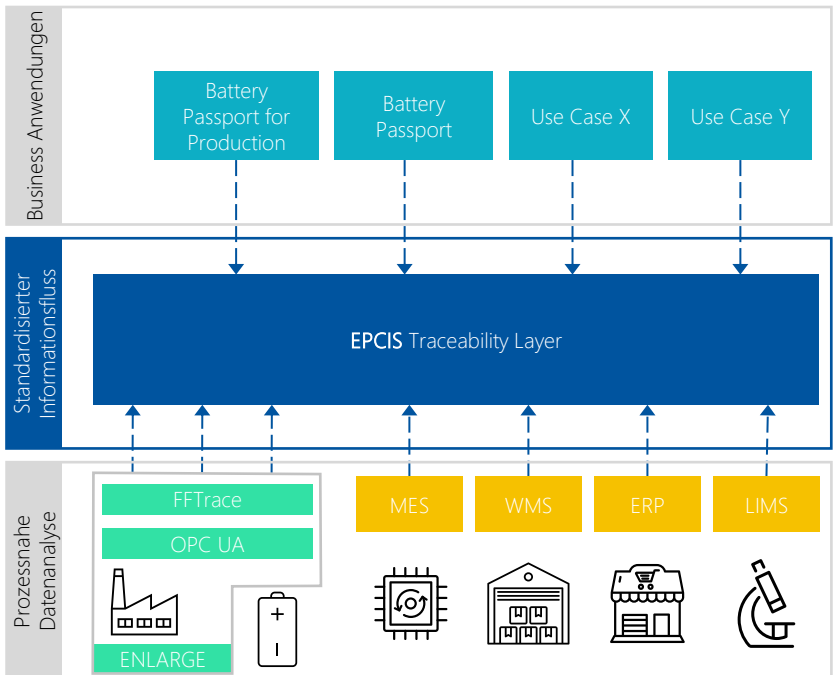
#### Schicht 2: EPCIS Traceability Layer

Die EPCIS-Schicht (Electronic Product Code Information Services) ist die standardisierte Brücke, die isolierte Datensilos auflöst. Sie beantwortet systematisch: Was wurde wann, wo, warum und wie getan? – firmenübergreifend, in einer einheitlichen Ereignissprache. EPCIS sammelt die Teilstücke der Batteriehistorie aus allen vorgelagerten Systemen und fügt sie zu einem lückenlosen Gesamtbild zusammen.

#### Schicht 3: Anwendungen

Auf dieser validierten Datenbasis operieren die eigentlichen Mehrwertanwendungen:

- Battery Passport for Production: Produktionsbezogener Teilpass für die Zellfertigung – erster und kritischer Baustein des vollumfänglichen Battery Passports
- Battery Passport: Vollständiger digitaler Lebenslauf gemäß EU-Batterieverordnung
- Erweiterbare Use Cases: Die standardisierte Schicht ermöglicht die Integration weiterer Anwendungen ohne Systemumbau



# Battery Passport



## Umsetzung in ENLARGE

### Der digitale Battery Passport



Der BPP ist kein statisches Dokument, das nach der Produktion unverändert mit der Batterie verbunden ist. Es ist vielmehr ein dynamisches Dokument, in dem über die gesamte Lebenszeit und darüber hinaus Daten einfließen und die Kennzahlen verändern. Diese Möglichkeit muss systemisch und vorausschauend geschaffen werden.

Jede beteiligte Organisation erfasst dabei nur die eigenen Aktivitäten am Produkt: was gemacht wurde, wann, wo, warum und wie. Auf dieser Grundlage entsteht entlang der Wertschöpfungskette ein vollständiges und nachvollziehbares Bild.

Die Nutzung von globalen Standards ermöglicht die interoperable Verwendung der Daten über Unternehmens- und Systemgrenzen hinweg. Eine Berechnungs-Engine aggregiert die Informationen und erzeugt daraus die relevanten Daten für den Batteriepass. So wird seine Dynamisierung über den gesamten Batterie-Lebenszyklus hinweg möglich.





Made with ❤️ by EECC



### DPP from Battery Cell Production

DPP Description: 04047111777779  
<https://pp.dpp-wl.prod-k8s.eecc.de/01/04047111777779/21/DRCL%3ATS4401066-4>



### Electrical Measurements

Electrical measurements including voltage, resistance, capacity, and charge state

Cell Voltage	2.1 V
Acir	0.00352 Ohm
Hipot Test	4 Ohm
Capacity	4.32 Ah
Self Discharge Rate	0.014 A

- Dimensions
- Physical Measurements
- Electrical Measurements**
- Test Results
- Environmental Impact

Wichtig ist zudem, dass die komplette Historie erhalten bleibt – auch bei Zwischenprodukten und im Recyclingprozess. Gleichzeitig muss der Batteriepass erweiterbar sein: sowohl entlang der Wertschöpfungskette als auch um zusätzliche Daten.

ENLARGE berücksichtigt diese Anforderungen bereits durch eine Datenarchitektur, die auch Informationen aus weiteren Quellen verarbeiten kann..

Der vollumfängliche BPP lt. Batterieverordnung BattVo EU 2023/1542 verwendet die in den Produktionsprozessen erfassten Informationen und erweitert diese mit Ereignisdaten aus dem gesamten Lebenszyklus der Batterie / des Produkts.

# Anwendung

## Sicherung der Anwendbarkeit

### Synergien durch Daten: Die ENLARGE Use-Cases

Der praktische Erfolg des ENLARGE-Projekts manifestiert sich in der Umsetzung von **drei komplementären Anwendungsbeispielen**, die den Mehrwert einer durchgängigen Datenbasis entlang der Batteriezellproduktion demonstrieren:

- **Prozessoptimierung:** Durch die Abfrage der detaillierten Produkthistorie ermöglicht dieses System eine regelbasierte Auswertung, um beispielsweise präzise Formierungsvorschläge für die finale Zellaktivierung zu generieren.
- **Traceability:** Das Herzstück der Architektur identifiziert und aggregiert Produktionsereignisse (Events) über alle Prozessschritte hinweg, um einen lückenlosen digitalen Schatten der Zelle zu erzeugen.
- **Battery Passport:** Dieses Modul bereitet validierte Produktionsdaten so auf, dass sie den regulatorischen Anforderungen an Transparenz und Nachhaltigkeit entsprechen und als Grundlage für den zukünftigen digitalen Batteriepass dienen.



### Die Module „Prozessoptimierung“ und „Battery Passport“ in der Systemarchitektur

Das Modul zur **Prozessoptimierung** agiert als intelligentes Analyse-Werkzeug oberhalb der Datenspeicherung. Der Prozess folgt einer dreistufigen Logik innerhalb des Optimierungssystems:

- **Abfrage der Produkthistorie:** Über eine standardisierte REST API bezieht das System die notwendigen Produktionsdaten aus dem Data Backbone. Hierbei wird die gesamte Entstehungsgeschichte eines Bauteils basierend auf der eindeutigen Identität abgerufen.
- **Analyse und Auswertung:** Im Kern des Moduls findet eine regelbasierte Auswertung (oder KI-gestützte Analyse) statt. Hier werden Ist-Parameter mit Zielvorgaben verglichen, um Abweichungen im Fertigungsprozess zu identifizieren.
- **Generierung von Optimierungsvorschlägen:** Das Ergebnis ist beispielsweise ein konkreter Formierungsvorschlag oder eine Anpassung der Maschinenparameter. Diese Vorschläge werden direkt an die externe Produktionssteuerung zurückgegeben, wodurch der Optimierungskreislauf geschlossen wird.

Das Modul **„Battery Passport“** dient der Aggregation lebenszyklusrelevanter Informationen für interne und externe Stakeholder. Es stützt sich primär auf die im EPCIS Repository hinterlegten Event-Daten:

- **Daten-Validierung:** Bevor Informationen in den Pass einfließen, durchlaufen sie eine Validierungsschicht, um die Integrität und Vollständigkeit der Datensätze sicherzustellen.
- **Daten-Aggregation:** In diesem Schritt werden die validierten EPCIS-Events zu einem kohärenten digitalen Zwilling zusammengeführt. Dabei werden disparate Informationen über Materialherkunft und Prozessqualität konsolidiert.
- **Darstellung:** Das finale Sub-Modul bereitet die komplexen Datenstrukturen für die Darstellung auf (z. B. via User Interface oder API für Behörden), um die Anforderungen der EU-Batterieverordnung transparent zu erfüllen.

# Wirtschaftliche Perspektiven

## Wie können Unternehmen profitieren?

### Gemeinsame Beteiligung aller Akteure

Die Realisierung einer lückenlosen Traceability und eines validen Battery Passports erfordert eine systemübergreifende Kooperation aller Akteure innerhalb des industriellen Ökosystems. Erst durch die Integration von Materialherstellern, Maschinenbauern, Zellproduzenten und OEMs entsteht ein konsistenter Datenraum, der über den gesamten Lebenszyklus der Batterie hinweg Bestand hat. Dieser kooperative Ansatz ist die zwingende Voraussetzung dafür, isolierte Optimierungspotenziale in eine ganzheitliche, datengestützte Prozesssteuerung zu überführen, von der alle Partner ökonomisch profitieren.



Material- & Komponentenhersteller



Maschinen- & Anlagenbauer



Batteriezellproduzenten



OEMs

### Strategische Vorteile in einem globalen Marktumfeld

Die Implementierung vernetzter Produktionssysteme ist der primäre Treiber für eine signifikante Effizienzsteigerung. Durch die datenbasierte Qualitätskontrolle in Echtzeit können Fehler bereits im Entstehungsprozess erkannt und korrigiert werden, was die Ausschussraten drastisch reduziert. Diese digitale Transformation sichert Unternehmen entscheidende Wettbewerbsvorteile, da sie eine hochflexible und zugleich kosteneffiziente Batteriezellfertigung ermöglicht, die den steigenden Anforderungen an Präzision und Skalierbarkeit gerecht wird.

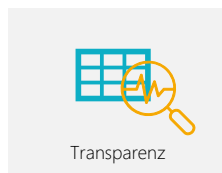
- **Kostensenkung:** Reduktion von Ausschussrate durch präventive Prozessanpassungen.
- **Marktpositionierung:** Sicherung globaler Wettbewerbsfähigkeit durch technologische Innovationsführerschaft.
- **Transparenz:** Fundierte Entscheidungsgrundlagen durch validierte Prozessdaten.



Kostensenkung



Marktpositionierung

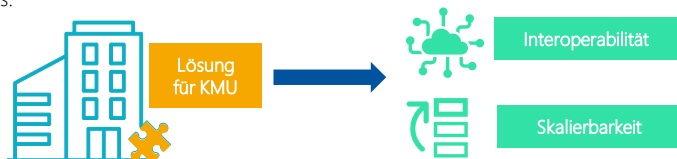


Transparenz

### Potenzial für KMU und globale Standardisierung

Besonders für **kleine und mittelständische Unternehmen (KMU)** bietet die im Projekt ENLARGE vorangetriebene Standardisierung via OPC UA enorme Chancen. Durch einheitliche Schnittstellen und "Maschinensprachen" werden technologische Eintrittsbarrieren gesenkt, sodass KMU ohne kostspielige Individualsoftware in hochkomplexe Wertschöpfungsketten integriert werden können. Die Standardisierung ermöglicht es ihnen, als spezialisierte Akteure auf dem globalen Markt mitzuwirken und ihre Innovationen interoperabel in bestehende Fertigungslinien einzubringen.

- **Interoperabilität:** Nahtlose Anbindung spezialisierter KMU-Lösungen an Großanlagen.
- **Skalierbarkeit:** Einfache Erweiterung der Produktionskapazitäten durch modulare Standards.

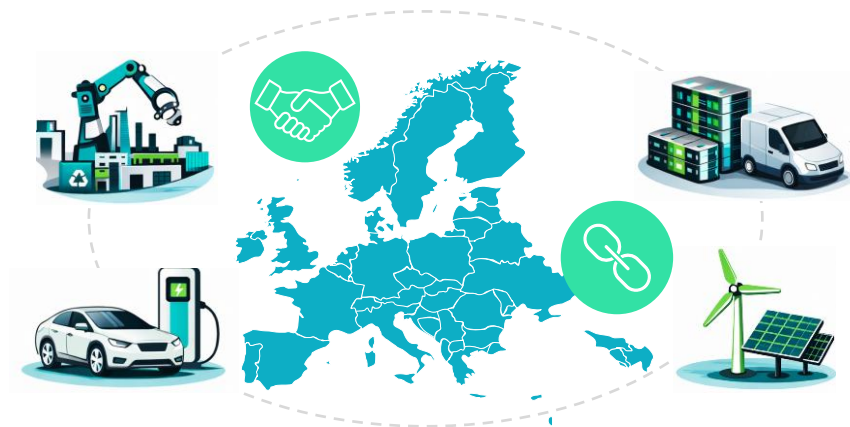


# Zukunftsausblick

## Langfristige Erfolge

### Der Beitrag für Europa

- Die Ergebnisse von ENLARGE schaffen einen erheblichen Mehrwert und stärken die Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Maschinen- und Anlagenbauer.
- Befähigung zur schnelleren Reaktion auf Innovationen und zur Erreichung flexibler, modularer Produktionslinien.
- Etablierung einer datengestützten, durchgehenden Kreislaufwirtschaft für Batterien durch harmonisierte Datenstandards.



## Verwertung der Ergebnisse

### Wirtschaftliche Impulse

- Die entwickelten Software-Tools fließen direkt in digitale Plattformen der Partner ein.
- Die Standards ermöglichen die Erschließung neuer Geschäftsfelder und positionieren europäische Unternehmen als führende Lösungsanbieter für den Digitalen Batteriepass.

### Wissenschaftliche Exzellenz

- Interoperable Standards und einheitliche Datenschnittstellen befähigen die bestehende Forschungsinfrastruktur zu verbesserter datenbasierter Optimierung von Forschungsergebnissen und stärken den deutschen Wissenschaftsstandort langfristig.

### Vision für die Zukunft

- **Basis für Innovation:** Die erarbeiteten Standards bilden das stabile Fundament für die Weiterentwicklung digitaler Lösungen weit über die heutige Batteriezellfertigung hinaus.
- **Übertragbarkeit:** Die entwickelte Methodik und die Modelle sind zukunftssicher. Sie lassen sich auf verwandte Anwendungsgebiete wie Post-Lithium-Batterien oder Brennstoffzellen übertragen.

# Weitere Broschüren

## Einführung in das Thema und Traceability

Die Inhalte des ENLARGE-Projekts werden in zwei weiteren Broschüren vertieft: Die allgemeine Projektbroschüre stellt den übergeordneten Rahmen vor, während die zweite Broschüre Traceability im Detail behandelt.

### Datengetriebene Batteriewertschöpfungskette durch interoperable Produktion

Europas Batterieproduktion steht unter erheblichem Wettbewerbsdruck. Asiatische Hersteller verfügen über jahrzehntelang akkumuliertes Prozesswissen, das sich nicht kurzfristig kompensieren lässt. Der entscheidende Hebel liegt in der konsequenten Digitalisierung der Fertigung – doch die Shopfloor-Realität steht dem entgegen: Maschinen kommunizieren in proprietären Formaten, Messwerte treffen ohne Kontext ein, systemübergreifende Analysen scheitern an inkonsistenten Schnittstellen.

Diese ENLARGE-Broschüre zeigt, wie das Projekt an dieser Grundproblematik ansetzt: durch einen gemeinsamen semantischen Rahmen auf Basis von OPC UA, der Maschinen, Prozesse und Produktdaten erstmals herstellerübergreifend verknüpft. Einheitliche Maschinenkommunikation ist dabei keine rein technische Frage, sondern die Grundvoraussetzung für Traceability, Battery Passport und datengetriebene Prozessoptimierung gleichermaßen.



### Traceability in der Batteriezellproduktion

Woher kommt das Material in dieser Batteriezele? Welche Maschine hat sie verarbeitet, unter welchen Bedingungen, zu welchem Zeitpunkt? Die Traceability-Broschüre zeigt, wie ENLARGE auf diese Fragen eine präzise Antwort liefert. Validiert am Traceability-System FFTrace, das maschinennahe Prozessdaten über OPC UA, jeweils bezogen auf das konkrete Zwischen- oder Endprodukt, erfasst und zu standardisierten EPCIS-Events transformiert. So verfolgt FFTrace jede einzelne Zelle durch den gesamten Produktionsprozess, vom Kalandrieren über das Wickeln bis zur Zelleassemblierung, und verknüpft dabei Daten, die bislang isoliert in verschiedenen Systemen schlummerten. Das Ergebnis ist ein lückenloser digitaler Lebenslauf für jede Zelle, der die Grundlage für eine neue Generation intelligenter Qualitätssicherung und Prozessoptimierungen schafft. Die offene Architektur stellt sicher, dass das System jederzeit um weitere Prozessschritte und externe Partner erweiterbar bleibt.



# Das Konsortium

## Partnernetzwerk

### Branchenübergreifende Expertise

Das Konsortium vereint erfahrene Partner aus dem Maschinen- und Anlagenbau, der Automatisierung, der Softwareentwicklung sowie der Produktions- und Batterieforschung. Auf diese Weise wird es ermöglicht, den gesamten Batterie-Produktionsprozess zu beschreiben, sinnvolle Parameter zu wählen und das digitale Gerüst zur Nachverfolgbarkeit aufzubauen.

### Partner

- ANDRITZ Schuler GmbH (Konsortialführer)
- FFT Produktionssysteme GmbH & Co. KG
- European EPC Competence Center GmbH (EECC)
- ELABO GmbH
- Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA)
- Karlsruher Institut für Technologie - wbk Institut für Produktionstechnik
- Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
- Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB

### Assoziierte Partner

- NanoFocus AG
- SICK AG
- Saueressig GmbH & Co. KG
- Siemens AG
- mk Technology Group



Weitere Infos unter:

[www.enlarge-projekt.de](http://www.enlarge-projekt.de)

