



Traceability in der Batteriezellproduktion



SynBatt

Batteriezellproduktion

ENLARGE

Traceability

In der Batteriezellproduktion als Enabler-Technologie

Fundament der digitalen Transformation und Qualitätssicherung

Im Umfeld industrieller Fertigungsprozesse wird Traceability als **die Fähigkeit** verstanden, **den gesamten Lebenszyklus eines Produkts oder einer Baugruppe vollständig und lückenlos nachzuvollziehen**. Dies umfasst die Identifikation der Komponenten, die Erfassung von Prozessdaten, die Dokumentation sämtlicher Qualitätsprüfungen sowie die Speicherung der gesammelten Daten in entsprechenden Systemen.

In der hochkomplexen Batteriezellfertigung ist Traceability ein technologischer Befähiger, um die Ursachen von Schadensfällen zu identifizieren, potenzielle Qualitätsmängel frühzeitig zu erkennen und kontinuierliche Verbesserungsmaßnahmen umzusetzen.

Methodische Abgrenzung: Tracking vs. Tracing

Im Kontext industrieller Nachverfolgung werden Tracking und Tracing häufig gleichgesetzt. Konzeptionell unterscheiden sie sich jedoch grundlegend:

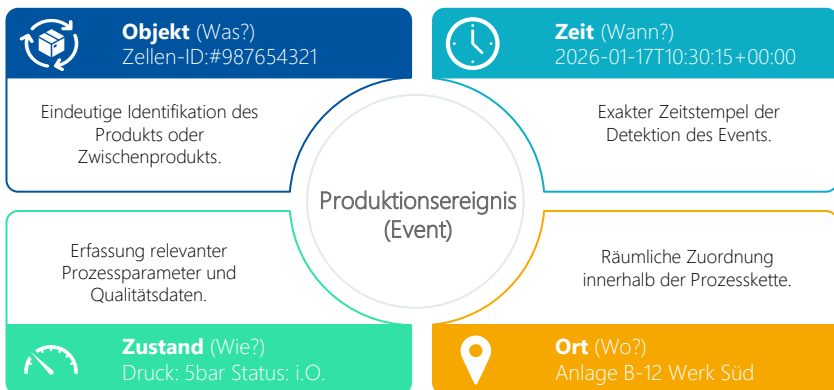
- Tracking: Beschreibt **die vorwärtsgerichtete Echtzeit-Verfolgung**. Hierbei steht die aktuelle Position und der geplante Weg eines Objekts im Fokus. Es beantwortet die Frage: „Wo befindet sich die Charge aktuell und wohin wird sie gesteuert?“
- Tracing: Beschreibt **die rückwärtsgerichtete Analyse**. Hierbei wird die Historie eines Endprodukts rekonstruiert. Es beantwortet die kritische Frage: „Aus welchen Materialien wurde diese Zelle gefertigt und welche Prozessparameter wurden an welcher Anlage angewendet?“



Das Produktionsereignis als Datenbasis

Die Grundlage jedes Traceability-Systems bildet das **Produktionsereignis (Event)**. In der industriellen Fertigung wird darunter die kleinste messbare Einheit einer Zustandsänderung oder eines Prozessschrittes verstanden.

Um eine physische Zelle digital zweifelsfrei abzubilden, muss jedes Ereignis durch ein standardisiertes Datenmodell erfasst werden. Diese Events werden durch vier zentrale Dimensionen definiert, die den Informationsgehalt determinieren.



Warum Traceability?

Vom regulatorischen Standard zum Wettbewerbsvorteil

Strategische Bedeutung der Traceability

Traceability bildet die datentechnische Grundlage für drei strategische Handlungsfelder, die in der Batteriezellfertigung zunehmend an Bedeutung gewinnen:

- **Qualitätssteigerung:** Durch die Verknüpfung von Prozess- und Qualitätsdaten werden Fehlerursachen transparent. Dies erlaubt ein schnelles Eingreifen in die Fertigungsparameter und sichert eine konstant hohe Produktgüte.
- **Regulatorische Compliance:** Traceability liefert die notwendige Datenbasis für den digitalen Batteriepass gemäß EU-Batterieverordnung und ermöglicht die lückenlose Nachweisführung über Herkunft und Fertigung.
- **Nachhaltigkeit:** Für die Berechnung eines Product Carbon Footprint (PCF) ist die exakte Allokation von Ressourcenverbräuchen auf die einzelne Batteriezelle unerlässlich.

Gemeinsame Beteiligung aller Akteure

Traceability generiert bereits auf Ebene einzelner Akteure messbaren Mehrwert. Die Vorteile reichen von nachweisbarer regulatorischer Compliance und belastbaren Qualitätsdaten bis hin zu einer durchgängigen Datenbasis für den digitalen Batteriepass.

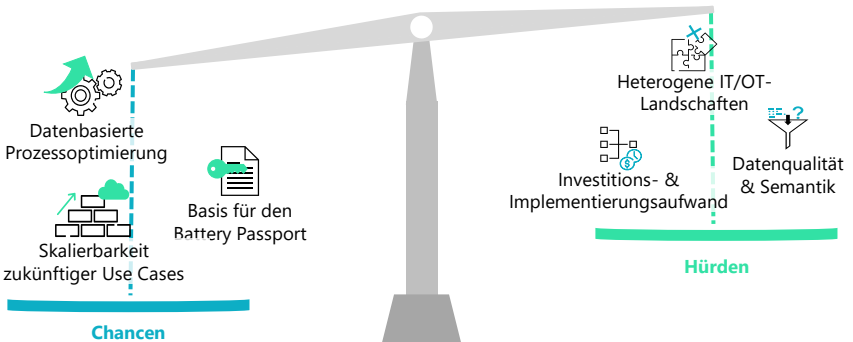
Das Grundprinzip gilt dabei übergreifend: Je breiter die Einbindung entlang der Wertschöpfungskette, desto größer der Nutzen für das Gesamtsystem.



Spannungsfeld Traceability: Potenziale heben, Hürden meistern

Potenziale durch werttreibende Daten: Jenseits regulatorischer Notwendigkeiten entfaltet die vernetzte Kollaboration ihr volles Potenzial in der operativen Wertschöpfung. Der unternehmensübergreifende Datenaustausch ist hierbei der direkte Befähiger für eine **datenbasierte Prozessoptimierung**. Durch die Korrelation von Produktionsparametern lassen sich Effizienzsteigerungen realisieren und Fehlerquellen systematisch eliminieren. Zudem bildet diese Datenbasis die Grundlage für die **Skalierbarkeit zukünftiger Use Cases**, beispielsweise Predictive Quality und geschlossene Recycling-Kreisläufe, und wandelt isolierte Informationen in nachhaltigen Geschäftswert um.

Herausforderungen durch Integration und Harmonisierung: Die technische Realisierung dieses Mehrwerts impliziert die Bewältigung struktureller Hürden. Insbesondere die Integration historisch gewachsener, **heterogener IT/OT-Landschaften** sowie die Sicherstellung konsistenter **Datenqualität und Semantik** erfordern eine stringente Standardisierung. Der damit verbundene **Investitions- und Implementierungsaufwand** ist folglich nicht als bloßer Kostenfaktor, sondern als essenzielle Vorleistung für die Zukunftsfähigkeit und Interoperabilität der Fertigung zu bewerten.



(Allg.) Technische Grundlagen

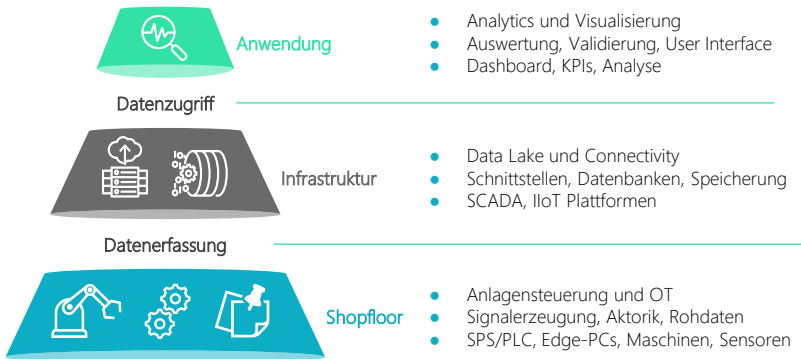
Traceability in der Batteriezellproduktion

Datenerfassung und Systemintegration

Die Realisierung einer lückenlosen Traceability beginnt auf der Feldebene. Dazu werden relevante Messwerte und Maschinenparameter erfasst (Datenerfassung) und über Schnittstellen in eine übergeordnete IT-Infrastruktur überführt (Datenintegration).

Der kritische Erfolgsfaktor ist die kontextbezogene Aggregation. Um aus abstrakten Datenströmen einen echten Mehrwert zu generieren, muss jede Information zweifelsfrei einem Produkt zugeordnet werden können. Erst diese untrennbare **Verbindung von Produkt- und Prozessdaten** transformiert rohe Messwerte in eine valide digitale Lebenszyklusakte.

Traceability Schritte in Systemimplementierung



Die Prozesskette im Fokus der Traceability

Der Mehrwert der Traceability entfaltet sich entlang des gesamten Zellproduktionsprozess:

- **Elektrodenfertigung:** Der Großteil der qualitätsrelevanten Eigenschaften einer Batteriezelle entsteht in der Elektrodenfertigung, wo zugleich die höchsten Ausschussmengen auftreten. Daraus ergibt sich ein erhebliches Optimierungspotenzial für Qualität und Kosten durch produktbezogene Datenallokation und -auswertung.
- **Zellassemblierung:** Beim Übergang von der Coil-basierten zur stückgutbasierten Fertigung sichert die Traceability die Zuordnung jeder Elektrode zu ihrem Gehäuse.
- **Zellfinalisierung:** Durch die Korrelation von End-of-Line-Ergebnissen mit den Daten der Vorprozesse lassen sich Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge aufdecken.



Elektrodenfertigung



Zellassemblierung



Zellfinalisierung

Brückenschlag zwischen physischer Fertigung und digitaler Exzellenz

In der Batteriezellfertigung ist die Traceability das entscheidende Bindeglied, das die physikalischen Produktionsschritte mit ihrem digitalen Abbild verzahnt. Besonders die Verknüpfung von **kontinuierlichen Prozessen** (wie dem Mischen und Beschichten in der Elektrodenfertigung) und **diskreten Prozessen** (wie dem Vereinzeln und Stapeln in der Zellassemblierung) stellt eine der größten technologischen Herausforderungen dar. Das Projekt ENLARGE adressiert genau diese Schnittstelle, um eine lückenlose Datenkette zu gewährleisten.

Technische Grundlagen

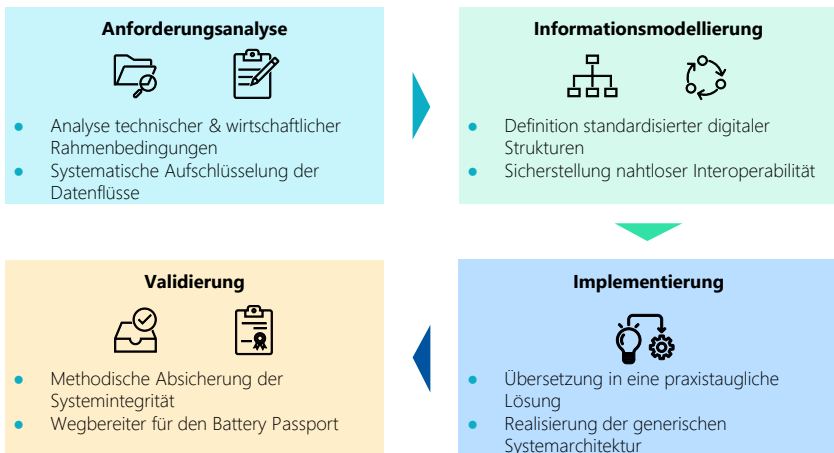
Die Implementierung von Traceability

Vom Anforderungsprofil zur validierten Systemarchitektur

Die erfolgreiche Implementierung eines Traceability-Systems soll einem strukturierten Entwicklungspfad folgen, der über die reine Datenerfassung hinausgeht. Den Ausgangspunkt bildet eine detaillierte **Anforderungsanalyse**, welche sowohl die technischen als auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Batteriezellproduktion umfasst und die **komplexen Datenflüsse zwischen den einzelnen Produktionsschritten** systematisch aufschlüsselt. Auf dieser Basis erfolgt die **Informationsmodellierung**, die alle für den Use Case relevanten Aspekte in standardisierte digitale Strukturen überführt, um eine nahtlose Interoperabilität sicherzustellen.

Die eigentliche **Implementierung** fungiert als technischer Leitfaden für die Übertragung des Konzepts in reale Produktionsumgebungen. Als zentrales Anwendungsbeispiel dient im Projekt ENLARGE das System FFTrace, welches eine generische Beschreibung der Systemarchitektur in eine praxistaugliche Lösung übersetzt.

Abschließend stellt ein methodisches **Validierungsverfahren** die Integrität des Systems sicher und präsentiert Ergebnisse, die als Wegweiser für Battery Passport dienen.



Strategische Zielsetzung: Der digitale Batteriepass

Die im Projekt ENLARGE aufgebaute Traceability-Infrastruktur bildet hierfür die technische Voraussetzung: Die standardisiert erfassten Prozess- und Qualitätsdaten werden über das Informationsmodell aggregiert und direkt und ohne zusätzlichen Erfassungsaufwand in einen Battery Passport for Production überführt. Dieselbe Datenbasis dient gleichzeitig der adaptiven Prozessoptimierung. Regulatorische Konformität und operative Effizienz sind damit keine konkurrierenden Ziele, sondern zwei Outputs einer gemeinsamen Dateninfrastruktur.



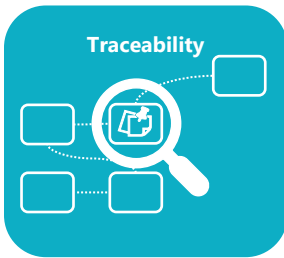
Anwendung

Sicherung der Anwendbarkeit

Synergien durch Daten: Die ENLARGE Use-Cases

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

- **Traceability:** Das Herzstück der Architektur identifiziert und aggregiert Produktionsereignisse (Events) über alle Prozessschritte hinweg, um einen lückenlosen digitalen Schatten der Zelle zu erzeugen.
- **Prozessoptimierung:** Durch die Abfrage der detaillierten Produkthistorie ermöglicht dieses System eine regelbasierte Auswertung, um beispielsweise präzise Formierungsvorschläge für die finale Zellaktivierung zu generieren.
- **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.



Das Model „Traceability“ in der Systemarchitektur

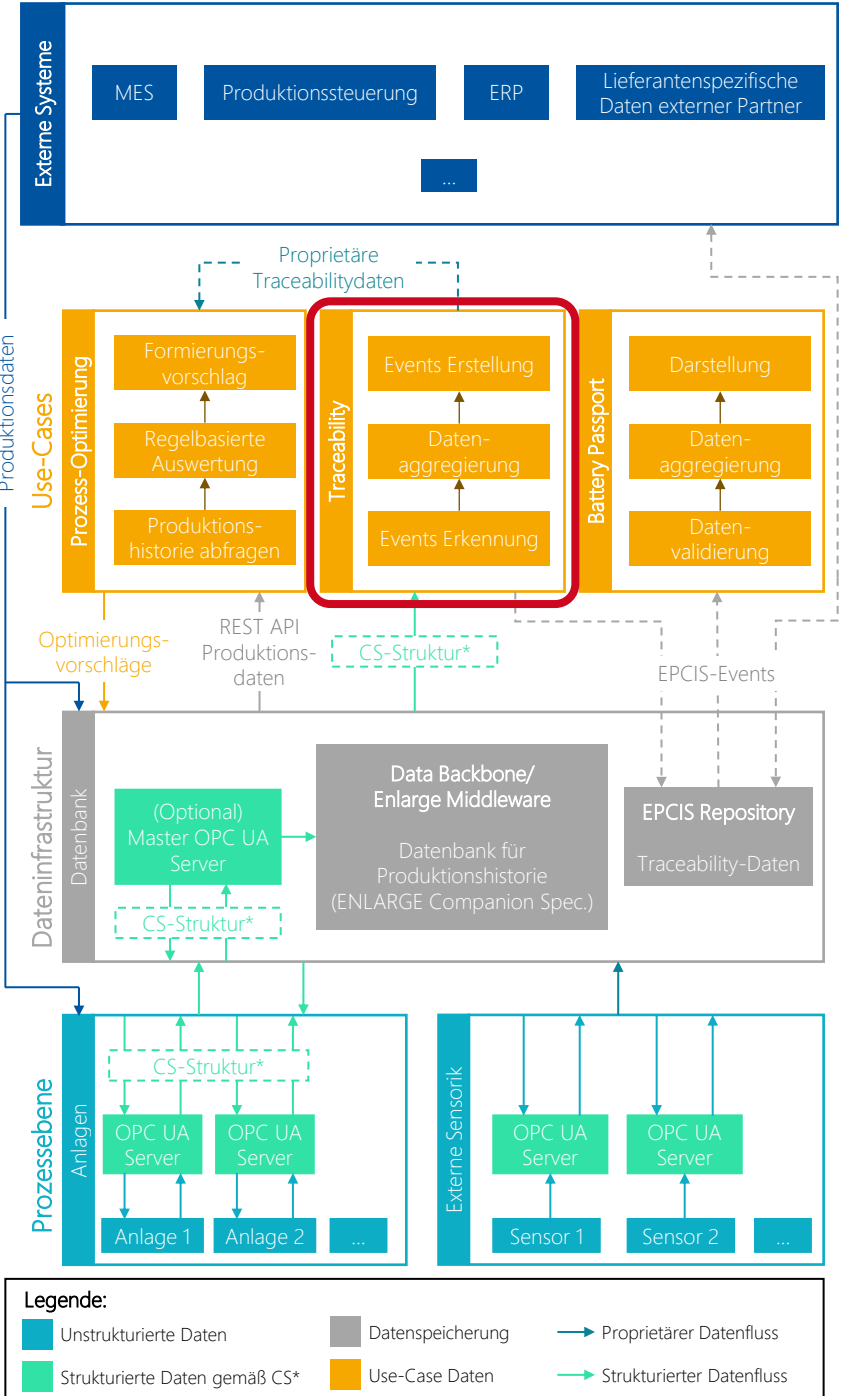
Innerhalb des ENLARGE-Gesamtprojektes fungiert das Modul „Traceability“ als zentraler Informations-Hub. Es ist nicht als isolierte Insellösung konzipiert, sondern tief in die bestehende IT-Architektur eingebettet. Das Modul aggregiert Daten aus den Bereichen Elektrodenfertigung, Zellassemblierung und Zellfinalisierung und verknüpft diese mit dem eindeutigen Indikator des jeweiligen (Zwischen-)Produkts.

Die technische Umsetzung folgt dabei einer klaren Schichtstruktur:

- **Datenquelle (OT-Ebene):** Den Ursprung bilden die physischen **Anlagen** und die **externe Sensorik**. Hier werden Rohdaten über dezentrale **OPC UA Server** erfasst. Ein entscheidender Innovationsschritt ist dabei die Strukturierung dieser Daten gemäß der **ENLARGE Companion Specification (CS)** bereits an der Quelle, wodurch eine semantische Einheitlichkeit gewährleistet wird.
- **Datenspeicherung & Middleware:** Die strukturierten Datenströme fließen in den **Data Backbone (Enlarge Middleware)**. Dieser fungiert als zentrale Datenbank für die gesamte Produktionshistorie. Ergänzend dazu werden spezifische Traceability-Daten in einem **EPCIS Repository** als standardisierte „Events“ vorgehalten, was eine effiziente Abfrage der Objektwege ermöglicht.
- **Schnittstellen & Externe Systeme:** Die Architektur stellt über eine **REST API** die Verbindung zwischen der Datenspeicherung und den Use-Case-Modulen her. Gleichzeitig ist das System für die Interaktion mit **externen Systemen** wie MES (Manufacturing Execution System) oder ERP (Enterprise Resource Planning) ausgelegt, um Auftrags- und Produktdaten zu synchronisieren und Optimierungsvorschläge direkt an die Produktionssteuerung zurückzugeben.

Durch diese modulare und auf Standards basierende Struktur stellt ENLARGE sicher, dass die Traceability nicht nur ein statisches Archiv bleibt, sondern ein **dynamisches Werkzeug zur aktiven Steuerung und Verbesserung der Batteriezellproduktion** darstellt.

Referenzarchitektur



* CS: Companion Specification

Traceability in der Praxis

Der ENLARGE Use-Case

Aufbauend auf den standardisierten Informationsmodellen des ENLARGE-Projekts wurde ein prototypischer Anwendungsfall realisiert, der eine durchgängige Nachverfolgbarkeit entlang der Batteriezellproduktion demonstriert. Ziel war es, die lückenlose Verknüpfung von Produkt- und Prozessdaten über mehrere Prozessschritte hinweg unter realitätsnahen Bedingungen zu validieren.

Sechs Prozessschritte, eine Datenkette

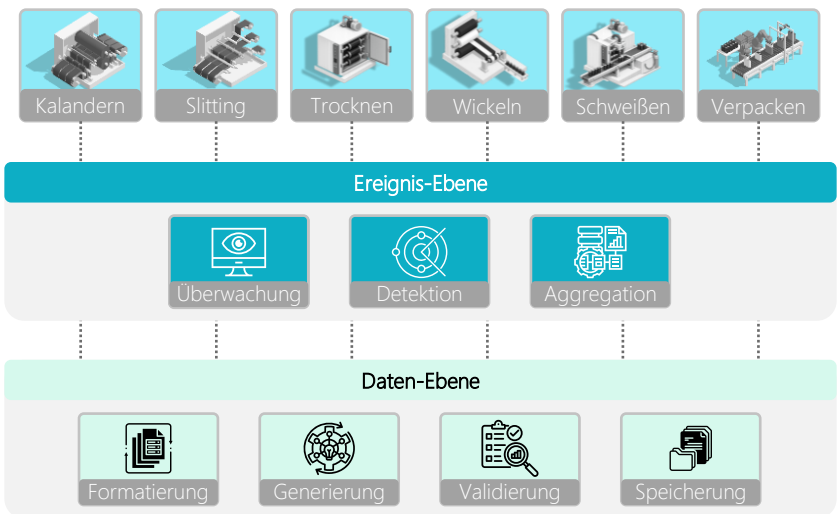
Der demonstrierte Use Case umfasst sechs zentrale Schritte der Zellfertigung:

Kalandern, Slitten, Vakuumtrocknen, Wickeln, Schweißen und Verpacken. Im Rahmen der Demonstration wurden sowohl physisch vorhandene Produktionsanlagen, für die Prozesse Kalandern und Verpacken, integriert, als auch virtuelle Prozessschritte prototypisch simuliert. Auf diese Weise konnte eine vollständige Prozesskette abgebildet und eine durchgängige Traceability-Funktion entlang aller Fertigungsschritte demonstriert werden.

Ereignisbasierte Traceability über Prozessgrenzen hinweg

Die Umsetzung der Traceability-Funktion basiert auf einem standardisierten, ereignisbasierten Ansatz:

1. **Datenerfassung:** Produktionsdaten werden über OPC UA aus den Anlagen erfasst und gemäß der ENLARGE Companion Specification strukturiert.
2. **Ereignisgenerierung:** Relevante Produktionsereignisse werden anhand definierter Strukturen, Parameter und Auslösekriterien erzeugt.
3. **Produktverknüpfung:** Die generierten Ereignisse werden eindeutig über die jeweiligen Produktidentifikatoren verknüpft und zu einer konsistenten und lückenlosen Produkthistorie zusammengeführt.



Vom Ereignis zur nutzbaren Datenbasis

Die so erzeugte Datenbasis ermöglicht nicht nur die vollständige Rückverfolgbarkeit einzelner Batteriezellen, sondern dient gleichzeitig als Grundlage für weiterführende Anwendungen. Im ENLARGE-Projekt wurde sie erfolgreich für die Prozessoptimierung sowie die Erstellung eines digitalen Batteriepasses genutzt.

Traceability-System: FFTrace

Standardisierte Traceability

FFTrace als Integrationsplattform im ENLARGE-Projekt

Als Grundlage für die Umsetzung des ereignisbasierten Ansatzes wurde im Projekt ENLARGE das Traceability-System FFTrace verwendet. FFTrace ist ein innerhalb von FFT entwickeltes Traceability-System, das im Rahmen des Projekts gezielt für die Integration standardisierter Schnittstellen auf Basis der in ENLARGE entwickelten Informationsmodelle erweitert wurde. Die Nutzung standardisierter Informationsmodelle ermöglicht eine herstellerübergreifende Anbindung von einzelnen Anlagen und ganzen Produktionssystemen an Traceability-Systeme wie FFTrace.

Der ENLARGE-Adapter als Brücke zwischen Standard und System

Ein zentrales Element der Umsetzung ist der entwickelte **ENLARGE-Adapter**. Er fungiert als Bindeglied zwischen den Produktionsanlagen und der bestehenden FFTrace-Architektur und übernimmt dabei folgende Aufgaben:

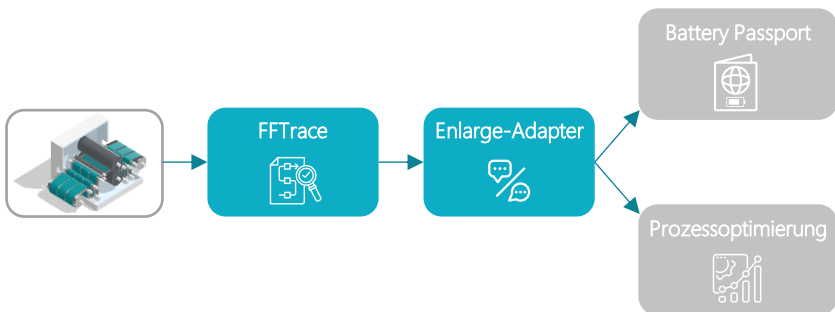
- Integration von Anlagen über OPC UA auf Basis der im ENLARGE-Projekt entwickelten Companion Specification
- Konfiguration von Traceability-Szenarien (Ereignisstrukturen, Parameter und Auslöselogik)
- Echtzeit-Erkennung, Aggregation und Validierung von Produktionsereignissen
- Verknüpfung von Prozessdaten mit eindeutigen Produktidentifikatoren

Von individueller Integration zur standardisierten Anwendung

Durch die konsequente Nutzung standardisierter Informationsmodelle wird die Integration neuer Anlagen deutlich vereinfacht. Der Implementierungsaufwand reduziert sich auf die einmalige Konfiguration der Traceability-Logik und kann anschließend auf weitere Anwendungsfälle übertragen werden.

Dies ermöglicht:

- Signifikante Reduktion von Integrationszeit und –kosten
- Wiederverwendbarkeit über verschiedene Projekte hinweg
- Herstellerunabhängige Interoperabilität
- Skalierbarkeit für zukünftige daten-basierte Anwendungen



Ausblick

Die im Projekt entwickelte Architektur zeigt, wie standardisierte Traceability-Systeme in der Batteriezellproduktion praktisch umgesetzt werden können. Sie bildet die Grundlage für eine skalierbare, interoperable und zukunftssichere Produktionsumgebung.

ENLARGE

Traceability

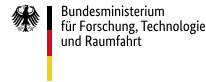
Projektinformation

Der entscheidende Schritt zur lückenlosen Traceability in der intelligenten Verknüpfung von Prozessdaten mit dem konkreten Produkt. Das Projekt ENLARGE realisiert genau diesen technologischen Brückenschlag: Es etabliert eine semantische Architektur, die flüchtige Fertigungsparameter untrennbar der individuellen Produktidentität zuordnet.

Durch dieses Framework (basierend auf OPC UA Companion Specifications) wird sichergestellt, dass jeder Qualitätswert in der Zellproduktion eindeutig einer spezifischen Batteriezelle zugeschrieben wird. Diese direkte Kopplung transformiert isolierte Maschinendaten in einen validen digitalen Lebenslauf. Damit schafft ENLARGE das unverzichtbare Fundament, um sowohl den regulatorisch geforderten Batterie Passprt effizient umzusetzen als auch zukunftsweisende Anwendungen wie Predictive Quality und autonome Prozessoptimierung zu ermöglichen.



Gefördert durch:



Konsortium

Das ENLARGE-Konsortium bildet ein interdisziplinäres Partnernetzwerk aus neun geförderten Partnern, das die gesamte Batteriewertschöpfungskette abdeckt: Maschinen- und Anlagenbauer liefern produktionstechnische Expertise, Forschungseinrichtungen mit eigener Produktionsinfrastruktur validieren Praxisrelevanz, Softwareanbieter implementieren digitale Infrastrukturen, und Forschungseinrichtungen gewährleisten wissenschaftliche Fundierung. Ergänzt durch assoziierte Partner aus Verbänden und Standardisierungsorganisationen entsteht so ein Ökosystem, das technologische Entwicklung, industrielle Anwendbarkeit und normative Verankerung der Companion Specifications sicherstellt.

Projektdaten



Standardlaufzeit 3 Jahre
05.2023-04.2026



Stärkung von
Wertschöpfungsketten



Verbände in Automobil- und
Zulieferindustrie



Fokus auf Vernetzung, Allianzen
und Synergien



Förderung durch BMFTR



Forschung an Produkt und
Prozess

Weitere Broschüren

Einführung, Battery Passport und Prozessoptimierung

Die Inhalte des ENLARGE-Projekts werden in zwei weiteren Broschüren vertieft: Die allgemeine Projektbroschüre stellt den übergeordneten Rahmen vor, während die zweite Broschüre die Prozessoptimierung und den Battery Passport 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.

Battery Passport und Prozessoptimierung

Ab Februar 2027 braucht jede Industriebatterie einen digitalen Pass, der Herkunft, CO₂-Fußabdruck und Prozesshistorie transparent dokumentiert. Doch was nach bürokratischer Pflicht klingt, entpuppt sich als strategische Chance. Die Broschüre zeigt, wie die dafür aufgebaute Dateninfrastruktur konsequent weitergedacht werden kann: Die im Traceability-System erfassten Daten werden aggregiert und zu einem Battery Passport verdichtet, der gegen die aktuellen und absehbaren EU-Anforderungen erfüllt. Dieselben Produktionsdaten, die den Battery Passport befüllen, werden gleichzeitig genutzt, um Fertigungsprozesse zu optimieren. Algorithmen analysieren die Entstehungsgeschichte jeder einzelnen Zelle, und leiten daraus gezielte Vorschläge zur adaptiven Anpassung der Anlagenparameter in nachgelagerten Schritten wie der Formierung ab. Die Ergebnisse fließen direkt in die Produktion zurück. Regulatorik und Effizienz als zwei Seiten derselben Medaille.



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

