

Konzept für BMFTR-Kompetenzcluster in der Batterieforschung ab 2026

Hightech Agenda Deutschland, BMFTR-Dachkonzept Batterieforschung, Förderrichtlinie Clusters Go Industry
Stand 14.01.2026

Batterien sind eine zentrale Schlüsseltechnologie für Deutschland und Europa. Sie sind *Enabler* für eine klimaneutrale Mobilität und Gesellschaft, Grundlage für den Umbau unseres Energiesystems hin zur Klimaneutralität. Sie ermöglichen es uns, Energieabhängigkeiten zu reduzieren und innovative Produkte *Made in Europe* zu realisieren. Daher adressiert die Hightech Agenda Deutschland (HTAD) Batterien in zwei Schlüsseltechnologiefeldern direkt: „Fusion und klimaneutrale Energieerzeugung“ sowie „Technologien für die klimaneutrale Mobilität“.

Dabei formuliert die HTAD mit dem Aufbau einer wettbewerbsfähigen Batterieproduktion und -kreislaufführung in Deutschland bis 2035 auch ein zentrales Ziel. Absehbar gelingt das nur aus einem starken akademisch-industriellen Innovationsökosystem. Dieses soll u.a. durch einen neuen Ansatz bei dem bewährten Batteriekompetenzcluster-Ansatz ab 2026 nachhaltig gestärkt werden. Die Themen Batteriematerialien, Batterieproduktion und Festkörperbatterien rücken dabei in den Fokus.

Das vorliegende Konzeptpapier soll mögliche Strategien zum Aufbau der Batteriekompetenzcluster aufzeigen. Der Fokus liegt dabei auf einer anwendungsorientierten und exzellenten Ausgestaltung der Cluster sowie einer schnellen Umsetzung. Die Förderung neuer Batteriekompetenzcluster soll im Rahmen des Clustermoduls der laufenden Förderrichtlinie Clusters Go Industry (CGoIn) erfolgen. Dabei sollen neben Bezügen zu den Zielen des Dachkonzepts Batterieforschung des BMFTR insbesondere Bezüge zur HTAD und der zugehörigen Batterie-Roadmap – in ihrer jeweils aktuellen Fassung – hergestellt werden. Die Roadmap, als dynamisches und sich mit den Batterietechnologien und -ökosystem weiterentwickelndes Konzept angelegt, ist dabei als dynamischer Bezugspunkt zu sehen. Das vorliegende Konzeptpapier wird entsprechend fortlaufend aktualisiert.

Hintergrund und Historie:

Das BMFTR förderte seit 2016 sukzessive bis zu sieben Batteriekompetenzcluster zu den Themen Material (ExcellBattMat), Prozesstechnik (ProZell), Festkörperbatterien (FestBatt), Produktionstechnik (InZePro), Recycling (greenBatt), Nutzungskonzepte (BattNutzung) und Analytik (AQua). Es war geplant, ab 2023 diese Cluster über die Förderrichtlinie Clusters Go Industry (CGoIn) anzupassen und fortzuführen.

1 Clusters Go Industry

1.1 Allgemeines

Die Förderrichtlinie Clusters Go Industry (CGoIn) bietet die Möglichkeit einer schnellen Umsetzung anwendungsorientierter und exzellenter Batteriekompetenzcluster. Übergeordnetes Ziel dieser Maßnahme ist es, die wissenschaftliche und technologische Grundlage für den Aufbau und später den Ausbau einer wettbewerbsfähigen Batterieproduktion und -kreislaufführung in Deutschland zu schaffen. Der Weg dorthin führt über die Erreichung technologischer Souveränität bei den Batterietechnologien vom Material über die Batteriezellkomponenten bis zur Batteriezelle, von der Grundlagenforschung bis zur Skalierung in industrielle Produktionsprozesse. Die **Ziele der Förderrichtlinie** im Einzelnen sind:

- Bestehende Kompetenzcluster thematisch anpassen, fortsetzen und erweitern.
- Neue Kompetenzcluster, zur Schließung von Kompetenzlücken, initiieren.
- Ergebnistransfer aus den Kompetenzclustern in die Industrie beschleunigen.
- Nachhaltigkeit und Versorgungssicherheit verbessern (Erfassung von Nachhaltigkeitsindikatoren).

Die Förderrichtlinie CGoIn besteht aus Modulen, die unterschiedliche Teilziele verfolgen. Die **drei Module der Förderrichtlinie** sind:

- Modul 1: Clustermodul
- Modul 2: Transfermodul
- Modul 3: Begleitforschung

Das **Modul 1: Clustermodul** ermöglicht die Initiierung neuer Cluster. Ein Cluster ist ein Netzwerk aus Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, die gemeinsam in mindestens fünf Verbundprojekten ein Clusterziel verfolgen. Im Sinne der Hightech Agenda Deutschland wären die Clusterziele der Auf- und Ausbau der wissenschaftlichen Kompetenz im Bereich der Batteriematerialien, der Batterieproduktion und der Festkörperbatterie. Die Initiierung eines Clusters kann durch die Zusendung eines Rahmenplans an ptj-cgoIn@ptj.de erfolgen. Eingereichte Rahmenpläne werden intern und extern begutachtet und nach einer positiven Begutachtung sowie eventuellen Korrekturschleifen auf www.batterieforschung.de veröffentlicht. Die Veröffentlichung geht mit einem Aufruf zur Einreichung von Projektideen einher, die i.d.R. bis 3 Monate nach der Veröffentlichung des Rahmenplans über das Portal easyOnline eingereicht werden können. Nach der internen und externen Begutachtung werden förderfähige Projekte zum Antrag aufgefordert und im Rahmen des Clusters gefördert.

Anschlussfähige Projektergebnisse können anschließend im **Modul 2: Transfermodul** in industriegetriebenen Verbundprojekten weiterentwickelt werden. Dazu bestehen die Projekte aus mindestens einem Industrieunternehmen und mindestens einer außeruniversitären Forschungseinrichtung oder Hochschule, die zuvor im Clustermodul gefördert wurde. Dabei sind die Ergebnisse aus der erfolgreichen Vorlauftforschung eines Clusterprojekts hin zur Kommerzialisierung weiterzuentwickeln. Dies soll die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit steigern. Die Einbindung vorhandener deutscher Forschungsinfrastrukturen bis hin zur Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) wird begrüßt. Ebenso ist ein direkter Transfer in die industrielle Produktion denkbar.

1.2 Clusterung

Als eine zentrale Flaggschiff-Maßnahme zum Aufbau einer wettbewerbsfähigen Batterieproduktion und -kreislaufführung in Deutschland, soll der Aufbau der **BMFTR-Kompetenzcluster**

- Batteriematerialien
- Batterieproduktion
- Festkörperbatterien

schnell eine langfristig wirkende Innovationsgrundlage schaffen. Ganz im Sinne der HTAD als laufend weiterentwickeltes Dokument und der dynamischen Batterie-Roadmap, können durch das BMFTR weitere Clusterthemen gesetzt werden.

Die thematische Abgrenzung der Cluster untereinander sowie die Schwerpunktsetzung erfolgt in den Kapiteln 2 bis 4.

Die Laufzeit der einzelnen Verbundprojekte beträgt in der Regel drei Jahre. Die Laufzeit der Cluster beträgt jeweils fünf Jahre. Der Rahmenplan kann darüber hinaus Ziele und Ideen für eine Folgephase, erneut mit einer Laufzeit von fünf Jahren, beinhalten. Für eine Fortführung eines Clusters ist eine positive Zwischenevaluation notwendig. Ein neuer Clusterplan ist für die BMFTR-Kompetenzcluster Batteriematerialien und Batterieproduktion ca. ein Jahr vor Ende der Laufzeit einzureichen. Weitere Cluster können nach Aufforderung durch das BMFTR Konzepte für eine weitere Clusterphase einreichen.

Die einzelnen Projekte sollten bewusst auf die Erreichung der Clusterziele einzahlen. Es ist möglich, Crossover-Projekte zu initiieren, die die Vernetzung zwischen den Clustern stärken. Sie müssen sich laut Förderrichtlinie einem Hauptcluster zuordnen.

Nach einer Evaluation 2030 soll eine weitere Clusterphase bis ca. 2035 angeschlossen werden können, bei der die bisherigen Erkenntnisse konsolidiert, vielversprechende Technologien zum Aufbau einer deutschen Batterieindustrie vertieft und ggf. industrierelevante neue Entwicklungen inhaltlich ergänzt werden können. Eine Anpassung der Clusterausrichtung auf die aktuelle Zielsetzung der Batterie-Roadmap erfolgt dabei fortlaufend.

Die Kompetenzcluster sollen durch Industrievertretende hinsichtlich der industriellen Relevanz der Clusterarbeiten beraten werden. Die Industrievertretenden bilden einen Managementkreis (Clusterbeirat), der aus mindestens 10 und maximal 20 Mitgliedern zuzüglich ausgewählter Vertretende von Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen besteht. Die Mitglieder der Managementkreise beraten die Kompetenzcluster hinsichtlich ihrer thematischen Ausrichtung und bewerten die Zwischenzielerreichung der einzelnen Verbundprojekte des jeweiligen Clusters.

2 Cluster Batteriematerialien

Moderne Batteriematerialien bilden das Fundament für ein europäisches Produktionsnetzwerk und eine wettbewerbsfähige und souveräne Batterieproduktion in Deutschland. Nachhaltigkeit und Resilienz der deutschen und europäischen Wirtschaft können so im Sinne der HTAD gestärkt werden. Forschung an und Entwicklung von diesen Materialien eröffnen neue Technologie- und Verwertungspfade, u.a. über Verbundforschung innerhalb des Transfermoduls von CGoIn sowie über das neue Förderinstrument der Vertikalen Applikationsallianzen.

2.1 Ziele

Im Fokus des Clusters für Batteriematerialien steht die Entwicklung neuer und optimierter Batteriematerialien im vorwettbewerblichen Umfeld. Ziel ist, nachhaltigere, günstigere, leistungsfähigere und/oder sicherere Batterien im Vergleich zum kommerziellen Stand der Technik herzustellen. Auch Materialien, die neue Batterietechnologien ermöglichen, können entwickelt werden. Die Materialien lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- Anodenmaterialien (Graphite, *Hard Carbons*, Si-basiert, Li-Metall usw.)
- Kathodenmaterialien (Schichtoxide, Spinelle, polyanionische Verbindungen, Li-S usw.)
- Elektrolyte (Leitsalze, Additive, Gelelektrolyte usw.)
- Passivmaterialien (Binder, Additive, Separatoren, Stromableiter, Primer, elektrochemische Stabilisatoren usw.)

Die Materialentwicklung sollte vom aktuellen Forschungsstand und dem kommerziellen Stand der Technik aus geeignete Transferpfade in die industrielle Nutzung der Materialien aufzeigen. Die Materialien sollten aktuelle (bspw. LIB und NIB) oder kommende (z. B. Metall-Schwefel) industriell relevante Zellchemie adressieren. Im Fall von alternativen Zellchemien ist darzustellen, wie Synergien im Rahmen des Clusters für Batteriematerialien gehoben werden können. Pfade zur Verwertung im Rahmen des Clusters sind darzustellen und eine Industrierelevanz (Benennung möglicher Nischenmärkte oder Spezialanwendungen, Aufzeigen eines industrienahes Zelldesign, Überlegungen zu industrienahen Beladungen etc.) muss gegeben sein. Auch Vorarbeiten zur Skalierung der Produktion dieser Materialien können in den Blick genommen werden. Mögliche Verwertungspfade sollen durch die Rahmenpläne skizziert, innerhalb der Projekte konkretisiert werden.

2.2 Aspekte

Zur Erreichung der Ziele in Abschnitt 2.1 ist die Entwicklung im Hinblick auf die folgenden Eigenschaften notwendig:

- Energiedichte (volumetrisch und gravimetrisch)
- Leistungsdichte (schnelles Laden und Entladen)
- Stabilität (Lebensdauer, Sicherheit und Effizienz)
- Nachhaltigkeit (Ressourcenabbau und -verfügbarkeit, Umwelteintrag, Recyclingfähigkeit und *Design for Recycling*)
- Kosten

Folgende Methoden und Erkenntnisse sollen Berücksichtigung im Cluster finden:

- Digitale und KI-gestützte Materialforschung (bspw. Modellierung und Simulation, Computergestütztes Screening von Materialien mittels KI, auch in Kombination mit *High-Throughput-Synthese*)
- Aufbau des mechanistischen Verständnisses der Materialien und deren elektrochemischen Eigenschaften
- Mitdenken der Prozessierung der Materialien (bspw. Partikelmorphologie, Materialhärte zur Trockenbeschichtung)
- Nachhaltiges Materialdesign, um Prozesse und Prozessschritte zu vereinfachen oder einzusparen

Diese Listen sind nicht abschließend und können bei Bedarf erweitert werden.

Neben der Entwicklung von Materialien selbst soll auch die optimierte und/oder skalierte Herstellung bekannter Materialien im Cluster Batteriematerialien betrachtet werden. Optimierungen von bekannten Materialien sollte dementsprechend auch die Herstellung dieser Materialien im Blick halten.

Die Aufnahme weiterer Themen ist möglich. Die Ziele und Themenfelder können während der Clusterlaufzeit entlang der HTAD und ihrer Batterie-Roadmap erweitert und angepasst werden.

2.3 Querschnittsthemen innerhalb des Clusters

Im Cluster Batteriematerialien wird es Querschnittsthemen geben, die mehrere bzw. alle Clusterprojekte betreffen und teils Relevanz für die weiteren Cluster haben. Eine enge Vernetzung und Zusammenarbeit ist erforderlich, um effizient die Clusterziele voranbringen, Potenziale und Kompetenzen gemeinsam nutzen zu können.

- Techno-ökonomische Bewertung und Lebenszyklusanalyse (bspw. LCA und LCC) inklusive der Eigenschaftsbewertung der Materialien in Zellen und Systemen (materialbezogene KPIs).
- Analytik, u.a.:
 - » Modellierung und Diagnostik
 - » *in-situ*- und *operando*-Analyse
 - » Post-Mortem-Analyse
 - » Grenzflächenbetrachtung
- Prozessierbarkeit und Skalierbarkeit der Materialherstellung
- Aufbereitung und Verwendung von Rezyklaten auf Materialebene
- Generierung, Nutzung und Weitergabe von Daten

Ein weiteres Querschnittsthema ist die **Sicherheit**. Diese reicht von der Arbeitssicherheit und dem Umweltschutz während der Zellproduktion und des Recyclings bis hin zur Sicherheit der Batteriezelle während der Nutzung.

2.4 Abgrenzung und Übergabepunkte

Cluster Batterieproduktion

- Abgrenzung
 - » Materialprozessierung bekannter Materialien zur Produktion von Elektroden und Zellen ist Teil des Clusters für Batterieproduktion.
 - » Materialentwicklungen für die Verarbeitung in bekannten Batterieproduktionsprozessen sollten Teil des Clusters für Batteriematerialien sein.
 - » Entwicklung von innovativen Synthese- und Materialproduktionswegen sind Bestandteil des Clusters für Batteriematerialien.
 - » Skalierungsforschung zur Materialproduktion soll Teil des Clusters für Batteriematerialien sein. Hierzu zählen beispielsweise:
 - Kalzinierung und Granulierung von Aktivmaterialien

- (Weiter-)Entwicklung technisch-chemischer Anlagen zur Herstellung von Elektrolyten oder Passivmaterial(vorstufen) als Flüssigkeit oder Schüttgut
- » Mechanische/Maschinelle Recyclingverfahren sollen im Cluster für Batterieproduktion adressiert werden.
- » Verfahren zum Direktrecycling von Batterieproduktionsausschuss einschließlich einer eventuellen Rekonditionierung sollen Teil des Clusters Batterieproduktion sein. Weitere Verfahren zum Recycling sollen Teil des Clusters für Batteriematerialien sein (z. B. pyro- und hydrometallurgische Ansätze).
- Übergabepunkte (nicht abschließend)
 - » Eine Anschlussfähigkeit könnte die (Weiter-)Entwicklung von Zellproduktionsprozessen im Cluster Batterieproduktion sein. Ein enger Austausch der Cluster ist erstrebenswert, um eine zielgerichtete Materialentwicklung hinsichtlich der späteren Prozessierung und Produktion gewährleisten zu können.
 - » Die Überführung neuer analytischer Ansätze in die Inline-Analytik bestehender oder neuer Batterieproduktionsprozesse stellt einen weiteren Übergabebereich dar.

Cluster Festkörperbatterie

- Abgrenzung
 - » Funktionelle Elektrolyte wie beispielsweise Gel-Elektrolyte und Festelektrolyte für Lithium- und Natriumionenbatterien sollten Bestandteil des Clusters Festkörperbatterien sein.
 - » Die Entwicklung von Katholytmaterialien sollte – sofern keine Festelektrolyte enthalten sind – Bestandteil des Clusters Batteriematerialien sein.

3 Cluster Batterieproduktion

Moderne – digitale sowie smarte – Produktionsprozesse und die Kreislaufführung von Batteriematerialien sind die Voraussetzung für eine wettbewerbsfähige Batterieindustrie in Deutschland und Europa. Tiefe Prozesskenntnis, Automatisierung und Skalierungsforschung entscheiden über die Zukunft des europäischen Produktionsnetzwerks. Dabei ist und bleibt der EV-Markt das große Ziel, aber auch weitere Anwendungsbereiche, insbesondere strategisch relevante wie das Energiesystem, Sicherheit und Verteidigung, können in den Blick genommen werden.

3.1 Ziele

Übergeordnetes Ziel des Clusters Batterieproduktion ist die Entwicklung einer industriefähigen vollautomatisierten, ressourcenschonenden, digitalisierten und kosteneffizienten Batterieproduktion. Im Hinblick auf Kosten, Nachhaltigkeit und Souveränität ist der Wertschöpfungskreislauf inklusive Recycling als Ganzes zu denken. Orientieren sollte sich der Cluster an folgenden Zielen (nicht abschließend):

- Erforschung produktionsgerechter Zellkonzepte bzw. Zelldesigns sowie deren wirtschaftliche anwendungsorientierte Batteriezellproduktion. Ziele sind u.a.
 - » hohe Energiedichte, Schnellladefähigkeit und Zyklenstabilität (bspw. für automobiler Anwendungen)

- » gute Energiedichte sowie hohe Schnellladefähigkeit bei geringen Kosten (bspw. für günstige automobiler Anwendungen) und zusätzlich sehr hohe Zyklenstabilität (bspw. für stationäre Speicher)
- » maximale Zyklenstabilität, minimale Kosten bei ggf. niedriger Energiedichte (bspw. für stationäre Speicher)
- » höchste Energiedichte bei vergleichsweise geringer Zyklenstabilität (bspw. für Anwendungen aus dem Bereich Defense)
- Erforschung von Produktionstechnologien sowie optimale Gestaltung der Produktionskette und einzelner Prozessschritte und Entwicklung von tiefem Prozessverständnis, etwa für
 - » Kosten- und energieeffiziente Prozesse mit Relevanz für das Gesamtsystem
 - » Prozesstechnologien, auch für neue Zelldesigns (u. a. Berücksichtigung eines eventuell erforderlichen Anpressdrucks, Systemintegration, Sicherheit)
 - » Technologien zur Qualitätssicherung und -prognose von Batteriezellen
 - » Verringerung von Ausschussraten, u. a. durch Steigerung der OEE mit oben genannten Methoden
 - » Optimierung des Ramp-Up-Prozesses und der hierfür erforderlichen Zeiten
- Erforschung von Technologien für die zirkuläre Produktion
 - » Direktrecycling von Produktionsausschuss einschließlich Rekonditionierung und deren Rückführung in die Zellproduktion
 - » Demontage von Batteriezellen (*End of Life* [EoL] und Ausschuss) zur Rückführung der in den Zellen verbauten Aktivmaterialien in geschlossenen Materialkreisläufen
 - » Prozessketten des Recyclings von Batteriezellen (EoL und Ausschuss) zur physikalischen Auftrennung der Materialien (insbesondere Schwarzmasse oder Schwarzmassenkomponenten)
- Methodische Erfassung der Auswirkung neuer Zellchemien/Zelldesigns und Prozessschritte auf den Aufbau und den Betrieb des Produktionssystems (Linie), u. a.
 - » Bedarfsgerechte Auslegung der Produktions- und Logistikumgebung
 - » Erforderliche technische Sauberkeit
 - » Gesundheitsrelevante Themen für den Mensch in der Produktion

Ziel der Entwicklungen im Bereich Prozess- und Produktionstechnologien ist die Verbesserung der Batterieproduktion. In den Projektskizzen ist darzulegen, wie die Projektentwicklungen auf einer Pilotlinie integriert werden oder im Anschluss integriert werden können. So ist die Skalierung mit zu betrachten und das techno-ökonomische Potenzial im Fall der Skalierung zu benennen. Die spätere Umsetzung dieser Skalierung über die deutschen Forschungsproduktionslinien bis hin zur FFB wird durch das BMFTR begrüßt. Auch der Weg über Projekte mit der Industrie – etwa über das Transfermodul – ist zu begrüßen.

3.2 Aspekte

Zum Erreichen der Ziele unter Abschnitt 3.1 sollen folgende Themen im Cluster Batterieproduktion adressiert werden (nicht abschließend):

- Fabrikebene – Auslegung und Optimierung
 - » Holistische Material-, Prozess- und Produktionsanlagenauswahl für eine Serienproduktion

- » Wirtschaftliche Dimensionierung (z. B. der Raumlufte inkl. Minimierung der Partikelkontamination von Materialströmen. Umfasst auch eine techno-ökonomische Bewertung der Produktionsprozesse im Hinblick auf TCO und OEE)
- » Investitionsmodelle und Einbindung in den Markt (inkl. *Lessons Learned* aus erfolgreichen und weniger erfolgreichen Unternehmensgeschichten)
- » Digitalisierung und Digitale Zwillinge der Fabrikebene
- » Evaluation und Optimierung des Anfahrprozesses zum Produktionsstart
- » Evaluation und Optimierung des Vollastprozesses nach erfolgreichem Produktionsstart
- Produktionssystem (bspw. zur Optimierung von Produktionszeiten und -leistung inkl. höhere Bandgeschwindigkeiten, geringere Totzeiten)
 - » Modularisierung (z. B. zur Wiederverwendung von Produktionsanlagen nach Variantenwechsel)
 - » Evaluation der Integrierbarkeit entwickelter Prozesse und Anlagen in bestehende Fabriken
 - » Schließen von etwaigen Lücken in der Automatisierung
 - » Optimierung von Geschwindigkeit und Ausschuss
- Produktionstechnik – Automatisierung und Selbstregulierung (bspw. zur Verbesserung der Zellqualität und zur Reduzierung des Materialausschusses)
 - » Digitalisierung
 - » Automatisierung
 - » Inline-Sensorik (bspw. zur Qualitätssicherung, Tracking und Tracing)
 - » *Machine Learning* und KI
 - » Selbstregulierung
- Prozesstechnik – Weiterentwicklung, Optimierung und Digitalisierung, inkl. Einbindung smarter und KI-gestützter Methoden (bspw. Trockenbeschichtung, Hochdurchsatzstapeln, *Multi-Layer-Coating*) der Prozesse hinsichtlich
 - » der Materialstruktur
 - » der Kosten (z. B. €/kWh, €/Zyklus)
 - » der Zellperformance
- Prozesstechnik – Neuentwicklungen (bspw. für neue, insbesondere industrierelevante Zellchemien, für die Aufbereitung sekundärer Rohstoffe, für wettbewerbsfähige Zelldesigns)
 - » Generelle Prozessierbarkeit neuer Materialien (Drop-In-Fähigkeit, Delta-Bewertung)
 - » Sicherheit und Integrierbarkeit neuer Zellkonzepte auf Modul- und Packebene (Propagation, Druck, Verschaltung, Betrieb)
 - » Aufreinigung und Rekonditionierung von Batteriematerialien im Zuge des (Direkt-)Recyclings
- Zirkuläre Wertschöpfung
 - » Vollständige Material-, Prozess- und Produktionsanlagenauswahl hinsichtlich geschlossener Material- und Stoffkreisläufe
 - » Prozesse und Anlagen für das physikalische Zellrecycling, die Materialtrennung und -aufreinigung sowie die Rekonditionierung (vgl. Abgrenzungen zum Cluster Batteriematerialien, Abschnitt 2.4)

- » *Design for Recycling* (d.h. leichtes Recycling, z. B. einfaches Abtrennen der Schwarzmasse vom Stromsammler) sowohl im Hinblick auf Zellkonzepte bzw. Zelldesigns sowie der Planung und Gestaltung der Material- und Stoffflüsse auf der Ebene von Prozessen, Prozessketten und *Supply Chains*.

Die Aufnahme weiterer Themen ist möglich. Die Ziele und Themenfelder können während der Clusterlaufzeit entlang der HTAD und ihrer Batterie-Roadmap erweitert und angepasst werden.

3.3 Querschnittsthemen innerhalb des Clusters

Die **Digitalisierung** ist in den Projekten mitzudenken und einzubetten. Darüber hinaus können Projekte zur Digitalisierung allgemein oder zu einzelnen Aspekten initiiert werden. Digitalisierung als Querschnittsthema umfasst u.a.:

- Standardisierung der digitalen Prozesse und Daten
 - » Datenstrukturen für relevante Use-Cases (z. B. Qualitätssicherung, Tracking + Tracing) mit beispielhafter Umsetzung (z. B. OPC UA)
 - » Anschlussfähigkeit der Produktionsdaten zum Batteriepass
- Machine Learning und KI
 - » Prozess- und Produktionsoptimierung (z. B. Prozess- und Produktionsregelung, Fehlererkennung, Prozessverknüpfung)
- Digitale Zwillinge und Simulation
 - » Prozess, Produktion, Fabrikebene, Produkt (insb. zur schnellen Entwicklung und Anpassung)

Geeignete Schnittstellen zum Cluster Batteriematerialien sind dabei zu etablieren.

Ein weiteres Querschnittsthema ist die **Sicherheit**. Diese reicht von der Arbeitssicherheit und dem Umweltschutz während der Zellproduktion und des Recyclings bis hin zur Sicherheit der Batteriezelle während der Nutzung. Das Thema Sicherheit spielt in allen Clustern eine wichtige Rolle. Sicherheitsrelevante Aspekte durch neue Produktionsprozesse und Zelldesigns bzw. Zellchemien sollen möglichst frühzeitig antizipiert werden.

3.4 Abgrenzung und Übergabepunkte

Cluster Batteriematerialien

- Abgrenzung
 - » Die Voraussetzung für die Betrachtung von Zellchemien im Produktionscluster ist deren Verfügbarkeit mindestens im kg-Maßstab.
 - » Prozessentwicklungen mit bekannten Materialien sind Teil des Clusters für Batterieproduktion.
 - » Materialentwicklungen für die Verarbeitung auf bekannten Prozessen sollen Teil des Clusters für Batteriematerialien sein.
 - » Entwicklung von Synthesewegen zur Prozessskalierung sind Bestandteil des Clusters für Batteriematerialien.
 - » Materialskalierungen sollen Teil des Clusters für Batteriematerialien sein.

- die Prozesskette der Batterieproduktion soll somit bei der Mischung der Materialkomponenten, ggf. auch einer Vorkonditionierung der Materialien, in einer Zellfabrik anfangen.
- Kalzinierung und Granulierung von Aktivmaterialien, technisch-chemische Anlagen zu Elektrolyten und diversen Passivmaterialien als Flüssigkeit oder Schüttgut und die Herstellung von Separatorfolien sollten Teil des Clusters für Batteriematerialien sein.
- » Mechanische/Maschinelle Recyclingverfahren sollen im Cluster für Batterieproduktion adressiert werden.
- » Verfahren zum Direktrecycling von Batterieproduktionsausschuss einschließlich einer eventuellen Rekonditionierung sollen Teil des Clusters Batterieproduktion sein. Weitere Verfahren zum Recycling sollen Teil des Clusters für Batteriematerialien sein (z. B. pyro- und hydrometallurgische Ansätze).

Cluster Festkörperbatterien

- Abgrenzung
 - » Einzelprozesse und Abschnitte der Prozesskette, die ausschließlich auf die Produktion und das Recycling von Festkörperbatterien abzielen, sind nicht Teil des Clusters für Batterieproduktion.
 - » Die Fabrikebene oder Digitalisierungsstandards sind, sofern es sich nicht ausschließlich um die Produktion von Festkörperbatterien handelt, Teil des Clusters für Batterieproduktion.
 - » Ein enger Austausch zwischen den Projekten zur Festkörperbatterieproduktion im Cluster Festkörperbatterien und dem Cluster Batterieproduktion ist sicherzustellen.

4 Cluster Festkörperbatterien

Festkörperbatterien unterscheiden sich teils grundlegend in Materialsystemen, Prozessen und Sicherheitsanforderungen von etablierten Batterietechnologien. Ein eigenständiger Cluster für Festkörperbatterien soll diesen spezifischen technologischen Herausforderungen gezielt begegnen.

4.1 Ziele

Übergeordnetes Ziel des Clusters Festkörperbatterien ist die holistische Entwicklung einer industrialisierbaren Festkörperbatterie sowie Exploration neuer Ansätze in diesem Feld. Die Ziele sollen u. a. folgendes umfassen:

- Entwicklung wirtschaftlicher anwendungsorientierter Zellen für unterschiedliche Zellkonzepte unter Berücksichtigung der Produzierbarkeit
 - » *High-Performance* (hohe Energiedichte, hohe Leistungsdichte – Automobile Anwendungen, *Power tools* etc.)
 - » *High-Endurance* (hohe Zyklenstabilität, großer Temperatureinsatzbereich – Medizin, Spezialanwendungen etc.)
 - » ressourcenschonende Zellkonzepte (bzgl. Recycling, kritische Materialien etc. – Stationäre Energiespeicherung usw.)
- Entwicklung und Optimierung von Festkörperbatterien im Hinblick auf:

- » Zellbau
- » Prozessentwicklung und -optimierung inkl. Skalierungen
- » Materialoptimierungen und -neuentwicklungen
- » Systemintegration

Ziel der Entwicklungen im Bereich Prozess- und Produktionstechniken ist die Etablierung einer Festkörperbatteriezellproduktion. Ebenso sollte ein möglicher Innovationspfad zur Serienreife skizziert und ein Ausblick zur Skalierung der Technologie gegeben werden. Die spätere Umsetzung dieser Skalierung über die deutschen Forschungsproduktionslinien bis hin zur FFB wird durch das BMFTR begrüßt. Auch der Weg über Projekte mit der Industrie – etwa über das Transfermodul – ist zu begrüßen.

4.2 Aspekte

- Zellbau
 - » Überwindung produktions- und verfahrenstechnischer Herausforderungen beim Zellbau und Identifizierung von Prozessrouten
 - » hybride (oxidisch-sulfidisch, Lithium-Natrium etc.) Zellkonzepte
 - » Semi-Solid-Zellkonzepte (Gelbasierte Festelektrolyte und fest-flüssig Kombinationen)
 - » Evaluierung und ggf. Nutzung von Flüssigadditiven sowie deren Vor- und Nachteile
- Prozessentwicklung und -optimierung inkl. Skalierungen
 - » Kosten- und energieeffiziente Prozesse
 - » Verringerung von Ausschussraten und Recycling von Produktionsausschuss
 - » Verbesserung der Qualität von Batterien
 - » Abschätzung der Integrierfähigkeit (bspw. von Beschichtungstechnologien) und Sicherheit
 - » Iterative Prozessentwicklung durch sich kontinuierlich weiterentwickelnde Zellmusterstufen
- Materialoptimierungen und -neuentwicklungen
 - » Festkörper-Elektrolyte (keramische Elektrolyte, Polymer-Elektrolyte, sulfidische Elektrolyte usw.) zur Nutzung als Anolyt, Katholyt, Separator
 - » Semi-Solid-Elektrolyte (u.a. Gelbasierte Festelektrolyte und Fest-Flüssig-Kombinationen)
 - » Anodenmaterialien (Graphite, Hard Carbons, Si-basiert, Li-Metall usw.), ggf. für Anodenaktivmaterial-Anolyt-Verbund
 - » Kathodenmaterialien (Schichtoxide, Spinelle, polyanionische Verbindungen, Konversionsmaterialien etc.) für Kathodenaktivmaterial-Katholyt-Verbund
 - » Passivmaterialien (Beschichtungen, Schutzkonzepte, Binder, Stromableiter usw.)
 - » Materialskalierung (Menge, Produktionsgeschwindigkeit, Größe der Festkörper in Bezug auf Schichtdicken, mögliche Stackanzahl etc.)
 - » Natrium als Zellchemie
 - » Neue und neuartige Materialansätze und Zellreaktionen
- Systemintegration und Einhausungskonzepte
 - » Thermisches Management: Erweiterung des Temperaturfensters in der Batterienutzung

- » Batteriepackintegration zum Adressieren des notwendigen Anpressdrucks in Festkörperbatterien und Anforderungen an den Bauraum in Anwendungen
- Sicherheitsbewertung (bspw. H₂S-Bildung)
 - » während der Produktion
 - » während des Betriebs
 - » Entwicklung von Diagnostik zu Ausdehnung und Druck im Batteriemanagementsystem
- Reduzierung des notwendigen Drucks während des Zellbetriebs
- Kostenbetrachtung, auch im Vergleich zu Benchmark-Zellen

Die Aufnahme weitere Themen ist möglich. Die Ziele und Themenfelder können während der Clusterlaufzeit entlang der HTAD und ihrer Batterie-Roadmap erweitert und angepasst werden.

4.3 Querschnittsthemen innerhalb des Clusters

- Weiterentwicklung von Analysemethoden
 - » Modellierung und Simulation
 - » Aufklärung der SEI- und CEI-Bildung
 - » Vorhersage elektrochemischer Grenzflächenstabilitäten
 - » Analytik während des Zellbetriebs
 - » Qualitäts- und Datenstandards
 - » Weiterentwicklung von Testprotokollen für standardisierte Zelltestprozeduren
- Prozess- und Produktion
 - » Übergeordnete Prozess- und Produktionsverfahren
- Kreislaufwirtschaft
 - » Bewertung der spezifischen Nachhaltigkeit, Rohstoffsicherung und Rezyklisierbarkeit

4.4 Abgrenzung und Übergabepunkte

Cluster Batteriematerialien

- Abgrenzung
 - » Funktionelle Elektrolyte wie beispielsweise Gel-Elektrolyte und Festelektrolyte sollten Bestandteil des Clusters Festkörperbatterien sein, Schnittstellen zum Cluster für Batteriematerialien sind möglich und sollen synergetisch gestaltet werden.
 - » Die Entwicklung von Katholytmaterialien sollte, sofern keine Festelektrolyte enthalten sind, Bestandteil des Clusters Batteriematerial sein.

Cluster Batterieproduktion

- Abgrenzung
 - » Einzelprozesse und Abschnitte der Prozesskette, die ausschließlich auf die Produktion und das Recycling von Festkörperbatterien abzielen, sind nicht Teil des Clusters für Batterieproduktion.
 - » Die Fabrikebene oder Digitalisierungsstandards sind, sofern es sich nicht ausschließlich um die Produktion von Festkörperbatterien handelt, Teil des Clusters für Batterieproduktion.
 - » Ein enger Austausch zwischen den Projekten zur Festkörperbatterieproduktion im Cluster Festkörperbatterien und dem Cluster Batterieproduktion ist sicherzustellen.

5 Allgemeine Anschlussfähigkeiten

Im Sinne der HTAD ist eine Anschlussfähigkeit der Clusterergebnisse in einer der weiteren Batterie-Flaggschiff-Maßnahmen sowie der Maßnahmen der Batterie-Roadmap sinnvoll. Die Cluster sollten daher auch diese Maßnahmen unterstützen und synergetisch und effizient mit ihnen wechselwirken. Die Cluster sollen am Anfang der Innovationspipeline dauerhaft neue Impulse und technologische Entwicklungen bereitstellen, die Industrialisierbarkeit von risikobehafteten Ansätzen überprüfen und somit Impulsgeber für neue Anwendungen und Skalierungslösungen sein.

- Batterieforschungsinfrastrukturen, insbesondere Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB)
 - » Erfolgreiche Entwicklungen aus den Clustern können an den deutschen Batterieforschungsinfrastrukturen bis hin zu den Dimensionen, die die FFB abbilden kann, weiterentwickelt werden. Batteriematerialien der nächsten Generation können auf eine großskalige Produzierbarkeit getestet werden. Innovative Produktionstechnologien und Digitalisierungsstandards können in die Forschungsproduktionslinien eingebunden werden und schließlich in der FFB in den Gigawattstunden-Maßstab skaliert werden. Auch für Festkörperbatterien eröffnen sich hier Wege, etwa über die Innovationslabore der FFB. Die Etablierung einer (A)SSB-Pilotlinie könnte in diesem Kontext ein übergeordnetes Ziel darstellen. Die Forschungsinfrastrukturen und insbesondere die FFB stellen somit das Bindeglied im Innovationsökosystem zwischen FuE und Industrialisierung dar.
- Vertikale Applikationsallianzen
 - » Maßgeschneiderte Batterielösungen für die Industrie – inklusive der Produktions- und Prozesstechnologien – sollen durch einen Top-Down-Ansatz von industriegeleiteten Applikationsallianzen etabliert werden. Dazu soll die Machbarkeit bspw. in Spezialanwendungen gezeigt werden. Für die Industrie stellen die Cluster daher einen idealen Ideen- und Konzeptpool dar, um erfolgreiche Technologiepfade aus den Grundlagen zu etablieren.
- CGoIn – Transfermodul
 - » Eine Anschlussfähigkeit könnte u. a. eine gemeinsame Industrialisierung von Materialansätzen, Produktionsverfahren, Recyclingkonzepten oder neuen Batteriezellen durch die in den Clustern beteiligten akademischen Partner mit relevanten Unternehmen sein.
 - » Zur Unterstützung einer europäischen und insbesondere deutschen Zellfertigung sollen bereits während der Clusterlaufzeit Projekte, welche die gesamte Wertschöpfungskette mit Industriebeteiligung abdecken und in einer Industrialisierung münden können, mitgedacht werden.
- Direkter Transfer in die Industrie
 - » Der Wissensvorsprung deutscher Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette soll durch ein starkes F&E-Ökosystem Batterietechnologien und exzellente Forschung am Wissenschaftsstandort Deutschland gesichert werden.
 - » Handlungsempfehlungen, Leitfäden und Präsentationen der Ergebnisse auf Industrietagen können der Industrie als Input dienen. Hierdurch wird insbesondere die Souveränität der Fahrzeugindustrie durch europäische Wirtschaftskreisläufe gestärkt, positive Synergieeffekte ergeben sich für weitere Wirtschaftszweige. Zusätzlich sollen

die hohen Skalierungskosten im industriellen Umfeld gesenkt werden. Lücken bei der Skalierung und Produktion werden geschlossen. Der Standortnachteil durch hohe Energiekosten kann durch effiziente Fabrikplanung als Teil der Digitalisierungsansätze und neuartige Prozesse in den Clustern abgemildert werden (Beispiel Trockenbeschichtung, effiziente und effektive Klimatisierung der Produktionsumgebung).

- » Förderung exzellenter Wissenschaftler/-innen und ihrer Ideen erfolgt über die Förderrichtlinie BattFutur. Ziel dabei ist u. a., den Anwendungstransfer neuer Ansätze zu verbessern, Ausgründungen zu begünstigen sowie industrielle Karrierewege zu ermöglichen. Die Schaffung von Anknüpfungspunkten mit den Clustern ist ausdrücklich erwünscht.
- » Zudem sollen Ausgründungen und Start-ups gezielt unterstützt werden. Wechselwirkungen mit der Maßnahme BaStI sind erwünscht. Über die Begleitprojekte können beidseitige Informationsveranstaltungen zur Schulung umgesetzt werden, sodass mögliche Ausgründungen besser und schneller ermöglicht werden. BaStI kann hierbei als Bindeglied zu Pilotlinien zum beschleunigten Wachstum dienen. Der Innovationstransfer kann aus dem Cluster heraus auch direkt mit einem Industriepartner als Spin-off erfolgen.

6 Leistungskennndaten

Folgender Katalog für Leistungskennndaten bietet eine Hilfe zur Einordnung der Serienreife und Anwendungsmöglichkeiten von Batteriezellen. In den Clustern für Batterieproduktion und Festkörperbatterien sollte dieser Katalog in die Rahmenpläne aufgenommen werden. Jedes Projekt sollte sich möglichst vollständig einordnen, um zwischen den in den Projekten erarbeiteten Konzepten Vergleichbarkeit im Hinblick auf ihre jeweilige Wirkrichtung zu ermöglichen und konkrete KPIs vorweisen zu können. Bei Batteriematerialien sollten sich Projekte mit Ziel-TRL ab 4 ebenfalls selbst entsprechend einordnen und mit KPIs Ziele setzen, um eine Anschlussfähigkeit im Cluster für Batterieproduktion einschätzen zu können. Materialentwicklungen auf niedrigem TRL sollten versuchen, möglichst viele KPIs als Meilensteine oder Zielwerte anzugeben bzw. zum Projektende zu berichten. Übergeordnet sind die Ziele und KPIs der Batterie-Roadmap der HTAD als handlungsleitend zu beachten.

- Kostenabschätzung (sofern es eine ausreichende Datenbasis gibt in € kWh⁻¹ und € kg⁻¹);
- Zellkomponenten (u. a. Stromableiter, Aktivmaterialien, Elektrolyte, Separator / Zwischenschichten, ...);
- Zelldimensionen (Grundfläche, Dicke, Füllgrad, ...);
- Anzahl der Elektrodenstapel (einlagig, mehrlagig);
- Zellformat (Pouch, prismatisch, zylindrisch, Knopfzelle, ...);
- Zellkapazität (in Ah) unter Angabe der Stromdichte, Anpressdruck (bei SSB) und Temperatur;
- Flächenkapazität (in mAh cm⁻²) bzw. Flächenbeladung
- Mittlere Zellspannung (in V);
- Flächenwiderstand bei Betriebsbedingungen.
- Volumetrische Energiedichte der Vollzelle (in Wh L⁻¹);
- Gravimetrische Energiedichte der Vollzelle (in Wh kg⁻¹);
- Leistungsdichte der Vollzelle (in W L⁻¹);

- Spezifische Leistung der Vollzelle (in W kg^{-1});
- Erreichbare C-Rate;
- Lebensdauer bei Schnellladung (in Zyklenzahl, Bezug zur Restkapazität und Stromdichte);
- Lebensdauer bei schonender Ladung (in Zyklenzahl, Bezug zur Restkapazität und Stromdichte);
- Coulomb-Effizienz (in %);
- Betriebstemperatur (in $^{\circ}\text{C}$, notwendige und maximale/minimale Temperaturen);
- Notwendiger Betriebsdruck der Vollzelle (in MPa);
- Abschätzung der Integrationsfähigkeit für die Zellfertigung (sofern es eine ausreichende Datenbasis gibt);
- Abschätzung der Rohstoffkritikalität;
- Anteil aller fluorhaltiger Komponenten (z. B. PFAS);
- GWP (z. B. $\text{g CO}_2\text{e/kWh}$)

Anlage: Tabelle Abgrenzung und Übergabepunkte

Batteriematerialien	Batterieproduktion	Festkörperbatterien
<p>Materialentwicklungen für die Verarbeitung auf bekannten Prozessen sollen Teil des Clusters für Batteriematerialien sein.</p> <p>Entwicklung von Synthesewegen zur Prozessskalierung sind Bestandteil des Clusters für Batteriematerialien.</p> <p>Materialskalierungen sollen Teil des Clusters für Batteriematerialien sein.</p> <p>Kalzinerung und Granulierung von Aktivmaterialien, technisch-chemische Anlagen zu Elektrolyten und diversen Passivmaterialien als Flüssigkeit oder Schüttgut sollten dementsprechend Teil des Clusters für Batteriematerialien sein.</p> <p>Verfahren zum Direktrecycling von Batterieproduktionsausschuss einschließlich einer eventuellen Rekonditionierung sollen Teil des Clusters Batterieproduktion sein. Weitere Verfahren zum Recycling sollen Teil des Clusters für Batteriematerialien sein (z. B. pyro- und hydrometallurgische Ansätze).</p>	<p>Prozessentwicklungen mit bekannten Materialien sind Teil des Clusters für Batterieproduktion.</p> <p>Die Voraussetzung für die Betrachtung von Zellchemien im Produktionscluster ist deren Verfügbarkeit im kg-Maßstab.</p> <p>Materialskalierungen sollen Teil des Clusters für Batteriematerialien sein: Die Prozesskette der Batterieproduktion soll somit bei der Mischung der Materialkomponenten, ggf. auch einer Vorkonditionierung der Materialien, in einer Zellfabrik anfangen.</p> <p>Mechanische/Maschinelle Recyclingverfahren sollen im Cluster für Batterieproduktion adressiert werden.</p>	
<p>Die Entwicklung von Katholytmaterialien sollte – sofern keine Festelektrolyte enthalten sind – Bestandteil des Clusters Batteriematerial sein.</p>		<p>Funktionelle Elektrolyte wie beispielsweise Gel-Elektrolyte und Festelektrolyte sollten Bestandteil des Clusters Festkörperbatterien sein.</p>
	<p>Die Fabrikebene oder Digitalisierungsstandards sind, sofern es sich nicht ausschließlich um die Produktion und das Recycling von Festkörperbatterien handelt, Teil des Clusters für Batterieproduktion.</p>	<p>Einzelprozesse und Abschnitte der Prozesskette, die ausschließlich auf die Produktion von Festkörperbatterien abzielen, sind nicht Teil des Clusters für Batterieproduktion.</p>
	<p>Ein enger Austausch zwischen den Projekten zur Festkörperbatterieproduktion im Cluster Festkörperbatterien und dem Cluster Batterieproduktion ist sicherzustellen.</p>	
<p>Weitere Übergabepunkte: CGoIn-Transfermodul, Vertikale Applikationsallianzen, Skalierung über die Fraunhofer FFB oder direkt Übertragung in die Industrie. Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Qualifizierung von Fachkräften.</p>		
<p>Nicht berücksichtigte Zellchemien, Systeme wie Redox-Flow oder nicht berücksichtigte Teile des ehemaligen Clusters Batterienutzungskonzepte können im Rahmen der Fördermaßnahme B@TS oder zukünftig über die Vertikalen Applikationsallianzen gefördert werden.</p>		

Crossover-Projekte über die Cluster

Um die Vernetzung zwischen den Clustern zu fördern, ist auch grundsätzlich die Durchführung von „Crossover-Projekten“ möglich. Verbundprojekte, die thematisch mehreren Clustern zugeordnet werden können, müssen sich mindestens einem Hauptcluster zuordnen. Die Zuordnung zum Hauptcluster muss sich in der Projektidee und dem jeweiligen Arbeitsplan widerspiegeln.