Fraunhofer

TRAWEBA Transformations-HUB Wertschöpfungskette Batterie

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Highlights aus der Wissenschaft und Forschung

Summary Briefing des TraWeBa-Projektes (Q3/2025)

www.traweba.de

Ansprechpartner Projekt TraWeBa

ACOD GmbH
August-Bebel-Str. 73 | 04275 Leipzig
Tel.: +49 (0) 341 9939 3884
E-Mail: info@traweba.de

Ansprechpartner TraWeBa Summary Briefing

Fraunhofer Institut für Keramische Technologen und Systeme
Am St.-Niclas-Schacht 13 | 09599 Freiberg
Ansprechpartner: Eleonore Siebecke

E-Mail: eleonore.siebecke@ikts.fraunhofer.de

Briefing des TraWeBa-Projekts (Q3/2025)

Disclaimer

Da sich die Forschungslandschaft zum Thema Lithium-Ionen-Batterien stetig weiterentwickelt, möchten wir Ihnen anhand des Summary Briefing ausgesuchte, neue und innovative Entwicklungen aus dieser Landschaft vorstellen. Unsere Einschätzung zu deren Bedeutung findet sich in ergänzenden, ausgewählten Punkten unter *Potentialen* und *Herausforderungen*, die lediglich als Anregung zu verstehen und daher nicht vollständig sind. Bei Interesse an einer tieferen Diskussion stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung (siehe Ansprechpartner auf S.2).

Das Summary Briefing Q3/2025 adressiert neben spannenden Analysen zum Rohstoff Lithium oder Technologien der Elektrolytbefüllung in der Zellproduktion auch aktuelle Rahmenbedingungen und (politische) Strategien in Deutschland, die von besonderer Relevanz für die Batterieindustrie-Akteure sind.

Inhalt

Briefing des TraWeBa-Projekts (Q3/2025) 3

Disclaimer 3

Highlights aus der Wissenschaft und Forschung 5

Herausforderungen in der Automobil-Zuliefererindustrie 5

Hightech Agenda Deutschland 6

Wirtschaftsnobelpreis in der Innovationsökonomie 7

Batteriechemie 8

Batterierohstoff Lithium 8

Batterieproduktion 10

Elektrolytbefüllung 10

Batterierecycling 13

Batterierecht-Durchführungsgesetz (BattDG) 13

Literatur 14

Highlights aus der Wissenschaft und Forschung

Herausforderungen in der Automobil-Zuliefererindustrie

Die Berylls TOP 100-Zuliefererstudie [1] zeichnet das Bild einer Zulieferindustrie in einer strukturellen Krise. Nach einer kurzen Erholung nach der Pandemie sank der Umsatz der Zulieferer im Jahr 2024 um 4,6 Prozent auf 1.085 Milliarden Euro. Nur einer der 20 größten Zulieferer erzielte ein Umsatzwachstum.

Der Übergang zu Elektrofahrzeugen hat Herausforderungen bei den Automobilzulieferern weiter verschärft – insbesondere auch, da die Zeitpläne für die Einführung von batterieelektrischen Fahrzeugen durch OEMs wiederholt verschoben worden sind. Die Studie zeigt, dass 88 Prozent der 26 geplanten Fahrzeug-Programme bis Anfang 2025 verschoben wurde, wobei sich die durchschnittlichen Verzögerungen auf mehr als 6 Monate belief. Bei den südkoreanischen Batterieherstellern wie Samsung SDI und LG Energy Solution kam es zu Umsatzrückgängen von 41,5 Prozent bzw. 28,3 Prozent, was auf ein Überangebot auf dem Markt und eine etwas weniger starke (globale) Nachfrage nach Elektrofahrzeugen zurückzuführen ist – chinesische Unternehmen wie Branchenprimus CATL konnte jedoch sowohl bei Umsatz wie auch Marktanteil die globale Vormachtstellung weiter ausbauen.

Ein wesentlicher Aspekt der Berylls Studie sind die steigenden Finanzierungskosten von Investitionen in den Unternehmen. Steigende Zinskosten haben die Finanzlage der Zulieferer verschlechtert. Die deutschen Unternehmen Bosch, Continental und ZF wenden nun mehr als 1 Prozent ihres Umsatzes für Zinsen auf, mehr als doppelt so viel wie vor der Corona-Pandemie. Im Gegensatz dazu fallen bei den asiatischen Wettbewerbern nur 0,2 Prozent an Zinsen an, und sie wachsen weiterhin stark. Die Zulieferer bauen Arbeitsplätze ab und schließen Werke. In Deutschland werden mehr als 20.000 Stellen abgebaut, davon allein 14.000 bei ZF. In 2025 gab es weitere Ankündigungen von (weltweitem) Stellenabbau, so z.B. bei Bosch, Continental, Schaeffler und den großen deutschen Automobilbauern selbst [2].

International haben chinesische Zulieferer bemessen am Umsatz einen Sprung nach vorne gemacht: Von 2018 bis 2024 haben sie ihren Umsatz mehr als verdoppelt (+139 Prozent) und damit das BIP-Wachstum Chinas weit übertroffen und das Wachstum der etablierten Zulieferer von 16 Prozent in den Schatten gestellt.

Die Studie zeigt außerdem, dass die Produktionsbasis in Deutschland nicht ausgelastet ist: Die Anlagenauslastung lag 2024 im Durchschnitt bei nur 68 Prozent – in der Regel spricht man von 85 Prozent als Effizienzschwelle. Hinzu kommt für die Automobilzulieferer, dass hohe Energiekosten ein Nachteil bleiben. Trotz der jüngsten Preisrückgänge sind die deutschen Strom- und Gaspreise für die Industrie deutlich höher als in den USA oder China. Über 80 Prozent des fahrzeugbezogenen Energieverbrauchs entfallen auf Bereiche außerhalb der OEM-Fabriken, was die Zulieferer zusätzlich benachteiligt.

Angesichts dieser Herausforderungen hat eine Diversifizierung an Aktivitäten der Zulieferer zugenommen: Die Nicht-Automobil-Umsätze der TOP 100-Zulieferer stiegen 2024 auf 17,5 Prozent, mit Wachstum in den Bereichen Heizungs- und Klimatechnik, industrielle Automatisierung und Robotik, Medizintechnik und nachhaltige Baumaterialien. Es ist anzunehmen, dass die steigenden Budgets und Auftragsvolumina in der Verteidigungs- und Rüstungsindustrie zunehmende Relevanz für die Automobil-Zuliefererindustrie einnehmen werden.

Hightech Agenda Deutschland

Die Hightech Agenda Deutschland [3] positioniert die *Batterietechnologie* als eine von sechs prioritären Schlüsseltechnologien mit der Vision, bis 2035 eine wettbewerbsfähige Batterieproduktion und Kreislaufführung in Deutschland aufzubauen, eingebettet in ein europäisches Produktionsnetzwerk. Diese Strategie reagiert auf die Erkenntnis, dass Deutschland zunehmend seine Stellung als Leitanbieter für Mobilitätstechnologien verliert und teilweise bereits kritisch abhängig von ausländischen Batterielieferanten ist.

Das Kernelement in der Hightech Agende zur Skalierung einer Batterieindustrie in Deutschland bildet die Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB), die einen innovativen Doppelansatz verfolgt. Im Technology-Push-Modus bringt sie gemeinsam mit Forschungspartnern neue Technologien und Materialien aus dem Labor in Richtung Massenproduktion, während sie im Market-Pull-Ansatz als offene Gigafactory konzipiert ist, in der Unternehmen und Start-ups mit eigenen Prozessen bis zum Gigafactory-Maßstab agieren können. Der erste Bauabschnitt, die FFB PreFab, startete im Herbst 2025 in den Produktionsforschungsbetrieb, während der zweite Bauabschnitt, die FFB Fab, bis 2029 in Betrieb gehen soll.

Ab 2026 sollen neue Batteriekompetenzcluster aufgebaut werden, die sich auf die Schwerpunkte *Batteriematerialien/Spezialchemie*, *Batterieproduktion* inklusive Anlagenbau sowie *Festkörperbatterien* konzentrieren sollen. Diese Cluster sollen eng mit der Industrie vernetzt werden und regionale Aktivitäten bündeln. Parallel dazu entstehen vertikale Applikationsallianzen, die neue Wertschöpfungsketten aus der Forschung heraus schaffen und Technologieentwicklung systematisch mit Anwendungsentwicklung verknüpfen. Die Kreislaufwirtschaft wird als integraler Bestandteil der Strategie verstanden. Bis 2035 soll nicht nur eine wettbewerbsfähige Batterieproduktion, sondern auch eine Kreislaufführung aufgebaut werden. Im Rahmen des Fachprogramms Materialinnovationen wird die datengetriebene Entwicklung leistungsfähiger Ersatzmaterialien gefördert, durch die Ressourcen geschont und Rohstoffabhängigkeiten reduziert werden können.

Als zentrale Stärken identifiziert die Agenda etablierte Innovationsökosysteme, den Wissensvorsprung deutscher Unternehmen, die Wertschöpfungskette der Automobilfertigung sowie Deutschlands Rolle als großer Binnen- und Absatzmarkt. Demgegenüber stehen wesentliche Schwächen, bspw. fehlende Erfahrung in der Skalierung von Batteriefabriken im Gigascale, hohe Energie- und Personalkosten, Fachkräfteengpässe, nicht ausreichend privates Kapital im Deeptech-Bereich sowie komplexe Beihilfeverfahren.

Die strategische und wirtschaftliche Bedeutung der Batterietechnologie wird durch Marktprognosen untermauert. Die weltweite Nachfrage nach leistungsstarken und nachhaltigen Batterien wird bis 2030 um das 14-Fache gegenüber 2020 steigen.

Die Bundesregierung verpflichtet sich in Ihrem Strategiepapier, auf nationaler und europäischer Ebene für die Wettbewerbsfähigkeit der Batterieindustrie einzutreten und international für ein Level-Playing-Field zu werben. Die Hightech Agenda ist in das europäische IPCEI-System eingebettet, das substanzielle staatliche Beihilfen für strategisch wichtige Industrieprojekte ermöglicht, siehe dazu auch das Summary Briefing Q2 2025 [4].

Die Hightech Agenda verknüpft außerdem die Batterietechnologie mit anderen prioritären Bereichen und Schlüsseltechnologien. Künstliche Intelligenz wird als Enabler für Batterieforschung und -produktion gesehen, während die Mikroelektronik-Strategie durch die Entwicklung smarter KI-Chips für Elektrofahrzeuge eng mit der Batteriestrategie verbunden ist. Anhand der Querbezüge verdeutlicht sich, dass moderne Batteriesysteme hochkomplexe mechatronische Systeme sind.

Am 29. Oktober 2025 startet die Hightech Agenda Deutschland mit einem initialen Roadmapping-Prozess zu den adressierten Schlüsseltechnologien, und soll ab 2026 in operative Maßnahmen umgesetzt werden.

Wirtschaftsnobelpreis in der Innovationsökonomie

Der diesjährige Wirtschaftsnobelpreis 2025 wurde an drei Ökonomen für ihre Forschung zu innovationsgetriebenem Wirtschaftswachstum verliehen: Joel Mokyr (Northwestern University), Philippe Aghion (Collège de France, INSEAD, London School of Economics) und Peter Howitt (Brown University). Die Königlich Schwedische Akademie würdigte ihre Erklärung, wie die Welt in den letzten 200 Jahren aus der Stagnation zu anhaltendem Wachstum gelangte.

Der emeritierte Professor Mokyr erhält hälftig den Alfred-Nobel-Gedächtnispreis für Wirtschaftswissenschaften hälftig für seine Identifizierung der Voraussetzungen nachhaltigen Wachstums durch technologischen Fortschritt. Der Wirtschaftshistoriker nutzte historische Quellen, um zu zeigen, dass der entscheidende Wendepunkt die wissenschaftliche Untermauerung technischen Wissens war. Vor der industriellen Revolution basierte Innovation im Wesentlichen auf Trial-and-Error; die Menschen konnten Geräte bedienen (Besitz von Fähigkeiten), verstanden aber nicht im Kern, warum sie funktionierten. Der Übergang vom bloßen Fähigkeitswissen zum propositionalen Wissen, also dem Verständnis der eigentlichen Funktionsprinzipien, ermöglichte einen selbstverstärkenden Innovationskreislauf. In seinen Arbeiten zeigt Mokyr, wie das aufgeklärte Europa durch einen "Markt für Ideen" und die transnationale "Republik der Gelehrten" Innovationen förderte und ermöglichte.

Die Professoren Aghion und Howitt teilen sich die andere Hälfte des Preises für ihre Arbeiten zum Wachstum durch schöpferische Zerstörung (*creative destruction*). In ihrem wegweisenden, über 17.000-fach zitierten, Artikel "A Model of Growth Through Creative Destruction" [5] von 1992 machten sie Schumpeters Konzept der schöpferischen Zerstörung [6] mathematisch nutzbar. Ihre Theorie erklärt, wie neue Technologien alte verdrängen. Innovationen sind wert*schöpfend* und fördern Wachstum, aber auch destruktiv für etablierte Unternehmen.

Die beiden Ökonomen zeigen in weiteren Werken wie "Endogenous Growth Theory" [7] und "The Economics of Growth" [8], dass dieser Prozess der schöpferischen Zerstörung Ressourcen wie Kapital und Arbeitskräfte aus überholten Bereichen freisetzt und in neue lenkt. Dies schafft Wachstum, aber auch Konflikte und gesellschaftliche Spannungen. Ihre Forschung wird als wichtige Implikationen für die Wirtschaftspolitik diskutiert. Sie betont damit beispielsweise die Notwendigkeit von Umschulungsprogrammen für verdrängte Arbeitnehmer und warnt, dass Innovation durch etablierte Interessengruppen blockiert werden können.

Die innovationsökonomische Forschung der Preisträger reflektiert ein Stück weit auch Europas Bemühen des Aufbaus einer eigenen Batterieindustrie und Batteriewertschöpfungskette. Deutschland und Europa stehen vor der Herausforderung, insbesondere gegen die asiatische Dominanz [4] an Fähigkeiten und Marktkapazitäten aufzuholen. Nimmt man die Argumentation der *kreativen Zerstörung* und des *propositionalen Wissens* auf nachhaltiges Wirtschaftswachstum auf, so lässt sich das im Kontext der Batterieindustrie übersetzen in

a) Europa braucht wissenschaftliche Exzellenz und industrielles Know-How, um weiterführend die Umsetzung in praktische Innovation zu ermöglichen,
b) eine (globale) Wettbewerbsfähigkeit erfordert kontinuierliche Innovation,
c) müssen auch die sozialen Folgen des Wirtschafts- und Technologiewandels aktiv adressiert werden, um politische Unterstützung zu sichern.

Batteriechemie

Batterierohstoff Lithium

Das Fraunhofer FFB Whitepaper „Batterierohstoff Lithium“ [9] hebt die strategisch wichtige Rolle von Lithium als Grundstoff für die Batterieproduktion und damit für die europäische und globale Energiewende hervor. Die Nachfrage nach Lithium in Batteriezellen ist stark gestiegen, wobei der Anteil des Batteriesektors am gesamten Lithiumverbrauch von 35 Prozent im Jahr 2014 auf heute 87 Prozent gestiegen ist. Dies unterstreicht die strategische Bedeutung von Lithium für die Elektromobilität und den Wandel in der Automobilindustrie. Im Rahmen des EU-Critical Raw Materials Acts definiert die EU den Rohstoff Lithium sowohl als kritischen wie auch strategischen Rohstoff für die europäische Industrie und Wertschöpfung.

Die weltweiten Lithiumreserven werden auf 28 bis 44 Millionen Tonnen geschätzt, ihre Verteilung ist jedoch sehr ungleichmäßig: Südamerika hält 43,6 Prozent, Nordamerika 25,2 Prozent und Australien und Asien zusammen 25,4 Prozent, während Europa nur etwa 2,5 Prozent ausmacht. Die bekannten europäischen Vorkommen – in Serbien (950 kt), Österreich (100 kt) und Portugal (10 kt) – werden noch nicht industriell genutzt, was die Versorgungssicherheit des Kontinents gefährdet. Die EU fördert mittlerweile auch strategische Projekte zur Rohstoffgewinnung in Europa, siehe dazu auch das Summary Briefing Q2 2025 [4].

Die konventionelle Lithiumgewinnung stützt sich heute auf zwei Hauptquellen:

- Salzlake (Sole) aus Salzwasser/Salaren
- Spodumen aus Hartgestein (lithiumreichen Pegmatiten).

Im Jahr 2024 führte Australien die Produktion mit 37 Prozent an, gefolgt von Chile (20 Prozent), China (17 Prozent) und Argentinien (8 Prozent). Die Marktkonzentration ist extrem, sechs Unternehmen sind für über 70 Prozent der Produktion verantwortlich – siehe zur Abhängigkeit auch [10] im Traweba Summary Briefing Q2 2025 [4]. Die Gewinnung aus Sole hat geringere Auswirkungen auf die Umwelt und einen geringeren Energiebedarf, allerdings stellt der Frischwasserverbrauch in ariden Regionen eine Herausforderung dar. Der Abbau aus Hartgestein erfordert eine energieintensive Kalzinierung bei 1080 °C, gefolgt von einer Schwefelsäure-Röstung, wodurch höhere Treibhausgasemissionen entstehen.

Geothermale Tiefenwässer, z.B. im Oberrheingraben in Deutschland könnte mit geschätzten Lithiumvorkommen von bis zu 2,8 Millionen Tonnen zu einer neuen, heimischen Quelle werden. Technologien zur direkten Gewinnung befinden sich noch in der Entwicklung bzw. in der Skalierung von industriellen Demonstratoren, aber die Ausbeute im Labormaßstab von 40 bis 95 Prozent ist vielversprechend [9]. Die Kopplung der Lithiumgewinnung mit der geothermischen Energieerzeugung und kurzen Transportwegen könnte somit strategische Vorteile durch die Kopplung von Energiewende und Rohstoff-gewinnung bieten.

Konkret erfolgt die Extraktion bei aktuellen Pilotanlagen, etwa im Oberrheingraben oder Norddeutschen Becken, beispielsweise durch Adsorber-Materialien auf Aluminiumhydroxid- oder Al-basierten Sorbenten. Diese binden Lithium-Ionen selektiv, andere Salze und Metalle verbleiben im Wasser. Nach Trennung wird das Lithium als Lithiumchlorid oder Lithiumhydroxid weiterverarbeitet und im letzten Schritt zu Batteriematerial (z.B. Lithiumcarbonat) aufgereinigt. Technologien wie selektive Membranfiltration, elektrochemische Extraktion und sogenannte tiefe eutektische Lösungsmittel sind ebenfalls Gegenstand der aktuellen Forschung und werden auf Praxistauglichkeit und Skalierbarkeit getestet. Die Effizienz in Labortests und Demonstratoren reicht je nach Methodik von 50–90 Prozent, wobei korrosive und skalierende Wasserinhaltsstoffe weiterhin prozesstechnische Herausforderungen darstellen. [11-14]

Dieses Verfahren unterscheidet sich grundlegend von den genannten traditionellen Gewinnungs-methoden, und gilt als neu, da großskalige Anwendungen bisher international erst in Pilot- und

Demonstrationsanlagen, vor allem in Deutschland und Frankreich, erprobt werden. Bislang existiert keine industrielle Massenproduktion, soll aber über die kommenden Jahre weiter skaliert werden. Bei günstigen geologischen Bedingungen (z.B. hoher Lithiumgehalt, ausreichender Wasserfluss) erlaubt dieses Verfahren eine ressourcenschonende und klimaneutrale Lithiumgewinnung, die zusätzlich zur Dekarbonisierung der Wärmeenergie-Bedarfe durch Geothermie beiträgt.

Dennoch bleibt: Recycling von Lithium-Ionen-Batterien ist für eine europäische Kreislaufwirtschaft und Versorgungssicherheit unerlässlich. Gleichwohl die steigende Nachfrage nach Batterien eine anhaltende Notwendigkeit von Primärlithium bedeutet, schreibt die EU-Batterieverordnung (2023) eine schrittweise Erhöhung der Recyclingquoten vor, was Investitionen in die Recyclinginfrastruktur vorantreibt. Mit den Erfahrungen der Lithium-extraktion aus Gewässern und Solen fokussiert beispielsweise das Direkte Recycling von Lithium aus Prozesswässer der Batterieproduktion und Recycling eine nahezu vollständige Kreislaufführung des Rohstoffs. Aufgrund der sehr hohen Konzentration dort könnte das Direktrecycling hier sehr spannend sein [15].

Batterieproduktion

Elektrolytbefüllung

Die Elektrolytbefüllung gilt weiterhin als einer der kostspieligsten und Taktzeit-bestimmenden Schritte der Lithium-Ionen-Batteriezellfertigung. Sie verursacht rund 5 % der Herstellkosten, begrenzt jedoch mit Durchsätzen von nur 0,6–0,7 GWh a^{-1} die Gesamtkapazität typischer Gigafactories [16]. Bedingt durch die begrenzten Durchsätze erfolgt eine verstärkte Parallelisierung von Elektrolyt-befüllungsanlagen, was zu einem hohen Flächenbedarf führt.

Der Prozess gliedert sich in „Filling" (Dosieren in das Totvolumen) und das überlappende „Wetting" (Penetration des Elektrolyten in Elektroden- und Separatorporen). Industriestandard ist die indirekte Befüllung in Vakuumkammern: Evakuieren auf ≈ 50 mbar, Einbringen des Elektrolyten via Lanzette (Pouch) bzw. Press-on-Düse (Hard-Case) und nachfolgende Druckzyklen bis ~6 bar mit Inertgas zur Gasblasenabfuhr und Benetzungsförderung [19]. Niedrige Drücke erleichtern zwar das Eindringen, verlängern jedoch die Taktzeit und erhöhen die Verdunstung flüchtiger Lösemittel. Skalierungsdaten für Großformate fehlen weitgehend, da ein Großteil der veröffentlichten Studien Laborzellen <10 Ah adressiert [20].

Materialseitige Optimierungen (Porositätsgrad, Separatorbeschichtungen, Plasmaaktivierung) verbessern primär das Wetting [22], mindern aber kaum die Limitierungen des Filling-Subprozesses. Folglich besteht erheblicher Bedarf an robusten, skalierbaren Technologien, die Füll- und Benetzungszeiten verkürzen, ohne Qualität, Sicherheit oder Kosten nachteilig zu beeinflussen.

POTENTIALE:

Eine systematische Auswertung von 43 Publikationen und 87 Patentschriften identifizierte 16 neuartige Ansätze; fünf davon weisen laut Expertenpanel ein klar positives Nutzenprofil auf [16].

Direktdruckbefüllung (10–20 bar)

Durch robuste Press-on-Düsen (Hard-Case) bzw. verstärkte Ports (Pouch) kann der Überdruck von heute 6 bar auf 10–20 bar gesteigert werden [17][18]. Modelle zeigen, dass sich die reine Dosierzeit um ~50 % verkürzt; die nachfolgende Benetzung profitiert von beschleunigter Gas-bläschenevakuierung (-20 bis -30 % Zykluszeit) [23]. Ein Filling-Strang kann so > 1 GWh a^{-1} erreichen. Gleichzeitig sinken Vakuumhaltezeit und damit Energiebedarf. Technisch erforderlich sind Gehäuse, Dichtungen und Verschraubungen, die 20 bar statisch aushalten [21].

Hochdruckbefüllung (20–30 bar)

Eine weitere Drucksteigerung halbiert laut CFD-Prognosen die Dosierzeit gegenüber 10 bar; jedoch steigt das Risiko für Stapeldeformation und Separator-verschiebung signifikant. Da heutige prismatische Berstmembranen bei ~8–9 bar auslösen [21], sind alternative Sicherheitskonzepte (z. B. temporäre Druckhüllen) nötig. Der TRL liegt bei 2–3; umfangreiche Material- und Sicherheits-studien fehlen.

Schraubports (Hard-Case)

Gewindeöffnungen mit Metall- oder Polymer-O-Ring-Dichtung (CN202076337U) ermöglichen zuverlässige Direktdruckbefüllung >10 bar. Sie ersetzen Laserbohr-/Schweiß-schritte und können Fertigungskosten um 2–3 % senken [17]. Mit TRL 7 gelten sie als industrienah.

Port-Technologie (Pouch)

Die von IP PowerSystems vermarkteten Ports (DE102019003594A1) gestatten Direktdruck, Mehr-punktbefüllung sowie gleichzeitige Vakuumierung großer Pouch-Formate. Pilotanlagen demonstrieren Taktzeit-verkürzungen um bis zu 40 % bei moderatem CAPEX-Aufschlag <10 % [17]; TRL 7.

Vibrationsunterstützte Lanzen

Piezo- oder Exzenteranregung (CN113314813B) reduziert Tropfverluste um bis zu 80 %, stabilisiert den Volumenstrom und minimiert Düsenverblockungen. Der TRL liegt bei 3–4; Investitionsmehrkosten sind gering, sodass sich eine schnelle Amortisation abzeichnet.

Group	Technology	TRL	Cost	Process Time	Process Safety	Process Stability	Product Quality	Overall Evaluation
Process parameter	Pressurization to 10–20 bar	4	--	++	--	-	-	++
	Pressurization to 20–30 bar	2	---	+++	---	--	--	+
Cell design	Multiple filling points	5	--	+	0	-	0	-
	Screw connection	7	++	-	++	+	0	+
	Large filling opening with burst diaphragm	3–4	0	+	0	0	0	0
	Port technology	7	+++	++	++	-	0	+
	Flushing of the cell by electrolyte pump circuit	3	---	+++	-	--	0	--
Filling device	Vibration of the dosing lance	3	-	0	+	0	0	+
	Telescopic plates in the injection tube	3	-	0	+	--	0	0
	Telescopic capsule in the injection tube	3	-	0	+	-	0	0
	Flexibilization to different cell dimensions	3	--	0	-	-	0	-
	Filling by centrifugal force	3	-	+	-	0	0	-
	Electrolyte spraying	3	-	+	-	-	0	-
Electrolyte	Filtration	8	--	0	++	--	+	0
	Just-in-time mixing	4	--	0	0	-	++	0
	Collecting and recycling	3	--	0	+	0	0	-

Tabelle 1: Liste der neuen Technologien und die entsprechende Expertenbewertung [16]

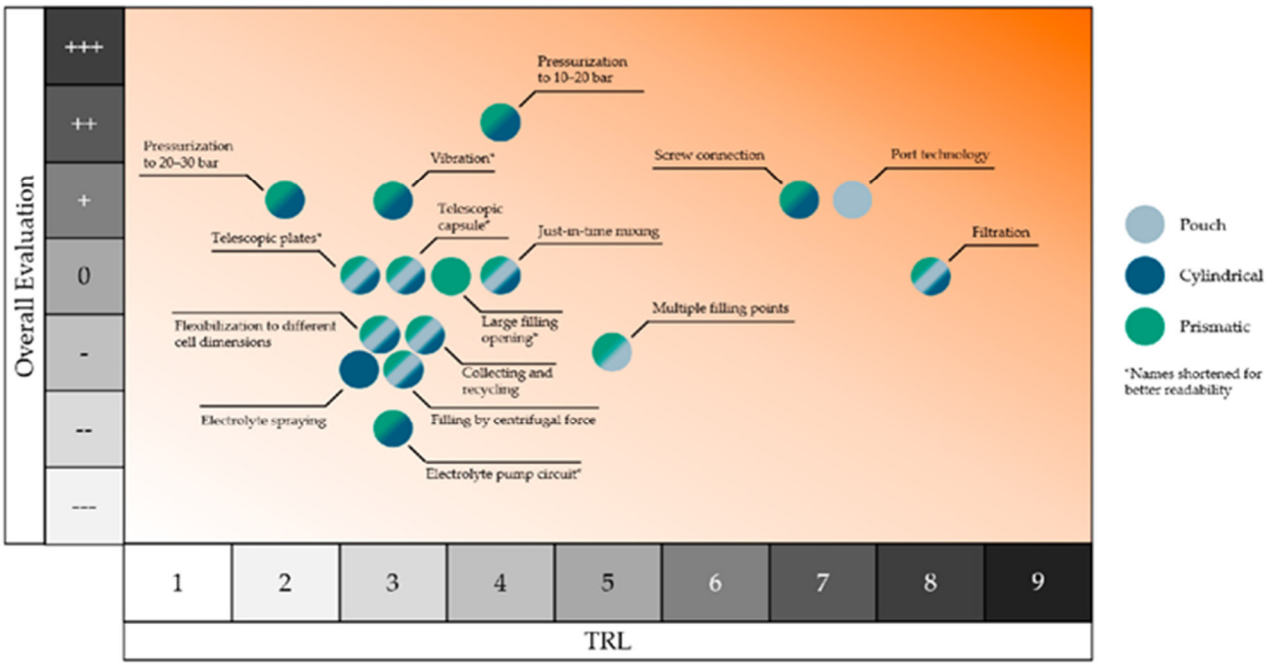

Abbildung 1:Gesamtbewertung (y-Achse) aller Technologien in Abhängigkeit von ihrer technologischen Reife (x-Achse) einschließlich ihres Anwendungsbereichs hinsichtlich des Zellformats [16]

Impact-Bewertung (vgl. [16], Tabelle 1):

- Taktzeit: Direktdruck ⩽20 bar und Mehrpunkt- bzw. Großöffnungskonzepte bieten kumulativ bis zu 60 % Zykluszeitreduktion.
- Qualität/Sicherheit: Inline-Filtration, Partikelmonitoring und definierte Hochdruckgrenzen senken Kurzschluss- und Gasungsrisiken.
- Kosten: Höhere CAPEX durch Druckhardware wird langfristig über geringere OPEX (Energie, Personal) und höhere Anlagenauslastung kompensiert; Break-even bei ~3–4 Jahren für >10 GWh a^{-1}-Werke [24].
- Flexibilität: Port- und JIT-Mischsysteme ermöglichen schnelle Rezeptur- sowie Formatwechsel, wichtig für künftige Feststoff- oder Hochsiliziumzellen.

Vergleicht man die Impact-Achse (vgl. [16], Abbildung 1) mit der TRL-Position, zeigt sich ein typisches Dilemma: Technologien mit hohem Nutzenpotenzial (z. B. 20–30 bar-Befüllung plus Direktdruck) besitzen noch geringe Reifegrade und benötigen substanzielle Entwicklungs-, Qualifikations- und Standardisierungsarbeiten. Hersteller, die frühzeitig Pilotlinien für Hochdruckbefüllung und Port-Integration aufsetzen, können sich Differenzierungsvorteile im Wettbewerb sichern und perspektivisch die Kapazitätslimitierung des Filling-Schrittes signifikant entschärfen. Parallel sollten begleitende Aktivitäten zur Material- und Prozesscharakterisierung (z. B. Neutronenradiografie, In-situ-Ultraschall) intensiviert werden, um belastbare Skalierungsrichtlinien zu etablieren.

HERAUSFORDERUNGEN DER UMSETZUNG:

Durch den geringen Entwicklungsstand mit einem geringen TRL der betrachteten Anlagen wurde gezeigt, dass noch kein industrieller Standard erreicht werden konnte. Eine folge sind neue Herausforderungen die neuen Anlagen betreffend in Wechselwirkung mit dem Produkt, den Batteriezellen. Daher ergeben sich die folgenden Handlungsempfehlungen und Herausforderungen:

1. Strukturelle Festigkeit & Sicherheit:

Zellgehäuse, Dichtungen und Ports müssen Drucke ⩾20 bar, Temperaturzyklen und Elektrolytkorrosion dauerhaft aushalten. Für prismatische Hard-Cases sind neue Deckelkonzepte mit verstärkten Flanschen erforderlich; Pouch-Ports benötigen chemikalienfeste Metall-Polymer-Verbunde [21].

2. Anlagenkomplexität:

Vibrationsmodule, Mehrfachports oder Inline-Mischer erhöhen den Integrationsaufwand. Zusätzliche Dichtstellen können Partikelquellen bilden; daher sind Closed-Loop-Reinigungs- und Condition-Monitoring-Systeme (z. B. Partikelzähler, Lecktester) zwingend notwendig.

3. Unzureichende Skalierungsdaten:

Die meisten Innovationen verharren bei TRL ⩽ 4. Großpilot-anlagen ⩾100 MWh a^{-1} sind notwendig, um Langzeitzuverlässigkeit, Energiebedarf und TCO belastbar zu quantifizieren. Ohne solche Daten bleibt das Investitionsrisiko hoch.

4. Normierungsbedarf & Datentransparenz:

Standardisierte Prüfprotokolle für Hochdruck-Befüllung (z. B. Druckhaltetests, Restfeuchte-Grenzen) fehlen. Ein industrieweiter Konsens ist Voraussetzung für Zulassung und Marktdurchdringung.

Kurz- bis mittelfristig erscheint die Kombination aus Direktdruck ⩽20 bar, Port-/Schraubanschlüssen und begleitender Filtration am realistischsten, um den Engpass Filling zu entschärfen und Durchsätze von >1 GWh a^{-1} pro Linie zu erreichen. Langfristig könnten Hochdruckstrategien >20 bar, gekoppelt mit digitaler Prozessregelung und verbesserter Zellarchitektur, die Taktzeit nochmals halbieren. Entscheidend ist, dass Forschungseinrichtungen, Anlagenbauer und Zellhersteller koordiniert Pilotstudien durchführen, um die heute bestehenden Wissens- und Standardisierungslücken systematisch zu schließen.

Batterierecycling

Batterierecht-Durchführungsgesetz (BattDG)

Das BattDG wurde mit dem Gesetz zur Anpassung des Batterierechts an die EU-Verordnung EU 2023/1542 in Deutschland verkündet und trat im Wesentlichen am 7. Oktober 2025 in Kraft – knapp ein Jahr später als ursprünglich geplant, siehe [4]. Das deutsche BattDG ist ein Durchführungsgesetz der EU-Verordnung, das nationale Zuständigkeiten, Registrierungspflichten, Überwachungs- und Vollzugsmechanismen sowie spezifische Rückgabe- und Sammelpflichten konkret regelt.

Wesentliche Elemente der Umsetzung umfassen die Verpflichtung zur Einrichtung kollektiver Sammelsysteme für sämtliche Batteriekategorien, das Hinterlegen finanzieller Sicherheiten durch Hersteller/Betreiber zur Insolvenzabsicherung, die Neuregelung der Rückgabe- und Sammelpflicht für Altbatterien (z. B. aus E-Bikes oder E-Scootern) an kommunalen Sammelstellen sowie die Möglichkeit zur Gebührenbemessung in den Systemen nach ökologischen Kriterien [25]. Ferner übernimmt das nationale Gesetz die Anforderungen der EU-Verordnung zur Kennzeichnung, Konformitätsbewertung und Sorgfaltspflichten in der Lieferkette (z. B. Herkunft von Rohstoffen, Menschenrechts-/Umweltaspekte) sowie zur Sammlung und Behandlung von Altbatterien [26]:

- Das zentrale Prinzip des BattDG ist die *erweiterte Herstellerverantwortung*, die Hersteller für den gesamten Lebenszyklus ihrer Batterien verantwortlich macht. Hersteller müssen finanzielle und organisatorische Verantwortung für die Sammlung, Rücknahme und ordnungsgemäße Entsorgung oder das Recycling ihrer Batterien übernehmen. Dies bedeutet konkret, dass sie entweder eigene Rücknahmesysteme etablieren oder sich an bestehenden kollektiven Systemen beteiligen.
- Alle Batteriehersteller, die Batterien in Deutschland in Verkehr bringen, unterliegen einer Registrierungspflicht bei den zuständigen deutschen Behörden. Sie müssen regelmäßig Daten über die Mengen der in Verkehr gebrachten Batterien, deren Typen und Zusammensetzung sowie über die gesammelten und recycelten Altbatterien melden. Diese Berichtspflichten dienen der Transparenz und ermöglichen damit den Behörden die Überprüfung, ob die gesetzlichen Sammel- und Recyclingquoten erreicht werden.
- Hersteller müssen nachweisen, dass die in ihren Batterien verwendeten kritischen Rohstoffe wie Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit unter Einhaltung von Umwelt- und Sozialstandards gewonnen wurden.
- Hersteller müssen ihre Batterien mit umfassenden Informationen kennzeichnen. Ab 2027 müssen tragbare Batterien einen QR-Code aufweisen, der elektronischen Zugang zu detaillierten Produktinformationen (Stichwort Batterie-Pass) bietet, einschließlich Kapazität, chemischer Zusammensetzung, Hinweisen zur sicheren Verwendung und Entsorgung sowie Informationen über den Rezyklatanteil.
- Hersteller müssen die Kosten für die Sammlung, Sortierung, Transport und Recycling von Altbatterien tragen. Dies erfolgt typischerweise durch Beiträge zu kollektiven Rücknahmesystemen, die diese Aufgaben organisieren.

Das BattDG ermächtigt somit auch deutsche Marktüberwachungsbehörden, die Einhaltung der Vorschriften zu kontrollieren. Bei Verstößen gegen die Vorschriften drohen Sanktionen, die von Bußgeldern über Verkaufsverbote bis zur Rücknahme nicht konformer Produkte vom Markt reichen können. Paragraf 50 des BattDG regelt auch die grenzüberschreitende Zusammenarbeit, wenn eine in Deutschland in Verkehr gebrachte Batterie in einem anderen EU-Mitgliedstaat als nicht konform identifiziert wird. So gelten zwar viele der neuen Pflichten seit Oktober 2025, einzelne organisatorische Änderungen (z. B. Behörden-zuständigkeiten) greifen erst ab 1. Januar 2026 oder Anfang 2027 [25]. Insgesamt bedeutet die Umsetzung, dass Deutschland die nationale Rahmensetzung zur praktischen Vollziehung der EU-Vorgaben schafft und integriert zusätzliche nationale Detailregelungen, um die Hersteller- und Marktverantwortung entlang des Batterie-Lebenszyklus wirksam zu machen.

Literatur

[1] J. Dannenberg, A. Timmer & J. Simon. 2025. *TOP-100-Zulieferer-Studie 2025.* Berylls / AlixPartners. https://www.berylls.com/wp-content/uploads/2025/08/TOP-100-Zulieferer-Studie-2025-DE-Digital-Final-compressed.pdf

[2] ingenieur.de. 2025. *Binnen zwölf Monaten: Autoindustrie verliert über 50.000 Arbeitsplätze.* ingenieur.de (26.08.2025). https://www.ingenieur.de/wirtschaft/autoindustrie-in-der-krise-gehen-noch-mehr-jobs-verloren

[3] Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR). 2025. *Hightech Agenda Deutschland.* https://www.bmftr.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/L/31881_Hightech_Agenda_Deutschland.pdf

[4] Traweba. 2025. *TraWeBa — Summary Briefing Q2 2025.* https://traweba.de/wp-content/uploads/2025/08/Summary-Briefing-Q2-2025.pdf

[5] P. Aghion & P. Howitt. 1990. *A Model of Growth Through Creative Destruction.* NBER Working Paper No. 3223. https://www.nber.org/papers/w3223

[6] Bundeszentrale für politische Bildung (bpb). o.J. *Schöpferische Zerstörung — Lexikon der Wirtschaft.* https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/lexikon-der-wirtschaft/20588/schoepferische-zerstoerung/

[7] P. Aghion & P. Howitt. 1998. *Endogenous Growth Theory.* MIT Press, Cambridge.

[8] P. Aghion & P. Howitt. 2009. *The Economics of Growth.* MIT Press, Cambridge.

[9] D. Slak & F. Degen. 2025. *Whitepaper: Batterierohstoff Lithium.* Fraunhofer FFB. https://www.ffb.fraunhofer.de/de/news/Pressemitteilungen/whitepaper-untersucht-globale-gewinnung--abhaengigkeiten-und-zuk.html

[10] T. Greitemeier et al. 2025. *China's hold on the lithium-ion battery supply chain. Journal of Power Sources Advances*, 32, 100173. https://doi.org/10.1016/j.powera.2025.100173

[11] V. Goldberg, T. Kluge & F. Nitschke. 2022. *Herausforderungen und Chancen für die Lithiumgewinnung aus geothermalen Systemen in Deutschland – Teil 1: Literaturvergleich bestehender Extraktionstechnologien. Grundwasser*, 27: 239-259. https://doi.org/10.1007/s00767-022-00522-5

[12] R.B. Zegeye et al. 2025. *Sustainable lithium recovery from geothermal brine… Green Chemistry*, 27: 4205-4221. https://doi.org/10.1039/D4GC06530A

[13] V. Schenker, P. Bayer, C. Oberschelp & S. Pfister. 2024. *Is lithium from geothermal brines the sustainable solution… Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199: 114456. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114456

[14] DGMK. 2025. *Chances for Lithium from Reservoir Waters – Germany & Austria as Production Location.* DGMK-Bericht 881-1. https://dgmk.de

[15] L. Baudino, C. Santos et al. 2022. *Recent Advances in the Lithium Recovery from Water Resources: From Passive to Electrochemical Methods. Advanced Science*, 9: 2201380. https://doi.org/10.1002/advs.202201380

[16] M. Hinkers, K. Borzutzki, O. Krätzig & F. Degen. 2025. *Comprehensive Assessment of Novel Technologies for Electrolyte Filling in Lithium-Ion Battery Production. Batteries*, 11(2): 41. https://doi.org/10.3390/batteries11020041

[17] IP PowerSystems GmbH. 2024. *Smarte Elektrolytbefüllung — Produktbroschüre.* IP PowerSystems GmbH.

[18] M. Li et al. 2018. *Liquid Injection Method and Preparation Method of Hard-Shell Lithium-Ion Battery.* Patent CN108832071 B.

[19] T. Knoche, G. Reinhart. 2015. *Electrolyte Filling of Large-Scale Lithium-Ion Batteries: Challenges for Production Technology and Possible Approaches. Applied Mechanics and Materials*, 794: 11-18. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.794.11

[20] F.J. Günter et al. 2020. *Influence of the Cell Format on the Electrolyte Filling Process of Lithium-Ion Cells. Energy Technology*, 8: 1801108. https://doi.org/10.1002/ente.201801108

[21] J.H. Kim et al. 2017. *Design of Integrated Safety Vent in Prismatic Lithium-Ion Battery. Journal of Mechanical Science and Technology*, 31: 2505-2511. https://doi.org/10.1007/s12206-017-0448-y

[22] M. Frankenberger et al. 2023. *Improving Wetting Behavior and C-Rate Capability of Lithium-Ion Batteries by Plasma Activation*. Energy Technol. 2023, 11, 2200636. https://doi.org/10.1002/ente.202200636

[23] J. Hagemeister et al. 2022. *Numerical Models of the Electrolyte Filling Process of Lithium-Ion Batteries to Accelerate and Improve the Process and Cell Design*. Batteries 2022, 8, 159. https://doi.org/10.3390/batteries8100159

[24] F. Degen & O. Krätzig. 2024. *Future in Battery Production: Benchmarking Novel Production Technologies*. IEEE Transactions on Engineering Management, 71: 1038-1056.

[25] IHK Koblenz. 2025. *Neues Batteriegesetz in Deutschland (Batt-EU-AnpG)*. https://www.ihk.de/koblenz/unternehmensservice/umwelt-und-energie/aktuelles-und-termine/aktuelles/neues-batteriegesetz-in-deutschland-6745074

[26] Deutscher Bundestag. 2025. *Batterierecht an EU-Vorgaben angepasst*. Umweltausschuss. https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2025/kw36-pa-umwelt-1104566