



Umfeldbericht zu  
Natrium-Ionen-Batterien 2023:  
Status Quo und Perspektiven entlang  
einer zukünftigen Wertschöpfungskette

---

September 2023

Umfeldbericht zu  
Natrium-Ionen-Batterien 2023:  
Status Quo und Perspektiven  
entlang einer zukünftigen  
Wertschöpfungskette

---

# Inhalt

---

<b>1. Executive Summary</b> .....	<b>2</b>
<b>2. Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1. Patent- und Publikationsanalyse</b> .....	<b>9</b>
2.1.1. Patentanalyse .....	9
2.1.2. Publikationsanalyse .....	10
2.1.3. Europäische Forschungsakteure und Forschungsschwerpunkte .....	12
<b>2.2. Die Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB</b> .....	<b>14</b>
<b>3. Rohstoffgewinnung und Materialherstellung</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1. Innovationen und aktuelle Entwicklungen</b> .....	<b>18</b>
3.1.1. Kathodenmaterialien .....	18
3.1.2. Anodenmaterialien .....	20
<b>3.2. (F&amp;E-)Herausforderungen</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3. Übersicht der Forschungs- und Industrieakteure</b> .....	<b>22</b>
<b>4. Zellsysteme und Produktion</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1. Innovationen und aktuelle Entwicklungen</b> .....	<b>26</b>
<b>4.2. (F&amp;E-)Herausforderungen</b> .....	<b>28</b>
<b>4.3. Übersicht der Forschungs- und Industrieakteure</b> .....	<b>30</b>
<b>5. Anwendungen und Integrationskonzepte</b> .....	<b>33</b>
<b>5.1. Roadmaps und Ziele</b> .....	<b>34</b>
<b>5.2. (F&amp;E-)Herausforderungen</b> .....	<b>38</b>
<b>5.3. Übersicht der Forschungs- und Industrieakteure</b> .....	<b>38</b>
<b>6. Innovationspfade an der Fraunhofer FFB</b> .....	<b>39</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>43</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>47</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>52</b>
<b>Impressum</b> .....	<b>53</b>

# Executive Summary



# 1. Executive Summary

---

Natrium-Ionen-Batterien (NIB oder sodium-ion batteries, SIB) sind das große Trendthema des letzten Jahres in der Batterieindustrie. Kaum eine Technologie hat in so kurzer Zeit ein vergleichbar großes Echo in der Medienlandschaft erfahren und wurde annähernd so eifrig durch neue Ankündigungen aus der Industrie begleitet. Während Trendthemen in der Batterieindustrie keine Seltenheit sind und einige so schnell wieder verschwinden, wie sie auftauchen, wird anhand der fortschreitenden Konkretisierung von Forschung, Produktion und Anwendung deutlich: SIB sind gekommen, um zu bleiben.

Der "Umfeldbericht zu Natrium-Ionen-Batterien 2023: Status Quo und Perspektiven entlang einer zukünftigen Wertschöpfungskette" widmet sich voll diesem Thema und untersucht die technologischen Eigenschaften der SIB sowie die Aktivitäten in Forschung und Industrie von der Materialherstellung bis zur Zellproduktion und der Entstehung von Anwendungsmärkten.

Als Benchmark für die SIB dient in vielen Fällen aufgrund ihrer technologischen Ähnlichkeit die Lithium-Ionen-Batterie (LIB). Während diese in einer technischen Betrachtung der SIB oftmals überlegen ist, besticht die Natrium-Variante in Aspekten, die in den letzten Jahren immer wichtiger geworden sind: Lieferkettenresilienz und Nachhaltigkeit. Die Rohstoffsituation für Natrium kann aufgrund der vielzähligen und global verteilten Vorkommen als deutlich unkritischer im Vergleich zu Lithium angesehen werden. Die Konzentration von Natrium sowohl in flüssigen Quellen, nicht zuletzt dem Meer, als auch in mineralischer Form, zum Beispiel Steinsalz, ist deutlich höher als für Lithium, was den Gewinnungsprozess vereinfacht und den damit verbundenen ökologischen Fußabdruck reduziert. Gleichzeitig wurden auch Aktivmaterialien entwickelt, welche ebenfalls durch einen als im Wesentlichen unkritischen Rohstoffbedarf bestechen. Im Ergebnis präsentiert sich eine Batterietechnologie mit dem Potenzial zur Verminderung von Rohstoffabhängigkeiten und dem Versprechen niedriger Kosten. Die in der Studie durchgeführte Detailbetrachtung zeigt jedoch, dass bis zur Marktverfügbarkeit von SIB noch einige F&E-Herausforderungen bewältigt werden müssen.

Auch erscheint die Perspektive einer hohen technologischen Souveränität für europäische Akteure, wie sie der gute Zugang zu wichtigen Rohstoffen erhoffen lassen würde, bereits im heutigen frühen Stadium der Kommerzialisierung durch eine asiatische Dominanz bedroht.

## Forschung und Entwicklung vom Material bis zur Zelle

Im Einzelnen stellt sich ein im Vergleich zu LIB großer Spielraum möglicher Kathodenaktivmaterialien in den Klassen "Schichtoxide", "polyanionische Materialien" und "Preußisch-Blau-Analoga" dar. Viele der Materialien besitzen vielversprechende technische Eigenschaften wie eine hohe Zellspannung, gute ionische Leitfähigkeit oder Speicherkapazität. Das eine Material, welches alle der erwünschten Eigenschaften auf sich vereinen könnte, existiert bislang jedoch nicht. Häufig besteht noch ein deutliches Optimierungspotenzial bei der Zyklentfestigkeit und Stabilität. Ebenfalls erfordern gerade die Materialien, welche eine hohe und mit LIB-Materialien vergleichbare Kapazität aufweisen, wiederum Ausgangsstoffe, z.B. auf Nickel-, Kobalt- oder Vanadiumbasis, die nicht als unkritisch eingestuft werden können. Das große Feld möglicher Kathodenmaterialien eröffnet eine Vielzahl an Ansätzen zur Lösung dieser Herausforderungen, verdeutlicht aber gleichzeitig den hohen Aufwand bei der Suche, Selektion und Optimierung von Materialien. Dies betrifft ebenfalls SIB-Anoden. Zwar steht hier mit Hard Carbons auch eine kohlenstoffbasierte Materialklasse zur Verfügung, ausgerechnet das in LIB bestens etablierte Graphit ist für SIB aufgrund intrinsischer Eigenschaften des Natrium-Ions aber nicht geeignet.

Die genannten Herausforderungen bei den Materialien und die damit verbundenen offenen Technologieentscheidungen setzen sich auf die Zellebene fort. Ein großer F&E-Bedarf besteht für die Untersuchung von Vollzellkonzepten, etwa zur Optimierung der Grenzflächenchemie zwischen Aktivmaterialien und Elektrolyt oder dem Elektrodenbalancing

zur Erreichung einer hohen Sicherheit und Langzeitstabilität. Die Entwicklung von Material- und Zellkonzepten wird auch Auswirkungen auf die Produktionsinfrastruktur haben. Zwar scheint die Annahme einer prinzipiellen "drop-in"-Fähigkeit der SIB gegenüber der LIB nach wie vor berechtigt, im Einzelnen können aber Faktoren wie z.B. die Feuchteempfindlichkeit von Materialien deutliche Auswirkungen auf die Anlagentechnik und auf kostenintensive Aspekte wie die Atmosphärenkonditionierung haben. Schließlich müssen die Eigenschaften der Zelle, z.B. thermisches Verhalten, Sicherheit und Spannungs-kurve auch durch ein entsprechendes Design der Anwendungen und des Managementsystems berücksichtigt werden, also Anpassungen von der LIB zur SIB, welche neue F&E-Fragen aufwerfen.

### Eine dynamische Industrie und hohe Erwartungen

Die im ganzheitlichen Blick der Studie identifizierten Forschungsfragen zeichnen aktuell eher das Bild mehrerer sich parallel entwickelnder Technologiestränge. Verschiedene neue und auch bereits aus der LIB-Produktion bekannte industrielle Akteure haben sich dennoch bereits auf eine Technologie festgelegt, stellen Prototypen her oder sind schon in die (Massen-)produktion von SIB eingestiegen. Ob von einem SIB-Markt in diesem Jahr schon geredet werden kann, ist noch offen. Bis zum Jahr 2030 belaufen sich die global angekündigten Produktionskapazitäten für SIB-Zellen jedoch bereits auf 75 GWh. Diese hauptsächlich von Zellherstellern gemachten Angaben lassen auf eine schnelle Giga-Skalierung schließen. Damit diese erfolgreich ist, muss jedoch auch die vorgelagerte Lieferkette aufgebaut werden. Dies betrifft das Refinement von Natrium-Verbindungen bis zur batterietauglichen Qualität, aber auch in großem Maße die Skalierung der Aktivmaterialproduktion. Bislang wird diese meistens noch von den Zellherstellern selbst betrieben. Für den Einstieg in eine tatsächliche Giga-Fertigung werden jedoch auch die großen Materialproduzenten in die Technologie einsteigen müssen.

Gleichzeitig stellt sich auch die Frage nach den Anwendungsmärkten. Im Rahmen der Studie konnten nur wenige Prototypanwendungen im stationären Bereich oder in der Elektromobilität identifiziert werden. Einige Akteure haben zwar bereits die Einführung in Serienfahrzeugen angekündigt, von einer zeitnahen Adaption von SIB in der Fläche kann aber nicht zuletzt in Anbetracht der langen Qualifizierungszeiten in der Automobilindustrie nicht ausgegangen werden. Da SIB wahrscheinlich auch mittelfristig nicht an die Leistungsmerkmale von LIB heranreichen werden, dürfte die Bewertung in den einzelnen Anwendungssegmenten höchst individuell ausfallen. Eine hohe Passfähigkeit der SIB wird für verschiedene stationäre Anwendungen, Motorräder und Roller sowie kleine Autos erwartet. Inwiefern die Technologie im heute größten Marktsegment für Batterien, den großen Oberklassefahrzeugen und SUVs

mit hoher Reichweite, eingesetzt werden kann, bleibt offen. Entsprechend ist die Bandbreite der in der Studie analysierten Marktprognosen für SIB sehr groß. Analysten gehen von einem Marktvolumen von unter 50 GWh bis hin zu 600 GWh in 2030 aus. Der obere Bereich dieser Spanne würde nicht nur eine hohe Abnahmebereitschaft in der Breite der heutigen LIB-Anwendungen, sondern auch die extrem schnelle Lösung aller mit der Produktionsskalierung verbundenen Herausforderungen erfordern. Auch im Vergleich zu historischen Wachstumsraten der LIB-Industrie erscheint dies sehr optimistisch.

An der Giga-Skala des SIB-Marktes selbst scheint indes kaum Zweifel zu bestehen. Die in der Studie durchgeführte Analyse internationaler Forschungs- und Industrieaktivitäten wirft jedoch die Frage auf, in wie weit dieser Markt ein europäischer sein wird. In Bezug auf Forschung ist Deutschland innerhalb Europas ein echtes Schwergewicht, während auch die Nachbarländer Frankreich und Großbritannien ausgeprägte Aktivitäten zeigen. Bestrebungen zu einer Technologiekommerzialisierung sind allerdings kaum erkennbar. Hier tauchen europäische genau wie US-amerikanische Projekte nur sehr punktuell auf der globalen Landkarte auf. Der überwiegende Teil, ob nun ausgedrückt über Patentanmeldungen oder Industrieankündigungen, spielt sich in Asien und dort insbesondere in China ab. Dies ist gerade deswegen als kritisch zu bewerten, da China den globalen Markt auch in der heute kosteneffizientesten Batterietechnologie, den Lithium-Eisen-Phosphat Batterien, dominiert. Setzt sich der aktuelle Trend bei SIB weiter fort, so besteht die Gefahr, dass Europa auch bei dieser neuen und potenziell günstig und nachhaltig zu produzierenden Batterie in ein Abhängigkeitsverhältnis gerät. Entschieden ist das Rennen um die SIB jedoch noch nicht. Gerade der in der Studie skizzierte große Parameterraum im Bereich der Material- und Zellentwicklung bietet nach wie vor eine hohe Chance zur eigenen Technologieentwicklung und schließlich auch Kommerzialisierung.

### Innovationspfade an der Fraunhofer FFB

Die Forschungsfertigung Batteriezelle FFB in Münster ist eine Einrichtung der Fraunhofer Gesellschaft, die mit der Absicht ins Leben gerufen wurde, die Industrie bei der Lösung von F&E-Herausforderungen an der Schwelle zur industriellen Technologienutzung zu unterstützen. Um dies leisten zu können, muss die Fraunhofer FFB selbst über eine industrielle Batteriezellfertigung verfügen, welche die Prozessart und den Durchsatz einer Giga-Fertigung abbildet. Im Unterschied zu einer Zellfabrik wird die Fraunhofer FFB jedoch über einen, diesem industriellen Durchsatz vorgelagerten, Skalierungsmechanismus verfügen. Aufgeteilt auf die »FFB PreFab« und die »FFB Fab« werden Entwicklungsmöglichkeiten im Labor-, Pilot- und Fertigungsmaßstab zur Verfügung stehen, um Technologien je nach Reifegrad und Fragestellung auf der passenden Skala

untersuchen und weiterentwickeln zu können. Zusätzlich werden durch die Zurverfügungstellung von digitalen Zwillingen F&E-Möglichkeiten geschaffen, die ohne den Einsatz physischer Infrastruktur anwendbar sind. Dies soll die Entwicklungskosten für die Industrie deutlich reduzieren und durch die Bündelung von Batteriekompetenzen an einem Standort Entwicklungszeiten auch deutlich beschleunigen.

Auch für die Fraunhofer FFB ist die LIB der Benchmark und viele der an die Produktionsinfrastruktur der Fraunhofer FFB gestellten Anforderungen leiten sich von dieser Technologie und antizipierten Weiterentwicklungen ab. Bereits heute bereitet die Fraunhofer FFB jedoch auch die Untersuchung und schließlich Skalierung von SIB vor. Beide Prozesse: Aufbau der Fertigung für eine erste Generation LIB und Klärung von mit der Skalierung verbundenen Herausforderungen bei Qualität und Produktionseffizienz sowie die Vorbereitung für SIB müssen parallel erfolgen. Zu diesem Zweck implementiert die Fraunhofer FFB aktuell einen "Fast-track" für Natrium-Ionen-Batterien bei dem drei Schwerpunkte gesetzt werden:

(1) Ein Fokus auf Nachhaltigkeit, welcher sich durch die Nutzung rohstoffunkritischer Materialien und die Entwicklung nachhaltiger Prozesse konkretisiert, (2) die Entwicklung von Hochenergie-SIB mit einem Fokus auf Automobilanwendungen und (3) die Entwicklung von Hochleistungs-SIB mit einem Fokus auf stationäre und industrielle Anwendungen, bei denen die SIB ihre Vorteile gegenüber der LIB im Vergleich zu anderen Anwendungen ggf. noch früher wird ausspielen können.

Zur Erreichung dieser Ziele stehen mit der Fraunhofer FFB unterschiedliche Innovationspfade zur Verfügung, so etwa die bilaterale Auftragsforschung für die Industrie oder auch die Teilnahme an Fördermaßnahmen im Rahmen der Batterieforschung oder industriellen Skalierung in nationalen und europäischen Programmen. Wichtigstes Kernelement dieser Aktivitäten wird unabhängig von der Technologie, LIB oder SIB, die industrielle Verwertung von Forschungsergebnissen darstellen, sodass die Infrastruktur auch für eine entstehende europäische SIB-Industrie als Beschleuniger und Kompetenzpartner zur Verfügung steht.

# Einleitung



## 2. Einleitung

---

Die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien (LIB) steigt rasant, vor allem aufgrund der Elektrifizierung des Individualverkehrs. Es wird geschätzt, dass im Jahr 2030 zwischen 2.500 und 3.500 GWh pro Jahr an zusätzlicher Batteriespeicherkapazität benötigt werden. Im Jahr 2040 soll der jährliche Bedarf sogar auf 6.000 GWh pro Jahr ansteigen. [1] Um diesen enormen Bedarf an Batteriespeicherkapazität bzw. Batteriezellen decken zu können, bedarf es nicht nur einer Vielzahl von Batteriezellfabriken, sondern auch einer gesicherten, wirtschaftlichen und nachhaltigen Rohstoffversorgung. Für die heute üblichen Lithium-Ionen-Batterien sind dies insbesondere Nickel, Mangan, Kobalt, Lithium, Graphit, Aluminium und Kupfer. Insbesondere Nickel, Kobalt und Lithium sind nicht nur teuer, sondern haben auch den Nachteil, dass sie in Europa nicht oder nicht ausreichend verfügbar sind. Damit sind wichtige Industriesektoren in Europa von knappen Ressourcen aus China, Afrika, Südamerika, Australien und anderen Regionen abhängig. Diese Abhängigkeit vom Systemwettbewerb ist wirtschaftspolitisch kritisch. Aus diesem Grund wird derzeit intensiv diskutiert und analysiert, welche alternativen Batteriechemien neben Li-NMC (Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid) ebenfalls für Elektrofahrzeuge (electric vehicles, EVs) eingesetzt werden können, jedoch mit Rohstoffen, die weltweit einfacher und kostengünstiger verfügbar sind. In diesem Zusammenhang wird u.a. die Li-LFP (Lithium-Eisen-Phosphat) Batteriechemie viel diskutiert, die ohne Nickel, Mangan und Kobalt auskommt, dafür aber Eisen und Phosphor verwendet, die weltweit gut verfügbar sind. Allerdings benötigen Li-LFP-Batterien Lithium, das derzeit vor allem in Chile, Australien und China abgebaut wird. Eine kumulierte Abhängigkeit von knappen Rohstoffen kann durch Li-LFP-Batterien also reduziert, aber nicht ausgeschlossen werden. Eine Abhängigkeit von Systemkonkurrenten wie z.B. China bleibt bestehen.

Um die Abhängigkeit der entstehenden europäischen Batteriezellenindustrie von seltenen Rohstoffen zu verringern, wird seit einiger Zeit die Entwicklung und Anwendung der Natrium-Ionen-Batterie (NIB bzw. sodium-ion batteries, SIB) vor allem in den Medien intensiv diskutiert. Es werden ausschließlich Rohstoffe verwendet, die in Europa gut und kostengünstig

verfügbar sind, so das Versprechen. So ist Natrium beispielsweise als NaCl (Kochsalz) im Meer mehr als ausreichend vorhanden. Gleichzeitig soll die bestehende Produktionsinfrastruktur für LIB-Zellen ohne größere Modifikationen genutzt werden können. Sind Natrium-Ionen-Batterien also die europäischen Batteriezellen der nächsten Generation?

Um diese Frage beantworten zu können, müssen neben der geopolitischen Beurteilung der Technologie und der Batterieindustrie auch noch zahlreiche Herausforderungen in der Forschung und Entwicklung gelöst werden. Hinter dem Begriff »Natrium-Ionen-Batterie« verbirgt sich nämlich eine Vielzahl an Material- und Technologievarianten mit ebenso unterschiedlichen Eigenschaften bei der Produktion, Leistungsfähigkeit und natürlich auch dem Rohstoffbedarf. Noch ist nicht abzusehen, welche dieser Varianten sich in der Industrie durchsetzen wird oder ob es, vergleichbar zu den Li-LFP und Li-NMC Ausprägungen der LIB, mehrere Natrium-Ionen Technologien geben wird, die ggf. anwendungsspezifisch oder auch abhängig von regionalen Strategien eingesetzt werden. Der Forschungs- und Entwicklungsaufwand bleibt nicht zuletzt aufgrund dieser Parallelität von Technologieansätzen hoch.

Aufgrund der vergleichbaren Leistungs- und Fertigungseigenschaften besitzt die LIB derweil sowohl die Rolle als Wegbereiter für die SIB, ist aber gleichzeitig auch deren härtester Konkurrent. Entscheidend für den Aufbau einer SIB-Industrie wird am Ende also nicht nur die gute Verfügbarkeit von Natrium und anderen Komponenten sein, sondern auch wie sich die Preise und Liefersituation für LIB-Materialien entwickeln. Auf dem Papier besitzt die SIB gerade im Rückblick auf die Volatilität von Materialpreisen der letzten 2 Jahren klare Kostenvorteile. Was die Kommerzialisierung und Skalierung angeht, so hat die LIB jedoch einen Vorsprung von 30 Jahren. Selbst unter Annahme einer hohen Kompatibilität von LIB-Produktionsprozessen zu SIB wird es dauern, bis dieser Vorsprung aufgeholt ist. Anfang des letzten Jahrzehnts hatte sich die globale Produktionskapazität für LIB angefangen bei weniger als 10 GWh/a jedes Jahr in etwa verdoppelt. Im Jahr 2020 waren kumulierte Fertigungskapazitäten von

mindestens 500 GWh/a aufgebaut oder kurz davor in Betrieb genommen zu werden. Setzt man eine ähnlich steile Lernkurve für Natrium-Ionen-Batterien an, so könnten bis 2030 ebenfalls mehrere 100 GWh/a an Produktionskapazität aufgebaut sein. Für den gleichen Zeitraum wurden jedoch auch massive Investitionen in den weiteren Aufbau der LIB-Produktionen angekündigt, die kumuliert eine Kapazität von mehr als 10 TWh ergeben würden. Was die Erreichung von Skaleneffekten angeht, wird die Natrium-Ionen-Batterie also weiterhin der LIB hinterherlaufen.

Bereits im letzten Jahr entstand im Rahmen der "FoFeBat"-Projektförderung [2] durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF der „Umfeldbericht zum europäischen Innovationssystem Batterie 2022“ [3], welcher die aktuelle Situation und Herausforderungen der europäischen LIB-Industrie beleuchtete. In dem hier vorliegenden "Umfeldbericht zu Natrium-Ionen-Batterien 2023: Status Quo und Perspektiven entlang einer zukünftigen Wertschöpfungskette" der Fraunhofer Gesellschaft wird nun analysiert, welches Potenzial SIB-Zellen sowohl in technologischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht haben. Es wird aber auch diskutiert, wo mögliche Nachteile liegen und welche Herausforderungen zu meistern sind. Abschließend wird beleuchtet, welchen Beitrag die europäische F&E- und Innovationslandschaft leisten kann, um Innovationstreiber und damit wirtschaftlich und strategisch unabhängig zu sein.

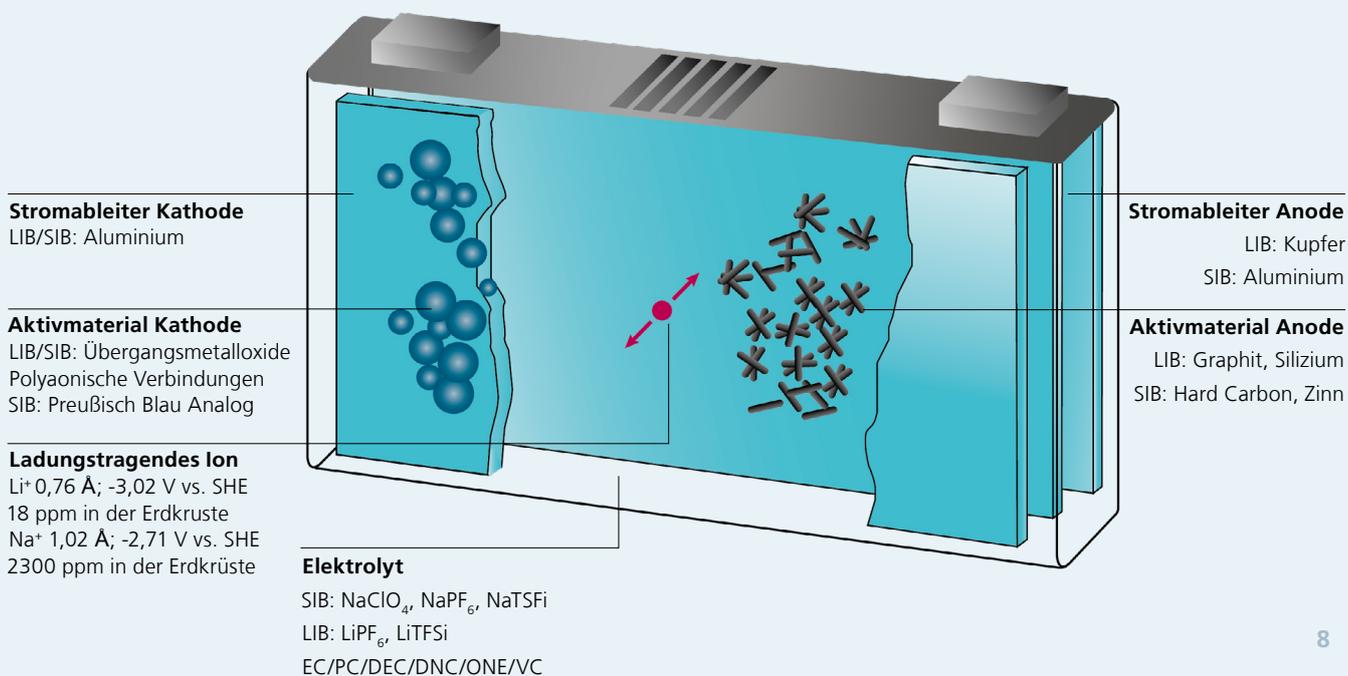
Die durch das BMBF und das Land Nordrhein-Westfalen geförderte Fraunhofer Forschungsfertigung Batterie zelle FFB in Münster zielt neben ihrem Fokus auf LIB auch darauf ab, einen Transfer von Forschungsergebnissen zu SIB in eine

industriell relevante Produktionsskala zu erreichen. Die Fraunhofer FFB wird mit dem Ziel einer hohen Anschlussfähigkeit an Ergebnisse aus der Forschung mit niedrigen bis mittleren TRL sowie an die industrielle Übertragbarkeit mit höchsten TRL aufgebaut. Übergreifende Ziele sind die Skalierung neuer Prozess- und Zelltechnologien und die Steigerung von Qualität, Senkung von Kosten und Verbesserung des ökologischen Fußabdrucks. Insbesondere für ihre deutschen und europäischen Industriepartner will die Fraunhofer FFB damit die Dauer von Innovationszyklen deutlich verkürzen. Gerade für neue Technologien wie die SIB kann die Fraunhofer FFB ein entscheidendes Bindeglied zwischen Forschung (z.B. Aktivmaterialien) und Umsetzung in der Zellproduktion in Europa sein.

Der vorliegende Bericht ist wie folgt gegliedert:

- Kapitel 2 gibt einen Überblick über Forschungsaktivitäten und damit verbundene Patente und Publikationen in Europa und weltweit und stellt die Aufgaben und Ausrichtung der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie zelle FFB vor.
- In den Kapiteln 3, 4 und 5 werden die Ausprägung der Branchengruppen (1) Rohstoffförderung und Materialentwicklung bzw. -herstellung; (2) Zellentwicklung und -herstellung und (3) Natrium-Ionen-Batterieanwendungen diskutiert und aktuelle Entwicklungen und (F&E-)Herausforderungen benannt.
- Kapitel 6 skizziert die technische Infrastruktur der Fraunhofer FFB, mögliche Projektformate zwischen Fraunhofer FFB und Industrie im physischen und digitalen Bereich und beispielhafte Innovationspfade für Natrium-Ionen-Batterien.

**Abbildung 1: Struktur und Zellkomponenten von Lithium-Ionen (LIB) und Natrium-Ionen-Batterien (SIB).**



## 2.1. Patent- und Publikationsanalyse

Patente und Publikationen stellen wichtige Indikatoren für die Analyse gerade neuer Technologien dar, da sie häufig der Kommerzialisierung vorangehen. Zu SIB finden schon seit vielen Jahren Forschungsaktivitäten in Europa aber auch global statt. Die steigende Bedeutung der Technologie lässt sich gut am Zuwachs der Aktivitäten internationaler Forschungs- und Industrieakteure sowohl beim Schutz von IP-Rechten als auch bei der Publikation von Forschungsergebnissen feststellen.

### 2.1.1. Patentanalyse

Zur Erfassung der Patentaktivitäten wurde eine Analyse von nationalen und transnationalen Patentanmeldungen, welche den Begriff Natrium-Ion oder verwandte bzw. übersetzte Begriffe enthalten, sowie den Patentklassifizierungen H01M4 (Elektroden) oder H01M10 (Sekundärbatterien) im Format der „Cooperative Patent Classification“ zugeordnet sind. Die Analysen wurden mit der Datenbank STN Derwent World Patents Index WPI durchgeführt. Bei den Anmeldungen wurde zwischen lediglich bei nationalen Patentbüros angemeldeten und solchen, die bei den internationalen Patentorganisationen World Intellectual Property Organization (WIPO) oder European Patent Office (EPO) angemeldet wurden, unterschieden. Diese Unterscheidung erlaubt eine erste Einschätzung des Werts und der Marktgröße, welche die anmeldenden Entitäten dem Patent beimessen und berücksichtigt gleichzeitig die in unterschiedlichen Ländern unterschiedlich hohe Schutzwirkung eines Patents. So ist beispielsweise bei dem Wortlaut »Befestigung mit einer Schraube« in einem chinesischen Patent nur eine Schraube, nicht aber ein Nagel abgedeckt. In Europa wäre

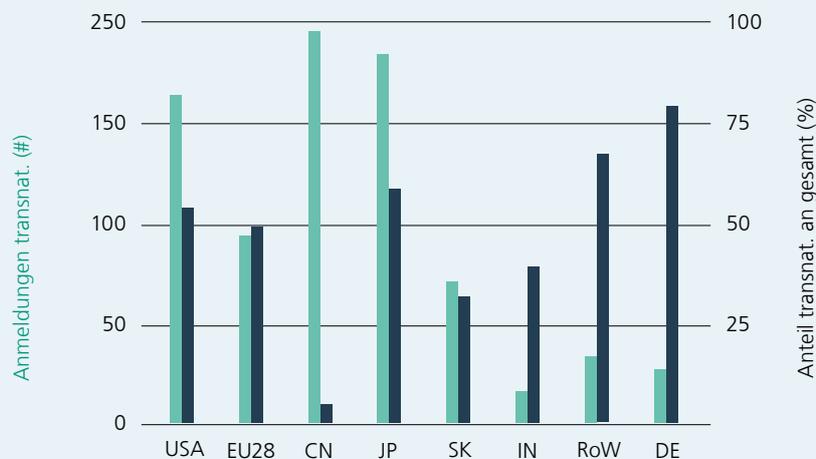
das eingeschlossen, da durch den Nagel eine ähnliche Funktion erreicht wird. Als Konsequenz kann die Zahl der Patente bezogen auf die industrielle Forschung in China bei gleicher Schutzwirkung deutlich höher ausfallen als in Europa. Der Wert eines einzelnen Patentes ist im Durchschnitt niedriger. Das japanische System liegt zwischen dem chinesischen und europäischen. Der Sinn transnationaler Patentanmeldung in der Statistik liegt darin, den Wert pro Patent zwischen Ländern anzugleichen. Abb. 2 zeigt einen beinahe kontinuierlichen Anstieg der transnationalen Patente seit dem Betrachtungsbeginn in 2010 mit schwankender Dynamik über die Jahre (Prioritätsdatum). Gegenüber dem Jahr 2019 ist die Zahl der Anmeldungen in 2020 leicht zurückgegangen. Eine abschließende Aussage über das Jahr 2021 lässt sich aufgrund des zeitlichen Abstands zwischen Patentanmeldung und –veröffentlichung von mehreren Jahren noch nicht geben. Vorläufige Zahlen zum Prioritätsjahr 2021 deuten jedoch auf eine Erholung der Dynamik und Anmeldung von mehr als 400 transnationalen Patenten hin.

Auf internationaler Ebene treten besonders vier Länder bzw. Regionen bei der Anmeldung transnationaler Patente hervor (siehe Abb. 3): Die USA, EU28 (EU27 und Großbritannien), China und Japan. Zusammengenommen stammen in den Jahren 2018 bis 2020 mehr als 80 % der Anmeldungen zu Natrium-Ionen-Batterien von Erfindern aus diesen Regionen. Der Anteil an Anmeldungen unter Beteiligung deutscher Erfinder lag bei etwas über 4 %, die Länder der EU28 kamen zusammen auf mehr als 19 %.

**Abbildung 2: Anzahl transnationaler Patentanmeldungen zu Natrium-Ionen-Batterien nach Prioritätsjahr.**



**Abbildung 3: Anzahl transnationaler Patentanmeldungen zu Natrium-Ionen-Batterien 2018-2020 nach Herkunft der in den Patenten genannten Erfindern (linke Achse) und der jeweilige Anteil transnationaler Anmeldungen an der Gesamtzahl auch nationaler Anmeldungen (rechte Achse).**



Während die Einschränkung auf transnationale Anmeldungen ein recht gleich verteiltes Bild unter den großen Batteriestandorten zeichnet, offenbart die Analyse auch nationaler Anmeldungen deutliche Unterschiede in der Patentierungsstrategie der unterschiedlichen Regionen. Anmeldungen mit Beteiligung deutscher bzw. europäischer Erfinder wurden in 70 bis 80 % der Fälle auch an einem der beiden transnationalen Patentbüros durchgeführt. Dieser hohe Anteil ist auch Ergebnis der Berücksichtigung des EPO bei der Analyse transnationaler Anmeldungen, mit naturgemäß starkem Fokus auf europäische Akteure. Auch Anmeldungen mit Nennung von Erfindern aus den USA oder Japan wurden in 60 % der Fälle auch an den transnationalen Patentbüros durchgeführt. Ein gänzlich anderes Bild zeigt China. Berücksichtigt man in der Analyse auch nationale Anmeldungen, so dominieren chinesische Erfinder mit einer Anzahl von 5.300 Anmeldungen in den Jahren 2018 bis 2020 international das Bild, jedoch wurden nur knapp 5 % dieser Patente auch an einem der transnationalen Patentbüros angemeldet.

Die große Zahl an Anmeldungen zeigt zum einen, dass die IP-Strategie vieler chinesischer Akteure den Schutz von IP in der Breite vorsieht, anstatt z.B. wenige, dafür ggf. spezifischere Schlüsselpatente anzumelden. Das ist letztlich eine Folge des chinesischen Patentsystems, das sich deutlich von dem europäischen oder amerikanischen unterscheidet. Insbesondere ist der Schutzzumfang einer Patentanmeldung gering, so dass ein breiterer Schutz nur durch mehrere Patentanmeldungen erreicht werden kann.

Zum anderen offenbart die Beschränkung auf nationale Anmeldungen auch die Relevanz, welche unterschiedlichen Märkten für die Nutzung oder für die Lizenzierung der Erfindungen beigemessen wird. Chinesische Akteure erwarten aufgrund der bestehenden Dominanz Chinas bei der Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien und Materialien ggf. auch für

Natrium-Ionen-Batterien eine vorwiegende Nutzung der IP im eigenen Land. In gewissem, wenn auch schwächerem Maße trifft dies auch auf Süd-Korea zu. Nur etwa 30 % der Anmeldungen mit Nennung koreanischer Erfinder sind nach der hier verwendeten Definition transnational. Als global zweitgrößter Produktionsstandort für Lithium-Ionen-Batterien könnten koreanische Akteure ebenfalls davon ausgehen, ihre Erfindungen vorwiegend für die Nutzung im eigenen Land schützen zu müssen.

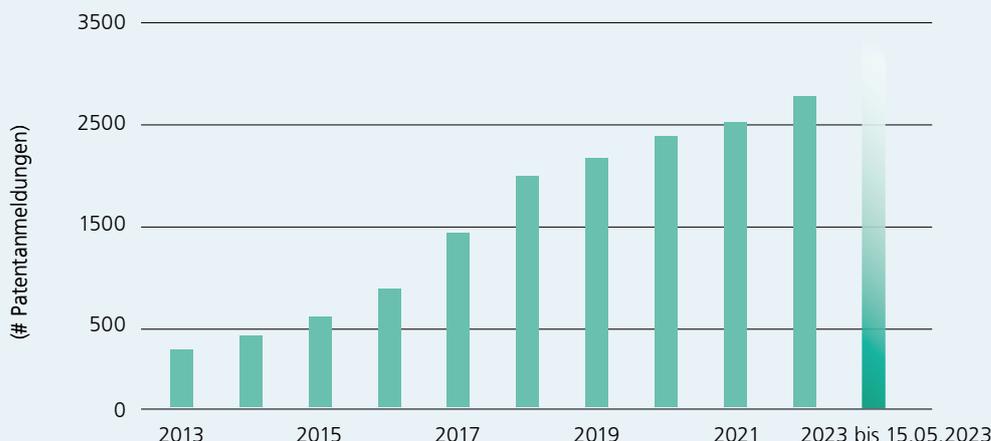
### 2.1.2. Publikationsanalyse

Zur Erfassung der Publikationsaktivitäten zu Natrium-Ionen-Batterien wurde eine einfache Analyse über die Datenbank SCOPUS [4] durchgeführt. Dazu wurden peer-reviewed Publikationen mit dem Begriff »sodium ion battery« in Titel oder Abstract ausgewertet. Seit 2012 wurden über 16.000 entsprechende Forschungsartikel veröffentlicht. Zu »lithium ion batteries« waren es im selben Zeitraum über 86.000 Artikel.

Wie in Abb. 4 erkennbar, ist die Zahl der SIB-Publikationen pro Jahr in etwa linear angestiegen. Im Jahr 2022 betrug die Zahl der neuen Publikationen etwa 2.700. Die Dynamik der Publikationsaktivitäten ist damit in etwa vergleichbar zu LIB. Auch hier erscheint die Zunahme der Publikationsaktivität in erster Näherung etwa linear über die letzten 10 Jahre erfolgt zu sein.

Der regionenspezifische Beitrag zur globalen Publikationsaktivität wurde durch eine Auswertung der jeweils an den Publikationen beteiligten Organisationen untersucht. Zu bedenken ist dabei, dass die internationale Kooperation in der Wissenschaft sehr hoch ist und es deshalb erhebliche Überschneidungen zwischen den Publikationen verschiedener nationaler Herkunft gibt. In den Ländern der EU27 sowie in Großbritannien, Norwegen und der Schweiz beheimatete Organisationen (im Folgenden als "EU+" oder Europa abgekürzt) waren in den letzten 3 Jahren (2020 bis 2022) jeweils an etwa 350

**Abbildung 4: Anzahl an Publikationen zu Natrium-Ionen-Batterien nach Erscheinungsjahr.**



Publikationen pro Jahr beteiligt, ohne, dass dabei ein Anstieg der Aktivitäten über diesen Zeitraum zu erkennen wäre.

Das globale Wachstum der letzten Jahre kommt insbesondere durch die Zunahme von Publikationen mit chinesischen oder auch indischen Koautoren zustande. Alle anderen untersuchten Länder und Regionen zeigen ein zu Europa vergleichbares stagnierendes Bild. Die Zahl der Publikationen mit US-amerikanischer oder Kanadischer Koautorenschaft hat im betrachteten Zeitraum sogar merklich abgenommen (siehe Abb. 5).

Unter den analysierten SIB-Publikationen erhöhte sich der Anteil der Artikel mit chinesischer Koautorenschaft somit von 50 % in 2020 auf 55 % in 2023. In den als EU+ zusammengefassten Ländern sank er im selben Zeitraum von über 10 % auf unter 10 % ab.

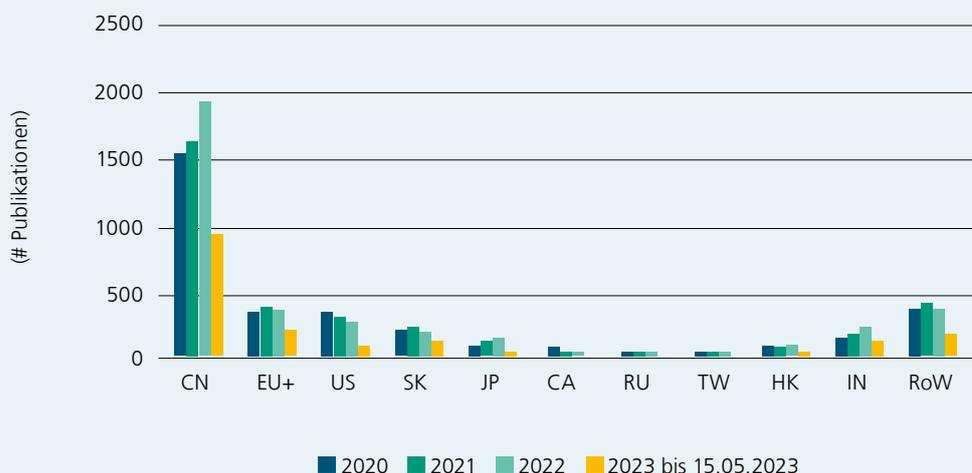
Es stellt sich die Frage, wie die hohen chinesischen Publikationsaktivitäten zu beurteilen sind. Denn die Chinesen liegen auch bei Patenten vorne, aber mit sehr geringem Abstand.

Hier spielt die sozialistische Tradition in China eine Rolle, bei der die Forschung für die Industrie von der Akademie der Wissenschaften übernommen wurde. Heute wird der größte Teil der industriellen Forschung zwar in Unternehmen durchgeführt, aber die Rolle der Akademie der Wissenschaft ist immer noch recht hoch. Von daher ist kein wirklicher Vergleich mit europäischen oder amerikanischen Publikationen möglich. Wichtig ist hier vor allem die Tendenz der Publikationen. Das steigende Niveau dürfte implizieren, dass es auch bei Patenten weitere Steigerungen geben wird.

### Internationale Kooperationen

Insgesamt handelt es sich bei Publikationen zu SIB um sehr internationale Forschungsarbeiten. Bei mehr als 60 % ihrer Veröffentlichungen aus den letzten dreieinhalb Jahren teilen sich europäische (EU+) Forschungseinrichtungen die Autorenschaft mit außereuropäischen Organisationen. Gemessen an der absoluten Anzahl gemeinsamer Publikationen scheinen

**Abbildung 5: Anzahl an Publikationen zu Natrium-Ionen-Batterien nach Herkunft der in den Publikationen genannten Organisationen für die Jahre 2020 bis 2023.**



China und die USA die wichtigsten Forschungspartner für europäische Akteure zu sein (siehe Abb. 6 a).

Betrachtet man die Publikationsaktivitäten jedoch aus Perspektive der mit Europa kooperierenden Länder, so sind europäische Koautoren z.B. lediglich auf knapp 6 % der chinesischen Veröffentlichungen zu finden (siehe Abb. 6 b). Eine deutlich größere Bedeutung als Forschungspartner scheint Europa für die USA, Kanada oder Taiwan zu haben. Hier wurden etwa 15 % aller SIB-Publikationen mit einer europäischen Koautorchaft veröffentlicht. Den höchsten Anteil koeuropäischer Publikationen an den eigenen Publikationen weist Russland mit 25 % auf.

Auch außerhalb Europas ist China international einer der wichtigsten Forschungspartner. Zwar sind über 60 % der chinesischen SIB-Publikationen der letzten dreieinhalb Jahre ohne jede Koautorenschaft mit ausländischen Partnern entstanden, aufgrund der hohen Gesamtzahl chinesischer Publikationen beträgt die Zahl gemeinsam mit internationalen Partnern entstandenen Veröffentlichungen dennoch stolze 2.300. Europa und die USA waren mit jeweils etwa 18 % Anteil an den internationalen Publikationen chinesischer Organisationen die wichtigsten Forschungspartner.

Die internationalen Kooperationen Chinas ohne europäische Beteiligung sind ebenfalls stark. Der Anteil gemeinsam mit chinesischen Organisationen publizierter US-amerikanischer, japanischer oder taiwanesischer Forschungspapiere liegt gemessen am jeweiligen Gesamtoutput dieser Länder zwischen 30 und 40%. Kanada sticht mit über 60 % nochmals deutlich hervor, wohingegen chinesische Akteure nur auf 5 bis 10 % der durch Indische oder Südkoreanische Organisationen veröffentlichten Papiere auftauchen.

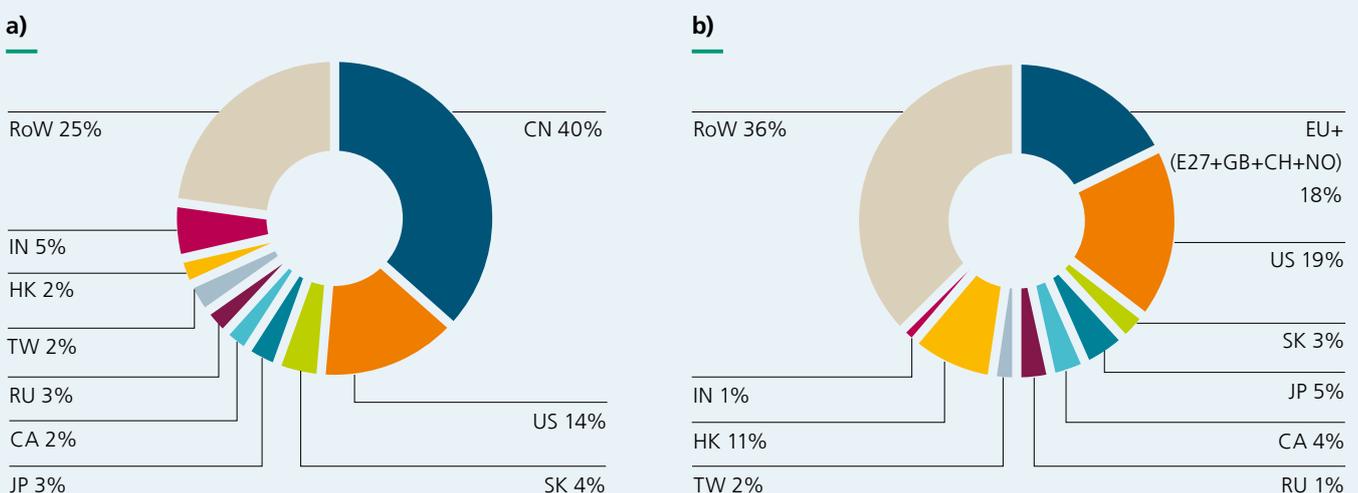
### 2.1.3. Europäische Forschungsakteure und Forschungsschwerpunkte

Die Analyse sowohl von Patenten als auch von Publikationen zeigt deutliche Schwerpunkte auch innerhalb Europas, was die Aktivitäten zu SIB angeht. So sind Patentanmeldungen mit Nennung europäischer Erfinder in den Prioritätsjahren 2018 bis 2020 verstärkt von französischen Forschungsorganisationen wie dem Centre national de la recherche scientifique (CNRS), dem Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), dem College France oder der Universität Sorbonne erfolgt. Bei den industriellen Akteuren war besonders Großbritannien stark. Hier wurden Patente durch die Unternehmen Dyson, Echion Technologies, Faradion und Oxis Energy angemeldet. Mit den Universitäten Edinburgh, Liverpool und Oxford sind ebenfalls Akteure aus der Forschung vertreten. Unter den deutschen Akteuren finden sich Anmeldungen durch das Karlsruher Institut für Technologie KIT und Bosch.

Inhaltlich befassen sich die von europäischen Unternehmen angemeldeten Patente mit der gesamten Bandbreite von Materialien, Zellkomponenten bis hin zum Batteriepack, wobei der Schwerpunkt klar im Bereich der Aktivmaterialien und Elektrolytkomponenten liegt. Interessanterweise werden nicht nur Technologien für Flüssigelektrolyt-basierte Zellen sondern auch für Feststoffbatterien adressiert.

Anders als bei den Patentanmeldungen gehören deutsche Forschungsorganisationen im europäischen Vergleich zu den Spitzenakteuren. Unter den Top 10 der am stärksten zu SIB publizierenden europäischen Organisationen finden sich gleich drei deutsche Akteure: das KIT, das Helmholtz-Institut Ulm (HIU) und das Forschungszentrum Jülich FJZ. Unter den Top 30 finden sich fünf weitere deutsche Forschungseinrichtungen. Außerhalb Deutschlands finden starke Publikationsaktivitäten

**Abbildung 6: Herkunft der gemeinsam mit europäischen Organisationen publizierenden internationalen Organisationen (links) und der gemeinsam mit chinesischen Organisationen publizierenden Organisationen (rechts).**



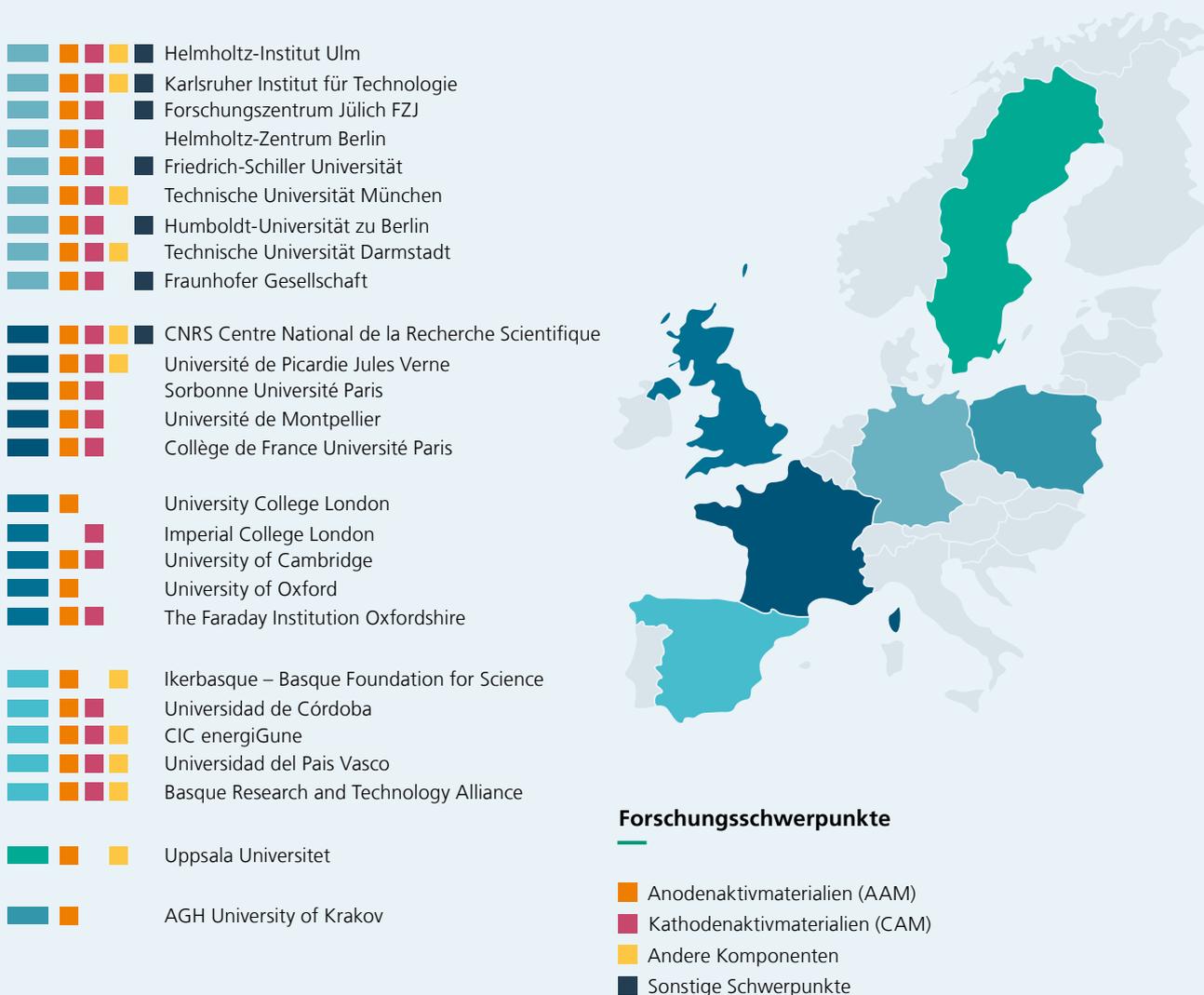
auch in Frankreich, z.B. durch das CNRS, Schweden, z.B. durch die Universität Uppsala, Spanien, z.B. durch CIC Energigune, und Großbritannien, z.B. durch das University College und das Imperial College London, statt.

Knapp 400 der relevantesten und durch die Top 30 der europäischen Organisationen publizierten Arbeiten wurden über deren Abstract inhaltlich analysiert. Jeweils etwa 25 % der Forschungsarbeiten behandeln die Herstellung und Untersuchung von Anoden oder Kathodenmaterialien. Weitere 18 % der Publikationen behandeln beide Materialgruppen. Insgesamt befassen sich somit mehr als zwei Drittel der Publikationen mit

den Aktivmaterialien für Natrium-Ionen-Batterien und stellen den klaren Schwerpunkt in der europäischen Forschung dar. Weitere etwa 18 % behandeln die Untersuchung anderer Zellkomponenten, hauptsächlich von Elektrolytmaterialien. Vollzellen wurden nur in 3 % der analysierten Publikationen gebaut und untersucht. Weitere Themen betreffen etwa die Kosten, Nachhaltigkeit oder Produktion von SIB.

Abb. 7 zeigt die Standorte der publikationsstärksten europäischen Forschungseinrichtungen zu SIB und weist zudem deren aus den Veröffentlichungen ermittelte Forschungsschwerpunkte aus.

**Abbildung 7: Herkunft der Top 30 zu SIB publizierenden europäischen Forschungseinrichtungen und Forschungsschwerpunkte.**



Die Abbildung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

## 2.2. Die Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB

Die Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) ist bestrebt, Innovationen für eine effiziente und nachhaltige Batteriezellproduktion zu entwickeln und zu skalieren. Ihr Hauptziel besteht darin, den Innovations- und Kommerzialisierungsprozess für aktuelle und zukünftige Zelltechnologien zu beschleunigen, um die Markteinführungszeit zu verkürzen. Dabei werden gemäß Abb. 8 verschiedene Technology Readiness Levels (TRL) berücksichtigt, angefangen von der angewandten Forschung bis hin zur industriellen Anwendung.

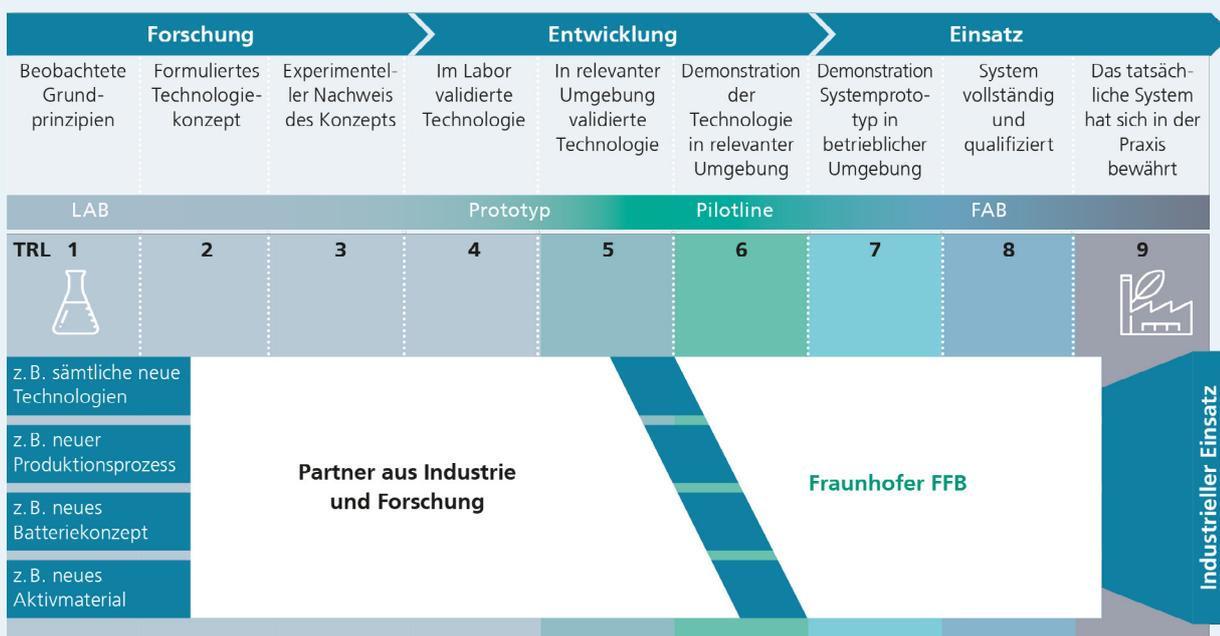
So wird beispielsweise im Rahmen von Experimenten die grundlegende Funktionsweise von Technologien untersucht und es werden erste Prototypen zur Validierung gebaut (bis TRL 6). Am anderen Ende des Innovations- und Kommerzialisierungsprozesses steht der industrielle Einsatz von Technologien beispielsweise in Gigafactories. Neben einer problemfrei einsetzbaren Technologie kommt es in der Batteriezellfertigung auf eine Integration der Technologie in einen verketteten Produktionsprozess an. So müssen zum Beispiel Material- und Personalflüsse bedacht, Maschinen im Wartungskonzept berücksichtigt und physische wie digitale Schnittstellen definiert werden. Die zu leistenden Entwicklungsarbeiten in diesen TRL-Stufen (>TRL 6) sind mit hohen Kosten verbunden, da nicht mehr vornehmlich Einzelprozesse betrachten werden, sondern für diese Entwicklungsschritte eine vollständige Prozesskette

zur Verfügung stehen muss. Zudem findet auf diesem Entwicklungsstand die Validierung von Prozessen und Technologien in der Regel mit einer kleinen bis mittleren Serie (einige hundert) an Prototypenzellen statt. In späteren Entwicklungsstadien steht der Erfahrungsgewinn im Betrieb einer großskaligen Fertigung von Batteriezellen im Vordergrund. Dies zeigt sich beispielsweise auch in den umfangreichen Aus- und Weiterbildungsprogrammen, die die Fraunhofer FFB anbietet.

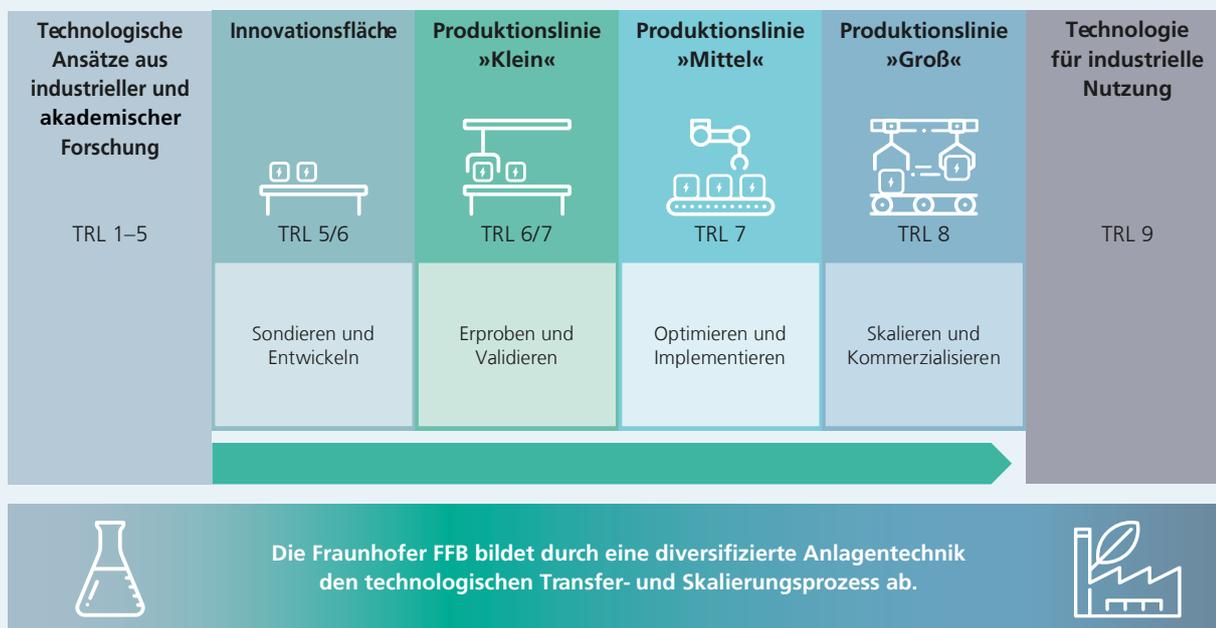
Weiterhin kommen während des Betriebs digitale Methoden zum Einsatz. So werden für das Gebäude, die Anlagen und die erzeugten Batteriezellen digitale Zwillinge erstellt, die miteinander vernetzt sind. Dies ermöglicht u. a. eine Rückverfolgung von Umgebungs- und Prozessparametern auf Ebene einzelner Batteriezellen oder den Einsatz von künstlicher Intelligenz in der Batteriezellfertigung, um die Produktionsqualität zu steigern.

Um Innovations- und Kommerzialisierungsprozesse zu beschleunigen, ist ein modularer Aufbau sowie ein Höchstmaß an Flexibilität der Produktionsmittel erforderlich. Daher sieht das Konzept der Fraunhofer FFB eine Kombination aus Labor- und Produktionsforschung vor. Je nach Bedarf können Prozessschritte der Batteriezellproduktion in Bezug auf Material, Produktionstechnologie, Energieeffizienz, Ressourceneffizienz,

**Abbildung 8: Einordnung der Fraunhofer FFB in die Forschungslandschaft**



**Abbildung 9: Schematische Übersicht des Infrastrukturangebots der Fraunhofer FFB.**



Qualität, Durchsatz und Kosten erprobt und optimiert werden. Dazu steht bereits heute Anlagentechnik zur Verfügung, die in den kommen Jahren weiter ausgebaut wird. Der Aufbau der Fraunhofer FFB erfolgt dementsprechend mehrstufig (siehe Abb. 9)

**»FFB Workspace«**

Um diese Ziele zu erreichen, hat die Fraunhofer FFB bereits im Jahr 2021 den »FFB Workspace« eingerichtet, in dem erste Anlagen zur Elektrodenfertigung betrieben werden. Hier werden verschiedene Mischverfahren und alternative Trocknungs-technologien untersucht, um die Herstellungsprozesse zu optimieren und effizienter zu gestalten.

**»FFB PreFab«**

Zusätzlich befindet sich die »FFB PreFab«, eine Pilotlinie für Pouch- und prismatische Zellen, in der alle Prozessschritte von der Wareneingangskontrolle bis zur End-of-Line Inspektion abgebildet werden, aktuell im Aufbau. In dieser Einrichtung stehen auch Innovationsflächen zur Verfügung, auf denen Maschinenprototypen entwickelt werden können. Die »FFB PreFab« ist ein wichtiger Schritt, um den Übergang von der Forschung zur industriellen Anwendung zu ermöglichen.

**»FFB Fab«**

Des Weiteren wird die »FFB Fab« errichtet, in der Fertigungs-linien für die großskalige Batteriezellproduktion entwickelt werden. Hier werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in allen Zellformaten stattfinden. Die Fraunhofer FFB strebt an, wertvolle Erfahrungen im Betrieb einer großskaligen Batteriezellfertigung zu sammeln und somit die Lücke zwischen Forschung und Industrie zu schließen. Durch den Einsatz digitaler Methoden und künstlicher Intelligenz sollen die Produktionsqualität verbessert und die Effizienz gesteigert werden.

Nun hat sich die Fraunhofer FFB zum Ziel gesetzt, ihre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf die Produktion von Natrium-Ionen-Batterien auszuweiten. SIB gelten als vielversprechende Alternative zu herkömmlichen LIB, da sie auf der weit verbreiteten Ressource Natrium basieren und somit kostengünstiger und nachhaltiger sein können.

Die Entwicklung und Skalierung von SIB in der »FFB PreFab« wird darauf abzielen, den Innovations- und Kommerzialisierungsprozess für diese Technologie zu beschleunigen. Durch die Nutzung der bestehenden Infrastruktur und Expertise in der Batteriezellproduktion wird die »FFB PreFab« in der Lage sein, den Übergang von der Forschung zur industriellen Anwendung effizient zu gestalten. Durch die Zusammenarbeit mit Industriepartnern können die entwickelten Technologien und Prozesse effizient in den industriellen Maßstab übertragen werden.

# Rohstoffgewinnung und Materialherstellung

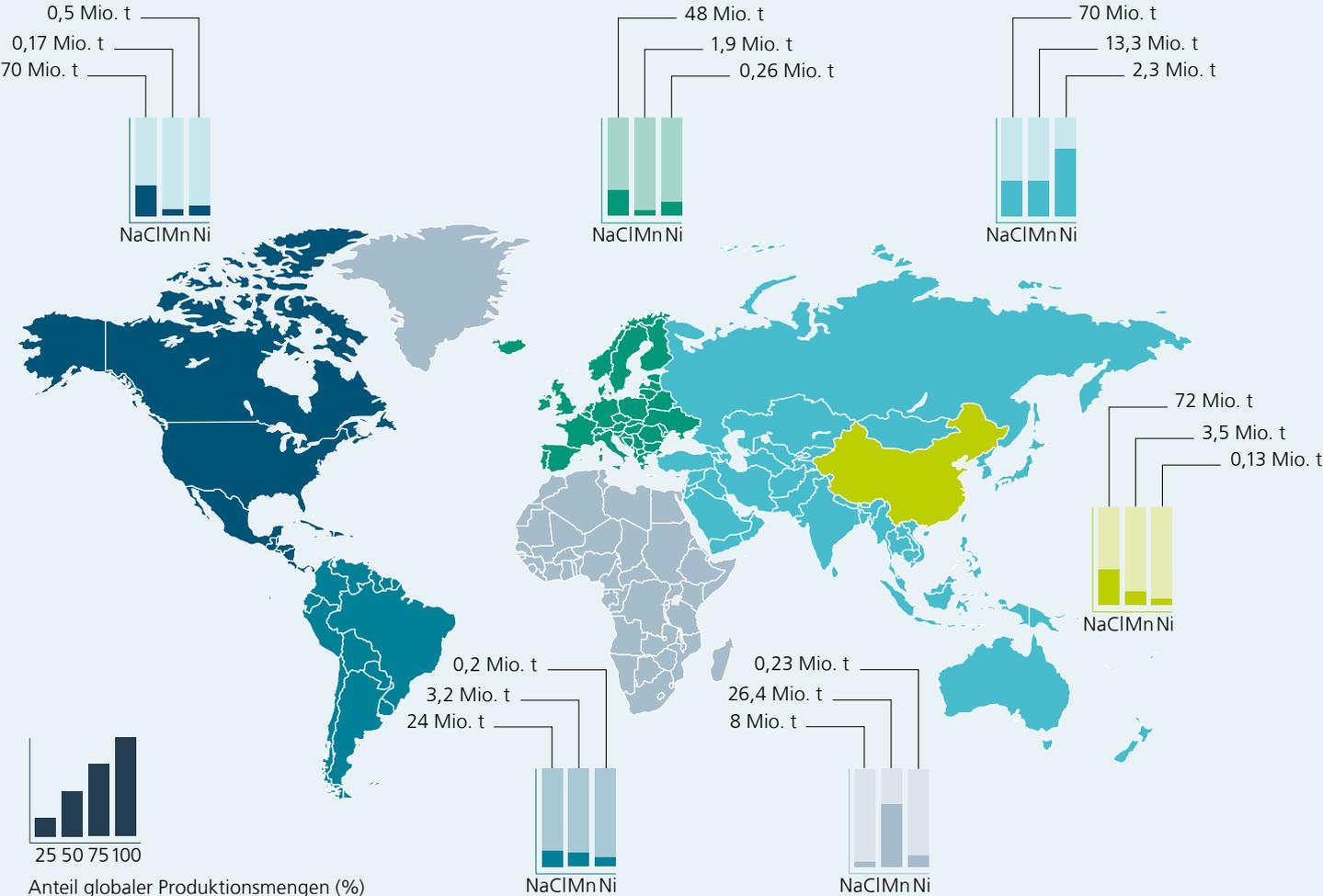
---

# 3. Rohstoffgewinnung und Materialherstellung

Einer der Vorteile von Natrium-Ionen-Batterien (SIB oder NIB) gegenüber den Lithium-Ionen-Batterien (LIB) und auch Grund für die Attraktivität der Batterietechnologie ist die erhöhte Rohstoffverfügbarkeit von Natrium (im Vergleich zu Lithium). Die Hauptquelle von elementarem Natrium ist Natriumchlorid (NaCl), welches als Kochsalz bekannt ist. Die Natriumchlorid-Ressourcen sind weit verbreitet, mit beträchtlichen Reserven in verschiedenen Ländern und im nahezu unbegrenzt

verfügbaren Meerwasser. Der Reichtum an Natriumressourcen in Verbindung mit den im Vergleich zu Lithium niedrigeren Kosten macht es zu einem leicht zugänglichen und potenziell skalierbaren Ausgangsrohstoff für Energiespeichersysteme. Zu den wichtigsten salzproduzierenden Nationen gehören China, die Vereinigten Staaten, Deutschland, Indien und Kanada. [5] Im Gegensatz zu Lithium stellt Natrium daher keine kritische Ressource dar. Der Anteil von Fremdstoffen im

Abbildung 10: Produktionsmengen für Natriumchlorid, Nickel und Mangan.



Die Abbildung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Überseegebiete werden der Region des Hauptlandes zugerechnet. Bei den zugrundeliegenden Zahlen handelt es sich teilweise um Schätzungen.

konventionell durch Bergbau oder durch Salzwasserevaporation gewinnbaren Salzes beträgt bis zu 1 %. Diese müssen im Rahmen der Rohstoffaufbereitung für eine spätere Aktivmaterialiensynthese für Batterien herausgefiltert werden. Typische Salzkontaminationen sind Calcium- und Magnesiumsulfate. Bei der Herstellung von Natriumcarbonat, einem Grundstoff zur Kathodenherstellung in SIB, kann ein Sulfatüberschuss in den verwendeten Salzlösungen zu qualitäts- und produktionsmengenmindernden Feststoffablagerungen führen. [6]. Daher stellt der Aufbau einer quantitativ sowie qualitativ zuverlässigen Vorkette eine Voraussetzung für die Marktdurchdringung der Technologie dar. Zur ganzheitlichen Betrachtung der Rohstoffverfügbarkeit für Natrium-Ionen-Batterien müssen neben dem Natrium selbst jedoch auch

weitere Grundmaterialien für die Kathoden- sowie Anodenherstellung berücksichtigt werden. Abhängig von der verwendeten Zellchemie werden z.B. Rohstoffe wie Vanadium, Mangan oder Nickel verwendet, welche eine teilweise kritischere Versorgungssituation aufweisen. [7]

In den folgenden Kapiteln werden, neben Innovationen und aktuellen Entwicklungen im Bereich der Kathoden- und Anodenmaterialien, auch bestehende Entwicklungs Herausforderungen für die Produktion der Materialien aufgezeigt. Zusätzlich erfolgt die Ausarbeitung einer Übersicht zu Forschungs- und Industrieakteuren in der Rohstoffgewinnung und Materialherstellung.

## 3.1. Innovationen und aktuelle Entwicklungen

Natrium-Ionen-Batterien und ihre Materialien werden seit den 1980er Jahren intensiv erforscht [8]. Durch den schnellen Markthochlauf der Elektromobilität und den damit verbundenen Herausforderungen für die vorherrschende Lithium-Ionen-Batterietechnologie hat sich in den vergangenen Jahren eine zunehmende Dynamik in der Erforschung von Alternativtechnologien wie z.B. die SIB entwickelt. Im Zentrum der Innovationsaktivitäten stehen dabei mehrheitlich die Elektrodenmaterialien der Batteriezellen, welche große Optimierungspotenziale bieten. Insbesondere die Vielzahl an möglichen Kathodenaktivmaterialien wird in Industrie und Wissenschaft intensiv untersucht.

### 3.1.1. Kathodenmaterialien

Auf dem Gebiet der Kathodenmaterialien haben sich drei Haupttypen als besonders vielversprechend für eine mögliche Industrialisierung von Natrium-Ionen-Batterien herausgestellt. Neben Übergangsmetallschichtoxiden (LTMO) und polyanionischen Materialien wird vermehrt die Verwendung von Derivaten des Farbstoffs Berliner Blau untersucht („Preußisch Blau Anaologa“, PBA).

#### 3.1.1.1. Schichtoxid

Schichtoxide sind eine vielversprechende und vor allem sehr große Klasse von Kathodenmaterialien für SIB. Sie weisen eine gute elektrochemische Stabilität auf. Zu den Schichtoxiden zählen Natrium-Übergangsmetalloxide mit der allgemeinen Stöchiometrie  $\text{Na}_x\text{MeO}_2$ , die teilweise mehrere Modifikationen besitzen. Diese Polymorphie eröffnet zum einen zahlreiche Freiheitsgrade, was die Optimierung der elektrochemischen Eigenschaften angeht, auf der anderen Seite durchlaufen die Materialien bei der (De-)natriierung teilweise unerwünschte

und irreversible Phasenübergänge, was ihre Eignung einschränkt.

Unter den Vertretern finden sich einige Mn-basierte Materialien, z.B.  $\text{NaMnO}_2$ , welche Modifikationen mit hoher Stabilität besitzen, im Allgemeinen jedoch eine durch den Jahn-Teller Effekt der  $\text{Mn}^{3+}$  Ionen eine teilweise gehemmte Kinetik aufweist. Na-arme Varianten wie  $\text{Na}_{0.44}\text{MnO}_2$  verringern das Auftreten dieses Effektes und erreichen hohe Zyklenstabilitäten bei jedoch überschaubarer spezifischer Kapazität.

Auch für die Fe-Varianten ( $\text{Na}_x\text{FeO}_2$ ) existieren mehrere stabile Modifikationen mit jedoch niedriger spezifischer Kapazität. Durch binäre oder ternäre Oxide ( $\text{Na}_x(\text{Fe},\text{Mn},\text{Co})\text{O}_2$ ) konnte die elektrochemische Aktivität und Stabilität verbessert werden. Eine andere Möglichkeit stellt die Dotierung mit elektrochemisch inaktiven Elementen wie Mg, Zn oder Al dar, z.B.  $\text{Na}_x(\text{Mn},\text{Mg})\text{O}_2$ , wodurch unerwünschte strukturelle Veränderungen während der Denatriierung reduziert werden konnten.

#### 3.1.1.2. Polyanionische Materialien:

Polyanionische Materialien (Phosphat- Sulphat oder Fluorophosphatgruppen), wie Natrium-Vanadium-Phosphat ( $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ ) und Natrium-Eisen-Phosphat ( $\text{NaFePO}_4$ ), bieten eine teilweise höhere Zellspannung bzw. höhere Kapazität als Schichtoxide. Im Allgemeinen besitzen die Materialien außerdem eine hohe Zyklenstabilität und sind thermisch stabil. Viele der Materialien besitzen eine gut ionenleitende NASICON Struktur. Das Na-Äquivalent zu  $\text{LiFePO}_4$ :  $\text{NaFePO}_4$  (NFP) besitzt zwei Modifikationen, wobei die elektrochemisch aktive olivinartige Struktur bei hohen Temperaturen nicht stabil ist.

Fluorophosphate sind aufgrund ihrer Na-Kinetik und Stabilität interessant, allerdings sind mit der Verwendung von Flurverbindungen (bzw. deren Toxizität) insbesondere bei einem Batterie-recycling große Herausforderungen verbunden.

**3.1.1.3. Preußisch-Blau-Analoga:**

Preußisch-Blau-Analoga (PBA) sind eine Klasse von Kathodenmaterialien für SIB, die auf der bekannten Verbindung "Berliner Blau" (Eisen(III)-Hexacyanoferrat(II);  $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$ ) basieren. Die Kristallstruktur der Materialien weist Poren auf, in denen Natrium-Ionen eingeschlossen werden können, was zu einer vergleichsweise hohen spezifischen Kapazität bei gleichzeitig niedriger Volumenänderung führt. Die für die Nutzung in SIB untersuchten PBAs besitzen eine Stöchiometrie, die als  $Na_xMe[Fe(CN)_6]$  beschrieben werden kann, wobei  $x < 2$  gilt und Me Übergangsmetalle sind.

Natrium-Nickel- oder Natrium-Mangan-hexacyanoferrat ( $Na_xNi[Fe(CN)_6]$ ,  $Na_xMn[Fe(CN)_6]$ ) sind Beispiele für PBAs. Sie sind jedoch weniger gut erforscht und verstanden im Vergleich zu Schichtoxiden und polyanionischen Materialien, u.a. da die elektrochemischen Eigenschaften stark von Oberflächendefekten und Defekten in der Kristallstruktur abhängen, welche die Aktivität der Übergangsmetalle beeinflussen. Entsprechende Defekte in der Struktur können zu schnellem Verlust der Kapazität (niedrige Zyklenstabilität) führen. Insbesondere bei Feuchtigkeitseintrag oder der herstellungsbedingten Einlagerung von Wassermolekülen in die Materialverbindungen (Kristallwasser). Eine Einstellung der elektrochemischen Eigenschaften und Stabilität ist durch die Wahl des

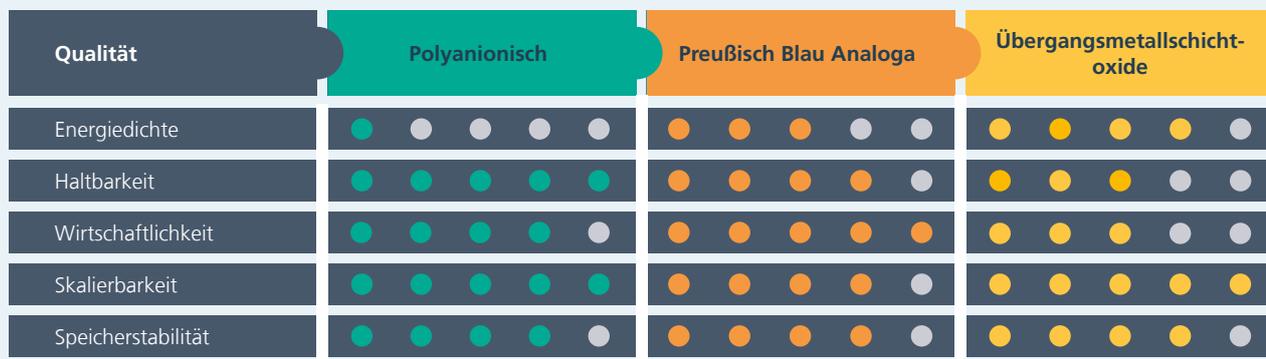
Übergangsmetalls oder der Kombination von Übergangsmetallen und der Dotierung möglich.

PBAs werden bereits heute in verschiedenen Anwendungen eingesetzt, darunter als Katalysatoren in der chemischen Industrie, insbesondere in der Oxidationskatalyse und der  $CO_2$ -Abscheidung, als Pigment in der Farbstoffindustrie oder auch in der Medizin und Umwelttechnologie, z.B. aufgrund ihrer Eigenschaft größere Ionen binden zu können. Im Allgemeinen werden PBAs als sicher eingestuft und weisen keine toxischen Eigenschaften auf. Einzig die Eisen-cyano-Gruppen in PBA können möglicherweise giftig sein, wenn sie in hohen Konzentrationen freigesetzt werden. Bei thermischer Zersetzung von Preußisch Blau ab  $400\text{ }^\circ C$  (z.B. im Brandfall) kann Dicyan als giftiges Gas freigesetzt werden.

**3.1.1.4. Herstellung**

Ähnlich wie für LIB-Materialien erfolgt die Herstellung von Kathodenmaterialien für SIB durch eine Mischung aus nass- und trockenchemischen Verfahren, typischerweise beginnend mit der Herstellung der Precursor (pCAM) aus Metalloxiden, -Carbonaten, -Hydroxiden, -Nitraten oder Phosphaten. Bei Schichtoxiden wird das pCAM häufig in einer nasschemischen Ausfällung hergestellt, polyanionischen CAM wie Natrium-Vanadium-Phosphate oder Natrium-Eisen-Phosphate werden hingegen oft durch eine Trockensynthese hergestellt. Nach Zugabe der Natriumquelle werden die Materialien kalziniert und gesintert. Typischerweise erfolgt dies bei Temperaturen zwischen  $500$  und  $1000\text{ }^\circ C$ . Die Dauer des Sinterprozesses hängt von verschiedenen Faktoren wie der Größe und

**Abbildung 11: Schematische Einordnung der KPI verschiedener SIB-Kathodenmaterialklassen.**



● ● ● ● ● keine Erfüllung des Merkmals  
 ● ● ● ● ● volle Erfüllung des Merkmals

chemischen Zusammensetzung des Kathodenmaterials ab und kann von mehreren Stunden bis zu mehreren Tagen reichen.

Die Herstellung von PBAs erfordert teilweise einen weiteren Zwischenschritt. Der Precursor kann durch Ausfällung aus einer wässrigen Lösung eines Metallsalzes (z. B. Eisen- oder Kobaltsalz) und eines cyanidhaltigen Salzes (z. B. Kaliumhexacyanoferrat) hergestellt werden. In einem zweiten Schritt wird das Material mit einer Natriumionenlösung behandelt, um eine Ionenaustauschreaktion durchzuführen. Dabei ersetzen Natriumionen die Metallionen in der Kristallstruktur der Vorstufe und erzeugen so das Natrium-Preußisch-Blau-Analogon (NaPBA).

Nach der Ionenaustauschreaktion wird das NaPBA in der Regel mehrmals mit Wasser gewaschen, um überschüssige Salze und andere Verunreinigungen zu entfernen. Anschließend wird es getrocknet, um das fertige PBA-Pulver zu erhalten.

### 3.1.2. Anodenmaterialien

Auch für die Anodenmaterialien wird zwischen drei Haupttypen differenziert. Im Rahmen der laufenden Forschung an Natrium-Ionen-Batterien werden vor allem insertionsbasierte, legierungsbasierte und konversionsbasierte Verbindungen untersucht. Eine der vielversprechendsten Alternativen für die negative Elektrode ist nichtgraphitisierbarer bzw. amorpher Kohlenstoff („Hard Carbon“) [9,10].

Aufgrund des hohen Ionenradius von  $\text{Na}^+$  ist eine Interkalation in Graphit mit hohen strukturellen Veränderungen des Materials verbunden, was dessen Kapazität und Stabilität begrenzt und Graphit somit nicht als Anodenmaterial in Frage kommt. Als bereits in der Industrie eingesetztes Material ist Hard Carbon in den Fokus der Anodenmaterialentwicklung gerückt. Weitere Entwicklungen betreffen metallisches Natrium und Legierungen von Natrium mit anderen Metallen wie Zinn oder Antimon.

Hard Carbon ist ein vielversprechendes Anodenmaterial für Natrium-Ionen-Batterien. Es handelt sich dabei um amorphe Kohlenstoffmaterialien mit einer defektreichen Struktur, die aus Polyacrylnitril (PAN), Cellulose, Zucker oder Phenol hergestellt werden können. Im Vergleich zu Graphit besitzen die Materialien oft eine höhere Kapazität, da neben der Interkalation von Ionen zwischen die Graphenlagen die Na-Speicherung auch durch Adsorption oder Anlagerung in den Poren des Materials erfolgen kann. Aufgrund der 3D Transportpfade besitzen die Materialien auch eine gute Na-Kinetik. Die Spannungslage des Materials liegt ähnlich wie bei Graphit bei wenigen 100 mV gegenüber  $\text{Li/Li}^+$  oder  $\text{Na/Na}^+$ .

Hard Carbons umfassen dabei eine große Klasse an Materialien, die sich durch ihre Struktur bzw. den Grad der Kristallinität, Partikelmorphologie, Porenstruktur und auch Funktionalisierung, z.B. Oberflächeneigenschaften oder Dotierung durch Heteroatome, unterscheiden können. Die niedrigere Kristallinität im Vergleich zu Graphit führt zu einer niedrigeren elektronischen Leitfähigkeit aber ggf. höheren Speicherfähigkeit. In der Regel wird eine spezifische Kapazität von etwa 200-350 mAh/g erreicht. Es wurden jedoch auch Hard Carbons mit Kapazitäten von bis zu 500 mAh/g berichtet [9]. In der praktischen Anwendung waren bisher die hohen irreversiblen Na-Verluste im ersten Zyklus hinderlich, welche die praktisch erreichbare Kapazität deutlich limitieren und zum anderen zur Vergrößerung des Innenwiderstands von Zellen führen können.

Bereits heute werden Hard Carbons industriell als Katalysatoren, z.B. zur Herstellung von Kohlenstofffasern oder in der Elektrokatalyse, z.B. zur Herstellung von Wasserstoffperoxid, eingesetzt. Aufgrund ihrer hohen Porosität und spezifischen Oberfläche werden Hard Carbons auch als Adsorptionsmittel eingesetzt, z.B. bei der Abwasserbehandlung.

Na-Legierungen [11] haben das Potenzial, höhere Kapazitäten als Graphit oder Hard Carbon zu ermöglichen. Beispiele für Legierungen, die als Anodenmaterial für Natrium-Ionen-Batterien untersucht werden, sind Natrium-Silizium (Na-Si, 1000 mAh/g demonstriert), Natrium-Zinn (Na-Sn, 800 mAh/g demonstriert) und Natrium-Antimon (Na-Sb, 700 mAh/g demonstriert). Diese Legierungen haben jedoch auch einige Nachteile, wie zum Beispiel eine begrenzte Zyklusfähigkeit und eine geringe Stabilität gegenüber der Volumenänderung während des Lade- und Entladevorgangs.

#### 3.1.2.1. Herstellung

Ausgangsstoffe für die Hartkohlenstoffherstellung sind z.B. Phenol und andere Harze, Cellulose, PVC oder PFA, die anschließend bei Temperaturen zwischen 600 und 1000 °C unter Ausschluss von Sauerstoff oder in einer inerten Atmosphäre wie Stickstoff oder Argon pyrolysiert werden. Hierbei wird das Material thermisch zersetzt und es entsteht der endgültige Hard Carbon. Ggf. schließt sich ein weiterer Aktivierungsschritt an: Durch Behandlung des Hard Carbons mit aktivierenden Gasen wie Kohlendioxid oder Wasserdampf können die Porenstruktur und die spezifische Oberfläche des Materials erhöht werden.

Bei den Legierungsmaterialien Si oder Sb handelt es sich um Mikro- oder Nanopartikel welche großtechnisch mit Hilfe von Kugelmøhlen oder Planetenmischern hergestellt und anschließend ggf. beschichtet werden.

## 3.2. (F&E-)Herausforderungen

Trotz erster kommerzieller Produkte sind im Bereich der Batteriematerialien noch zahlreiche F&E-Herausforderungen zu meistern, welche sowohl die Materialentwicklung als auch die Skalierung der Produktion betreffen.

Die Vielfalt der Kathodenmaterialklassen und Unterklassen bietet einerseits einen großen Spielraum bei der Verfügbarkeit und Nutzung von Rohstoffen, erhöht aber andererseits den Parameterraum und damit den Aufwand bei der Suche optimaler Zusammensetzungen, Kristallstrukturen und auch des passenden großtechnischen Syntheseverfahrens. Oft werden in der Literatur z.B. spezialisierte (Labor-)verfahren wie die Sol-gel-Synthese, Prozesse unter Einbeziehung von Schablonenmolekülen oder -Strukturen oder Kombinationen mit Nanomaterialien wie Kohlenstoffnanoröhren oder Graphenderivaten verwendet, welche so nicht eins zu eins in der Industrie umsetzbar sind. Hier gilt es kosteneffiziente und skalierbare Verfahren zu finden, die idealerweise bereits in der Industrie angewendet werden und gleichzeitig Materialien mit guten Leistungseigenschaften erzeugen können.

### Vielfalt und Auswahl von Aktivmaterialien

Auf Materialebene sind die Herausforderungen eng mit den Eigenschaften der jeweiligen Unterklassen verknüpft [12]. Viele der unerwünschten elektrochemischen Eigenschaften von Preußisch-Blau-Analoga z.B. sind mit der Einlagerung von Kristallwasser verbunden. Auch wird die Stabilität der Materialien wesentlich durch das Vorkommen von Defekten in den  $\text{Fe}(\text{CN})_6$  Gruppen beeinflusst. Ein Ansatz zur Verbesserung der langfristigen Materialeigenschaften ist zum Beispiel die Entwicklung von Additiven für das Elektrodengemisch.

Die Herausforderungen bei der Optimierung polyanionischer Verbindungen liegen unter anderem darin ein gutes Verhältnis aus Kosten, Leistung und Nachhaltigkeit zu finden, insbesondere was die Verwendung der unterschiedlichen Übergangsmetalle, z.B. Vanadium, angeht. Entwicklungsbemühungen bei den Schichtoxiden zielen unter anderem darauf ab die chemische und kristalline Stabilität und damit die elektrochemische Zyklenstabilität zu erhöhen. Auch muss in vielen Fällen die elektronische und/oder ionische Leitfähigkeit weiter verbessert werden, z.B. durch Wahl der richtigen elementaren Zusammensetzung und Mischung aus elektrochemisch aktiven und inaktiven Elementen.

Ein Ansatz, der für viele der Kathodenklassen verfolgt wird, ist die Synthese von Partikeln mit einer sogenannten „Schale-Kern-Struktur“ (core-shell), was sowohl Ansätze mit organischer als auch anorganischer Beschichtung und Oberflächen-dotierung umfasst.

Zwar stehen im Vergleich zu den Kathodenmaterialien auf der Anodenseite deutlich weniger unterschiedliche Materialklassen zur Verfügung, deren mikrostrukturelle Vielfalt ist jedoch dennoch extrem groß [13]. Bei der Synthese von Hard Carbons z.B. besteht ein hoher Optimierungsbedarf bei der Selektion von Ausgangsstoffen. Aus ökologischer Sicht besteht das Ziel in der Verwendung vorrangig bio-basierter Ausgangsstoffe. Für eine hohe Ausbeute an Hard Carbon ist dazu ein hoher Celluloseanteil notwendig. Prinzipiell stehen verschiedene bio-basierte Materialien zur Verfügung, jedoch sind deren schwankenden Eigenschaften bzw. eine gleichbleibende Qualität des Hard Carbons häufig herausfordernd. Aktuell wird daher noch überwiegend auf fossile Ausgangsmaterialien zurückgegriffen.

Auch auf Partikelebene unterscheiden sich die verfügbaren Hard Carbons stark in Morphologie, Porengröße, Leitfähigkeit und Stabilität. Diese Parameter werden neben dem Ausgangsmaterial auch stark durch den Syntheseprozess, z.B. die Carbonisierungstemperatur, beeinflusst. Auch wird auf Batteriezellebene häufig noch keine ausreichende Coulombeffizienz im ersten Zyklus erreicht, was zum Verlust von für die Energiespeicherung verfügbarem Natrium führt. Verbesserungen sind durch die Dotierung mit Heteroatomen und durch die Zugabe von Opfersalzen in Elektrode und Elektrolyt möglich.

Mittelfristig könnten Legierungsmaterialien wie Zinn und Blei oder Mischungen aus Kohlenstoff- und Legierungsmaterialien eingesetzt werden. Die Entwicklung ist zur Zeit noch in einem frühen Stadium, verspricht aber Verbesserungen vergleichbar mit dem Einsatz von Silizium in LIB. Die hohe Kapazität und damit hohe mögliche Energiedichte von SIB wäre jedoch mit ähnlichen Herausforderung hinsichtlich Volumenänderung und Stabilität verbunden. Teilweise werden die Materialien bereits in der Industrie entwickelt, z.B. durch die Firma Faradion, scheinen jedoch bislang noch nicht mit einer zufriedenstellenden Stabilität und Zyklenlebensdauer zur Verfügung zu stehen.

Langfristig sind auch SIB Konzepte mit metallischer Anode und ggf. festem Elektrolyt denkbar und werden beforscht. Diese werden erneut völlig andere Materialien erfordern und können somit eher als Zukunftstechnologie angesehen werden [14].

### Aufbau und Skalierung einer Lieferkette

Jenseits der Materialentwicklung selbst ist für eine großskalige SIB-Herstellung der Aufbau einer Lieferkette im „Giga-Maßstab“ notwendig. Wichtige Precursor wie z.B.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  werden zwar heute schon großtechnisch hergestellt, die Reinheit und Qualität des Materials entspricht jedoch häufig nicht den Anforderungen für die Batterieherstellung, da  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  heute überwiegend nicht für high-tech Anwendungen benötigt wird.

In Hinblick auf die geographische Rohstoffverteilung stehen die Vereinigten Staaten im Mittelpunkt, welche über große natürliche Ressourcen und die größten Förderkapazitäten verfügen. Die Synthetisierung von Natriumcarbonat aus Natriumchlorid ist auf Grundlage des Solvay-Prozesses möglich. Die Skalierung der Produktionskapazitäten für die Sicherstellung der Rohstoffbedarfe im Rahmen einer skalierten SIB-Produktion stellt jedoch eine Herausforderung dar.

Während Natriumchlorid sowie Natriumcarbonat die zentralen Rohstoffe für die Produktion von SIB darstellen, muss auch die Versorgungssituation mit anderen Materialien betrachtet werden, welche für die Herstellung von Anoden- oder Kathodenaktivmaterial verwendet werden. Ähnlich wie im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien werden in Abhängigkeit der verwendeten Zellchemie andere kritische Rohstoffe benötigt, welche eine herausforderndere Versorgungssituation als die Natriumderivate aufweisen. Aufgrund der Vielzahl der aktuell erforschten Varianten im Bereich der Aktivmaterialien lässt sich nur eine eingeschränkte Aussage zur Kritikalität weiterer Rohstoffe in der Lieferkette treffen.

Die Tatsache, dass es bislang keine Standardmaterialien gibt, wird mittelfristig den Aufbau einer Industrie und

Zulieferstruktur, die z.B. ein Multi-Sourcing zulässt, erschweren. Aktuell treten die Zellhersteller von SIB häufig gleichzeitig als Materialproduzent auf, bzw. planen die Materialproduktion für den eigenen Bedarf zu skalieren. Dies erhöht für das einzelne Unternehmen den Entwicklungs- und Skalierungsaufwand erheblich. Da fast immer individuelle Materialien und Rezepturen eingesetzt werden, ist jedoch auch in naher Zukunft zumeist nicht mit der Übertragung der Materialversorgung auf externe Chemieunternehmen zu rechnen. CATL beispielsweise versucht jedoch trotzdem eine externe Materialversorgung zu etablieren und hat mit Ronbay einen Zulieferer für die benötigten Ausgangsmaterialien der SIB Produktion. Ronbay selbst plant bereits in diesem Jahr größere Produktionskapazitäten in Betrieb zu nehmen.

Neben der Kathoden- und Anodenaktivmaterialherstellung muss zudem eine Produktion und Lieferkette für weitere Batteriekomponenten aufgebaut werden. In vielen Fällen, z.B. der Stromableiterfolien oder Elektrolytlösungsmittel, kann auf LIB-Materialien zurückgegriffen werden. Elektrolytsalze auf der anderen Seite müssen in spezialisierten Verfahren hergestellt werden und sind damit zumindest mit deutlichen Anpassungen gegenüber ihren LIB Analoga verbunden.

### 3.3. Übersicht der Forschungs- und Industrieakteure

In Hinblick auf die beteiligten Akteure aus der Industrie ergibt sich ein differenziertes Bild mit etablierten Konzernen aus der Batterie-, Chemie- und Rohstoffindustrie, aber auch zunehmend kleinen bis mittelständischen Unternehmen sowie Start-ups. Im Gegensatz zum Umfeld der Lithium-Ionen-Batterie befindet sich das industrielle Umfeld für SIB, insbesondere im Bereich des Recyclings, noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Abb. 12 bietet einen Überblick über Verteilung der Unternehmen für die Herstellung von Kathoden- sowie Anodenaktivmaterial. Im Bereich der Rohstoffgewinnung bilden Natriumchlorid (Salz) und Natriumcarbonat (Soda) die wichtigsten Na-Rohstoffe für die Herstellung von Kathodenaktivmaterial. Da für beide Materialien bereits heute erhebliche Bedarfe aus verschiedensten Industrien bestehen, existiert eine funktionierende Lieferkette für die Rohstoffe, welche jedoch noch nicht die Materialversorgung mit den für die Batterieproduktion benötigten, hochreinen Rohstoffen umfasst. Natriumchlorid wird dabei vorwiegend im Salzbergbau sowie durch Meerwasserextraktion gewonnen. Aufgrund global stark verteilter Ressourcen ergibt sich eine diversifizierte Industriestruktur mit Schwerpunkten in Ostasien, Nordamerika und Europa.

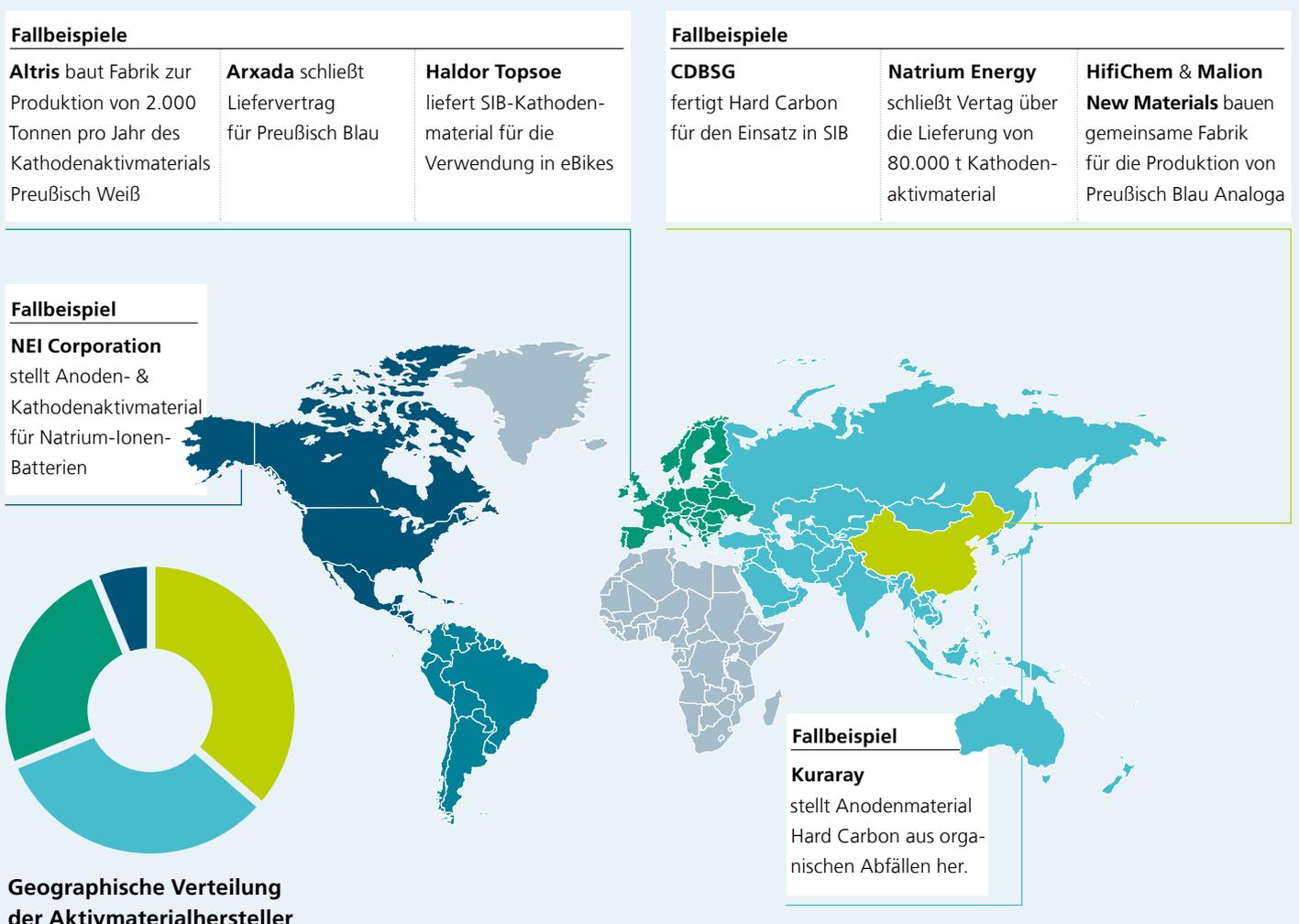
Zu den größten Marktteilnehmern zählen dabei Cargill (USA), die China National Salt Industry Group (China), Tata Chemical (Indien), INEOS (UK) oder K+S (Deutschland). [15]. Die Produktion von Natriumcarbonat findet zu über 50 % in Asien statt. Europa und Nordamerika tragen jeweils etwa 25 % zur globalen Produktion bei. Die größten Unternehmen im Bereich der Natriumcarbonatsynthese sind Solvay (Belgien), die Ciner Group (Türkei), Tata Chemicals (Indien), Genesis Alkali (USA) und die Tangshan Sanyou Gruppe (China). [16]

Für die Aktivmaterialien von Natrium-Ionen-Batterien setzt sich das Spektrum an Industrieakteuren aus etablierten Unternehmen der Spezialchemie sowie Start-Ups mit dem Fokus Natrium-Ionen-Batterien zusammen. Insbesondere in China und anderen asiatischen Ländern wird intensiv an der Entwicklung und Produktion von Aktivmaterialien für Natrium-Ionen-Batterien geforscht. Die SIB-Technologie wurde im 5-Jahres-Plan der chinesischen Regierung als Schlüsseltechnologie identifiziert und Forschungs- sowie Industrieprojekte werden staatlich gefördert. [17]

Als europäische CAM-Hersteller sind insbesondere das schwedische Start-Up Altris sowie der Spezialchemiekonzern Arxada mit Hauptsitz in der Schweiz zu nennen. Altris plant die Errichtung einer Produktionsstätte für Kathodenmaterial in Zusammenarbeit mit dem Industrieunternehmen Sandvik. Es sollen jährlich 2000 t Preußisch Weiß produziert werden, was einer Batteriekapazität von 1 GWh entspricht. [18] Arxada wird den US-amerikanischen SIB-Hersteller Natron Energy mit Preußisch Blau für jährliche Batterievolumen von bis zu 600 GWh beliefern. [19]

Die Forschungs- und Industrieaktivitäten für das Recycling von Natrium-Ionen-Batterien sind bisher nur wenig ausgeprägt. Aufgrund der stark eingeschränkten Verfügbarkeit von SIB bestehen zum aktuellen Zeitpunkt keine nennenswerten Bestände an SIB am Ende ihres Lebenszyklus. Im Rahmen des EU-geförderten Projekts NAIMA wurde jedoch die Konzeption eines nachhaltigen und kosteneffizienten Wiederaufbereitungsverfahrens für SIB erforscht. [20] Auch in Anbetracht der allgemein vorteilhaften Ressourcenverfügbarkeit in Verbindung mit geringen Rohstoffkosten, wird das Aufkommen industrieller Recyclingaktivitäten für SIB noch weitere Zeit in Anspruch nehmen.

**Abbildung 12: Weltweite Fallbeispiele für den Aufbau einer SIB-Materialproduktion.**



Die Abbildung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die geographische Zuordnung erfolgt auf der Grundlage der rechtlichen Hauptsitze der Unternehmen. Batteriezellhersteller sind nicht dezidiert als Aktivmaterialhersteller berücksichtigt.

# Zellsysteme und Produktion

---

## 4. Zellsysteme und Produktion

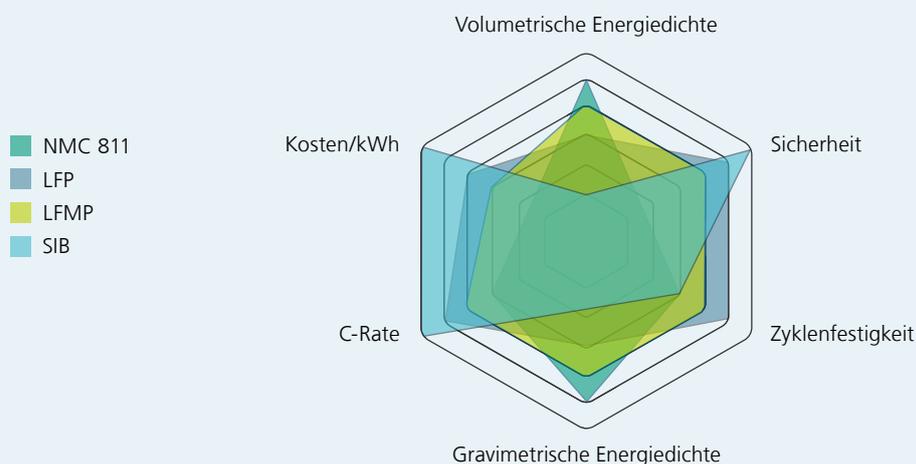
Aktuell wird davon ausgegangen, dass die grundsätzliche Anlagentechnik zur Prozessierung von Halbzeugen für die Zellfertigung von SIB ausgehend von LIB nur geringfügig modifiziert werden muss. Diskutiert wird die Natrium-Ionen-Batterie auch als Drop-In Technologie da sie hohe Ähnlichkeiten in chemischen Prozessabläufen sowie Verarbeitbarkeit zur Lithium-Ionen-Batterie aufweist. Bislang wurden die entsprechenden Eingangsmaterialien primär mit herkömmlichen Geräten gemischt und verarbeitet, die auch für die Herstellung von LIB verwendet werden. Es wird demnach ein verbessertes Verständnis der Herstellung und Verarbeitung von Materialien benötigt, da hierzu bislang nur wenige Erfahrungswerte existieren, die speziell auf SIB in höher skaliertem Produktionsmaßstab abzielen. Obwohl Parallelen zur Herstellung von LIB gezogen werden können, sind auch Einschränkungen bei der Anwendung auf SIB vorhanden, die auf die Unterschiede in den verwendeten Materialien zurückzuführen sind.

Die meisten der derzeit bereits auf der Natrium-Ionen-Technologie aktiven Unternehmen sind in China ansässig. Die chinesische Regierung unterstützt die Entwicklung der Natrium-Ionen-Batterieindustrie des Landes mit dem Ziel eine stabile Versorgung mit Batterien zu sichern und eine führende Rolle

bei der Entwicklung von Batterien der nächsten Generation einzunehmen. Chinesische Unternehmen sind aktiv in gemeinsamen Kapital- und Technologieallianzen, um eine frühe Massenproduktion zu realisieren. Es wird angenommen, dass allein in China fast 20 Unternehmen an der SIB-Technologie arbeiten. Dies spiegelt sich auch in der Patentaktivität, die in dieser Region am höchsten ist, wider (siehe Kapitel 2.1.1). Trotz der anhaltenden Ungewissheit über die Marktaussichten bereiten sich ebenfalls Unternehmen in westlichen Ländern vor, in das Geschäft einzusteigen, da sie dem Feld hohes Zukunftspotential zuschreiben. Sowohl das Vereinigte Königreich als auch Indien haben ein allgemeines Interesse an Natrium-Ionen-Batterien, wie das Beispiel des britischen Unternehmens Faradion zeigt. Faradion beabsichtigt den Aufbau entsprechender Produktionskapazitäten zur SIB-Fertigung in Indien. In den Vereinigten Staaten ist Natron Energy der einzige derzeit bekannte Akteur, der sich auf high-power SIB mit hoher zyklischen Lebensdauer und geringer spezifischer Energie für stationäre Anwendungen fokussiert.

Für Natrium-Ionen Zellen ist aufgrund ihrer hohen Ähnlichkeit zu Lithium-Ionen Zellen die Wahl aller drei großen Zellformate (zylindrisch, prismatisch und Pouch) zur Prozessierung möglich

**Abbildung 13: Vergleich von Leistungsgrößen zu den unterschiedlichen Zellchemien NMC, LFP und SIB, nach [22].**



und durch Zellen entsprechender Anbieter bestätigt. Während für Proof-of-Concept Serien wie beispielsweise von Faradion (3 Ah zu eBike Anwendungen), von Zoolnasm (NFS-A1 und -A2) oder für Kleinserien von AMTE (Ultra Safe Sodium-Ion Cells) die Verwendung von Pouchzellen bekannt wurde, haben Zellfertiger für die Bedienung des Massenmarktes in großen Stückzahlen die Verwendung der zylindrischen und prismatischen Zellformate angekündigt. Unter diesen sind CATL, BYD, EVE Energy, E&T Energy Technology, High Star, Hina Battery, Shenzhen Punes Times Energy, Tiamat und Zoolnasm mit entsprechenden Platzierungen von Produktankündigungen zu nennen. Eine klare Verbindung der Wahl des Zellformates mit der jeweiligen Endanwendung ist festzustellen und wird in Kapitel 5 näher beleuchtet. [21]

#### 4.1. Innovationen und aktuelle Entwicklungen

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten vor allem die Rohstoffe sowie die Herstellung und Eigenschaften der verschiedenen Materialien in Natrium-Ionen-Batterien vorgestellt wurden, werden im Folgenden die resultierenden Eigenschaften auf der Ebene der Batteriezelle beleuchtet. Zur besseren Einordnung der jeweiligen Eigenschaften werden diese jeweils mit unterschiedlichen Typen gängiger Lithium-Ionen-Batterien verglichen. Zum Vergleich werden hier die bekannte LFP-Kathodenchemie (Lithium-Eisen-Phosphat), deren mit Mangan dotierte Variante LFMP sowie eine Chemie mit hohem Nickelgehalt und hoher Energiedichte, NMC 811 ( $\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$  Schichtoxid), verglichen. Der Vergleich wird für die volumetrische und gravimetrische Energiedichte, die Zyklenfestigkeit, Sicherheit, Kosten sowie die C-Rate durchgeführt. Ein Vergleich der Zellchemien wird in der Abbildung 13 dargestellt.

Gegenüber den LIB weist die SIB eine geringere volumetrische und gravimetrische Energiedichte auf. Hierbei ist der Unterschied bei der volumetrischen Energiedichte deutlich größer. Allgemein ist die Energiedichte der SIB vor allem durch das geringere Standardpotential des Natriums ( $\text{Na}/\text{Na}^+$ ) gegenüber dem des Lithiums ( $\text{Li}/\text{Li}^+$ ) sowie der höheren Masse und Größe des Natrium-Ions physikalisch/chemisch immer niedriger als die einer LIB mit vergleichbarem Technologiestand. Auch die andere Polarisierbarkeit und Ionisierungsenergie des Natriums spielen hierbei eine Rolle. Der größere Abstand zur LIB bei der volumetrischen Energiedichte ergibt sich durch das größere Atom/Ion und die geringe volumetrische Speicherdichte der üblicherweise verwendeten Hard Carbon Anode. Bei der spezifischen Energie auf Zellebene können hingegen schon fast die Werte von LFP-Batterien erreicht werden.

Die Zyklenfestigkeit wird bei SIB vor allem durch die Stabilität der SEI-Schicht limitiert. Die Ausbildung einer stabilen, homogenen, leitfähigen und dünnen SEI ist hier noch weniger erforscht als bei der LIB. Gleichzeitig sind die gebildeten Reaktionsprodukte vor allem in Kombination mit

Carbonat-basierten Elektrolyten weniger stabil und die große Oberfläche der Hard Carbon-Anode erschwert eine homogene Bildung bei hoher Coulomb-Effizienz. Daher kommt vor allem den Elektrolyten bei der SIB eine hohe Bedeutung bezüglich der Lebensdauer zu. Tendenziell liegt die Lebensdauer von SIB vor allem deutlich unter der von LFP-Batterien, ist jedoch auf einem vergleichbaren Niveau wie NMC-basierte LIB. Vor allem für den, aufgrund der geringen Kosten und weniger wichtigen Energiedichte, eigentlich idealen Einsatzzweck in stationären Speichern stellt dies teilweise noch eine Hürde dar.

Bezüglich der Sicherheit sind SIB besser zu bewerten als LIB. Dies liegt vor allem an der langsameren Reaktionskinetik innerhalb der SIB. So wurden bei Versuchen zum Thermal Runaway mit verschiedenen Zellen bei SIB maximale Temperaturen von 660 °C erreicht, während bei LIB häufig Temperaturen von über 1000 °C überschritten werden [23]. Auch die höhere Temperaturstabilität der gängigen Kathodenmaterialien und Elektrolyte spielen hierbei eine Rolle. Dies ermöglicht so im Batteriesystem einen geringeren Kühlaufwand und einen geringeren Einsatz von Materialien zur Unterbindung der thermischen Propagation. SIB können höhere C-Raten als LIB erreichen. Dies liegt vor allem an der Hard Carbon-Anode. So ist bei LIB häufig die Graphit-Anode der limitierende Faktor bei hohen C-Raten. Durch die hohe spezifische Oberfläche und die geringe Dichte ist das Hard Carbon in der Lage die Natrium-Ionen besser aufzunehmen. Darüber hinaus bieten SIB auch noch weitere Vor- und Nachteile gegenüber LIB. Diese sind:

#### Verwendung von Aluminium als Trägerfolie auf der Anodenseite

In LIB kommt auf der Anodenseite eine Trägerfolie aus Kupfer zum Einsatz, da Aluminium mit dem in der Anode eingelagerten Lithium reagieren würde. Dieser Effekt tritt bei SIB nicht auf, weswegen hier auch Aluminium verwendet werden kann. Der Einsatz von Aluminium bietet hierbei mehrere Vorteile. Zum einen ist dieses um 2,5 g/cm<sup>3</sup> leichter als Kupfer. Dies spart bezogen auf das gesamte Zellgewicht 6 – 9 % ein und leistet so einen Beitrag zur verhältnismäßig guten gravimetrischen Energiedichte [24]. Zum anderen ist Aluminium günstiger als Kupfer. Der Kupferpreis lag im Mittel der letzten drei Jahre bei dem 3,5 – 4-Fachen des Preises von Aluminium [25]. Darüber hinaus kann bei den Ableitern aus dem Zellgehäuse ebenfalls Aluminium eingesetzt werden, was Kosten und Gewicht weiter senkt. Zudem lässt sich Aluminium besser per Laser verschweißen, wodurch eine größere Flexibilität bei der Prozess- und Anlagenauswahl besteht. Nachteilig ist hingegen die leicht schlechtere Wärmeabfuhr aus dem Zellgehäuse gegenüber einer Kupferfolie.

## Eigenschaften der Elektrolyte

Ähnlich wie bei LIB kommen bei Elektrolyten für SIB Lösungsmittel auf Basis von Carbonaten zum Einsatz. Es werden jedoch auch Ether-basierte Lösungsmittel eingesetzt, die eine bessere Zyklenstabilität bei jedoch zusätzlich verringerter Energiedichte ermöglichen [26]. Gleichzeitig können bei SIB andere Lösungsmittel und Additive eingesetzt werden. Kommt bei LIB häufig die Kombination aus Ethylencarbonat (EC) und Ethylmethylcarbonat (EMC) als Lösungsmittel zum Einsatz, wird bei SIB häufig Propylencarbonat (PC) in Kombination mit EC oder EMC verwendet. Der Schmelzpunkt von PC liegt mit  $-49\text{ °C}$  deutlich unter dem von EC mit  $36,4\text{ °C}$ . Dies ermöglicht, dass die Elektrolyte auch bei Temperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt noch eine hohe Leitfähigkeit aufweisen. Darüber hinaus können Elektrolyte bei SIB weniger entzündlich gestaltet werden bzw. der Bereich der exothermen Reaktion um ca.  $50\text{ °C} - 90\text{ °C}$  nach oben verschoben werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei Elektrolyten für SIB sind die starken Wechselwirkungen zu der individuellen Kathodenchemie und auch der Bildung und Stabilität der SEI. Daher ist der Einfluss des Elektrolyten auf die Lebensdauer und Sicherheit der Batterie bei SIB noch größer als bei LIB [27].

## Nutzung anderer Materialien für die Prozessierung von Natrium-Ionen-Zellen

Besonderheiten bei der Fertigung von Natrium-Ionen-Zellen sind hinsichtlich der unterschiedlichen Materialnutzung zu sehen. So sind Natriumschichtoxide anfälliger für Wasserabsorption als lithiumhaltige Oxide, da die Abstände zwischen den Übergangsmetallschichten größer sind und Wasser sich leichter einlagern kann. Insbesondere bei Schichtoxiden vom Typ "O3" kann dies zu Schwierigkeiten bei der Herstellung stabiler Pasten zur Elektrodenbeschichtung führen. Aufgrund dieser Schwierigkeiten müssen weitere Untersuchungen zur Haltbarkeit und Einhaltung von Qualitätsansprüchen der Beschichtungen in und ohne Trockenraumatmosphäre durchgeführt werden. Da die Stabilität der Pulver an der Luft ein Problem darstellt, muss auch die Lagerfähigkeit der Pulvermischungen sowie der fertig prozessierten Elektroden berücksichtigt werden. Es ist wahrscheinlich, dass selbst in einer trockenen Raumatmosphäre die Haltbarkeit der Elektroden auf Natriumbasis begrenzt ist [28].

## Implikationen der Materialeigenschaften auf die Fertigungsumgebung

Die erhöhte Sensibilität von Materialien, die zur Verarbeitung von Natrium-Ionen-Zellen gefordert sind, verlangen zusätzliche Infrastruktur, die in der Lage ist, auch bereits bei der Lagerhaltung der zu verarbeitenden Pulver und entlang der

Elektrodenfertigung eine feuchteminimierte Prozessierung zu gewährleisten. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um feuchteempfindliche Materialien während der Lagerhaltung und Prozessierung zu schützen und ihre Stabilität sicherzustellen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Materialien in einer trockenen und kontrollierten Umgebung zu lagern, die eine niedrige Luftfeuchtigkeit aufrechterhält. Dies kann beispielsweise durch die Verwendung von speziellen Lagerraum- oder Verpackungssystemen wie Trockenschränken, Trockenkammern oder Vakuumverpackungen erreicht werden. Geläufig ist in der Batteriezellfertigung der Betrieb der Prozessschritte in Rein- und Trockenräumen. Für die Berücksichtigung der hohen Empfindlichkeiten der Halbzeuge für Natrium-Ionen Zellen gegenüber Luftfeuchtigkeit sollte auch ein Betrieb der Elektrodenfertigung in Trockenraumatmosphäre erfolgen. In der Planungsphase haben Rein- und Trockenräume aufgrund ihrer Komplexität einen großen Einfluss auf das Design von Batteriezellfabriken. Die Anforderungen zwischen Produktion, Maschinen- und Anlagenbau, Bau und Medienversorgung sind kompliziert und können während des Fabrikaufbaus zu Fehlern führen. Diese Schnittstellen sind auch verantwortlich für einen Großteil der Investitionen und Betriebskosten von Zellfabriken. Durch die Nutzung von intelligenten Technologien der Anlageneinhausung (Mini-Environments) und bedarfsgerechten Intralogistiklösungen (automatisiertes Halbzeughandling sowie AGVs) können die Gesamtbetriebskosten langfristig deutlich reduziert werden.

## Design und Materialbalancing der Natrium-Ionen Zellen

Ein wichtiger Aspekt der Zellherstellung, der die Lebensdauer und Leistung der Zelle bestimmt, ist das Verhältnis zwischen Anode und Kathode sowie die Formierungsmethode. Bei LIB wird in der Regel eine zehnpromtente Überkapazität für die Anode verwendet, um die Bildung von Lithium-Dendriten zu verhindern. Es gibt ausreichend Kapazität, um das Lithium aus der Kathode zu nutzen, und eine Zusatzkapazität, um kleine Inhomogenitäten in den Elektrodenbeschichtungen auszugleichen. Im Gegensatz dazu ist die irreversible Kapazität im ersten Zyklus bei Natriumsystemen typischerweise höher. Außerdem werden ähnliche irreversible Kapazitäten bei geschichteten Oxidmaterialien beobachtet. Die Verluste in einer Zellkonfiguration sind jedoch nicht additiv, sondern komplementär, da der irreversible Natriumverlust der Kathode im ersten Zyklus zur Bildung der SEI-Schicht (Solid-electrolyte-interface) auf der Anode verwendet und im Rahmen des Verlustes des ersten Zyklus auf der Anode verbraucht wird. Daher sind die genaue Massenbilanz von Anode und Kathode sowie die reversiblen Spannungsfenster für die interne kathoden- und anodenspezifische Spannungssteuerung innerhalb einer Vollzelle äußerst wichtig.

## Formierungsprozess im Vergleich zu LIB

Der Formierungsprozess zum Ausbilden der SEI bestimmt maßgeblich die Performance der finalen Batteriezelle. Während Formierprotokolle bei Lithium-Ionen-Zellen herstellerspezifisch bekannt und forschungsseitig intensiv beforscht sind, gibt es bei der Einstellung optimaler Formierzyklen bei Natrium-Ionen-Zellen noch erheblichen Erkenntnis- und Entwicklungsbedarf. Spannungsfenster aus Niederspannungsbildungsprotokollen  $< 3,6$  V reichen nicht aus, um eine stabile SEI-Schicht zu bilden.

Hochspannungsbildungsprotokolle zeigen bessere Ergebnisse, indem sie die Bildungszeit verkürzen und die Kapazitätserhaltung verbessern. Es konnte gezeigt werden, dass der

Zellbildungsprozess mit niedrigem Strom und einer Spannung zwischen 3,6 und 3,8 V zu einer Verkürzung der Bildungszeit und erhöhtem Kapazitätserhalt im Vergleich zu anderen Formierprotokollen führt. [29] Auch der Einsatz von Additiven und konkreter Formulierung der Elektrolytrezeptur bietet weiteres Potential zur Stabilisierung der SEI und dem Erzielen höherer Performanzen. Wenn Verfügbarkeiten und Kosten von hochkonzentrierten ionischen Flüssigelektrolyten durch Größendegressionseffekte ihrer Herstellung attraktiver werden, dürfte sich dies auch positiv auf die Natrium-Ionen Zellfertigung auswirken.

## 4.2. (F&E-)Herausforderungen

In den letzten Jahren haben die weltweiten F&E-Aktivitäten für SIB erheblich zugenommen [30], was auf die potenziellen Kosten- und Sicherheitsvorteile im Vergleich zu LIB sowie auf die Kompatibilität mit den Herstellungsverfahren und Anwendungen von LIB zurückzuführen ist.

Zielsetzungen von F&E-Arbeiten auf dem Feld der Prozessierung von Natrium-Ionen-Batterien sind von ähnlich übergeordneter Art wie jene aus anderen Stufen der Wertschöpfungskette: Die Realisierung einer preislichen Rentabilität bezogen auf die Materialbeschaffung, Fertigung, Nutzung und Entsorgung. Außerdem besteht Bedarf in der Erarbeitung von Erkenntnissen zu zelldesign-übergreifender Sicherheit und die Erreichung von anwendungsrelevanten Performanceparametern von Natrium-Ionen-Batterien. Studien gehen davon aus, dass in der nächsten Zellgeneration die Energiedichte auf über 170 Wh/kg erhöht werden könnte [31].

### Maximierung der volumetrischen Kapazität durch Materialinnovationen und Reduzierung von Inaktivanteilen bei Pastenrezepturen

Ein Forschungspfad befasst sich mit Arbeiten zur Erhöhung des physikalischen und aktiven Gehalts sowie die Beladung der Elektrodenfläche, um die volumetrische Kapazität zu maximieren. Auch die Elektrolytbeladung kann optimiert werden, um das Gewicht der Zellen zu verringern. Die Erstzyklus-Wirkungsgrade (FCEs) von Hard Carbons sind im Vergleich

zu denen von Graphit ebenfalls recht niedrig ( $< 78$  % gegenüber  $> 92$  %); die Untersuchung einer Reihe von Hard Carbon/Elektrolyt-Kombinationen mit höheren FCEs ist aussichtsreich die Energiedichte weiter zu erhöhen. Hard Carbons mit niedrigeren durchschnittlichen Entladespannungen erhöhen die durchschnittliche Zellbetriebsspannung und die gravimetrische und volumetrische Gesamtenergiedichte der Zellen. Forschungsarbeiten zur Optimierung fortschrittlicher Kathodenchemie werden ebenfalls durchgeführt [32]. Dabei wird versucht, die Ni-Menge in der Kathode durch Fe und/oder Mn zu ersetzen, um die Kosten deutlich zu senken (siehe auch Abschnitt 3.1.1). Geringere Verarbeitungskosten sind ebenfalls ein Bereich, der erforscht werden muss, um das Verhältnis pro Speicherkapazität für SIB zu verbessern. Legierungselemente wie Sb, Si, Ge, As, Se, Pb und Bi werden ebenfalls als Alternativen zu Hard Carbons untersucht; es wird angenommen, dass die zweite Generation von Anoden diese als Mischungen mit Hard Carbon verwenden wird. Elektrodenpasten auf der Ebene der Knopfzellen haben ebenfalls standardisierte Formulierungen; der Messtechnik und dem Mischen von Trockenpulver wird wenig Aufmerksamkeit gewidmet, und sie enthalten große Mengen an Bindemittel und Kohlenstoff, um Materialbeschränkungen wie die schlechte Leitfähigkeit zu überwinden. Eine Verringerung dieser Anteile zur Erhöhung der Energiedichte der Zellen ist in großem Maßstab unerlässlich, da kommerzielle Zellen manchmal bis zu 98 Gew.-% aktives Material enthalten. Derartige Änderungen erfordern jedoch spezifische Tests und die Optimierung jeder einzelnen Elektrodenaufschlämmung.

## Erhöhung der Lebensdauer durch geschicktes Zellbalancing und Grenzflächenstabilisierung

Die Lebensdauer der Zellen hängt von verschiedenen chemischen und zelltechnischen Optimierungen ab, die sich nicht nur auf die Materialien, sondern auch auf das Design der Elektroden und Zellen und deren Betrieb beziehen [33]. Bei SIB ist die Optimierung der Massenbilanz zwischen positiven und negativen Elektroden entscheidend für hochenergetische und langlebige Batterien. Jedes Kathoden- und Anodenmaterial weist eine Coulomb-Ineffizienz im ersten Zyklus auf, die mit der Zersetzung des Elektrolyten und der irreversiblen Natriumbewegung von der positiven zur negativen Elektrode zusammenhängt. Infolgedessen bildet sich auf der Anode eine Grenzfläche (Oberflächen-Elektrolyt-Grenzfläche (SEI)), die dazu führt, dass weniger Natrium für den Ionentransport zwischen der positiven und der negativen Elektrode zur Verfügung steht (Verringerung der Kapazität). Die Massenbilanz und die gewählten Spannungen haben daher einen großen Einfluss auf die Wirksamkeit dieser Grenzflächenbildung zur Stabilisierung des Elektrolyten gegen Zersetzung und folglich auf die Energiedichte der Zelle [29]. Die Stabilität der Grenzflächen an den positiven und negativen Elektroden hängt von vielen Faktoren ab, und es ist bekannt, dass die Stabilität von SIB-Grenzflächen aufgrund der hohen Löslichkeit von Natriumsalzen geringer ist als die von LIB [34]. Es ist noch viel Arbeit erforderlich, um die Bildung und die Veränderungen zu verstehen, die an diesen Oberflächen und Grenzflächen während der Lebensdauer der Zelle auftreten, und es wurden bereits einige Fortschritte auf

diesem Gebiet erzielt [35]. Diese Grenzflächen sind nicht nur für die Langlebigkeit, sondern auch für die Sicherheit wichtig. Dendriten und Plating können im Betrieb von Natrium-Ionen-Zellen sehr leicht auftreten. Dies wird nicht nur durch die Elektrolytzusammensetzung und die Fähigkeit zur Bildung stabiler Grenzflächen mit geringem Widerstand gesteuert, sondern auch durch das Elektrodendesign. So können Grundbestandteile in einer N-Methyl-2-pyrrolidon-Polyvinylidenfluorid-Tinte zu einer Instabilität der Paste führen, die sich mit der Zeit verdickt und schließlich geliert [36]. Eine Methode zur Überwindung geringer Basizität ist die Zugabe einer Säure in die Formulierung. Andere Methoden zur Verringerung der Wassereinlagerung sind selektive Substitutionen in der Kristallstruktur. In [37] wird ein anderer Ansatz beschrieben, in welchem Kathodenmaterialien entwickelt wurden, die Eisen- und Kupfersubstitutionen zur Materialstabilisierung an der Luft verwenden.

## Materialmodifikationen, zur Herausforderungsbewältigung der SIB-Fertigung

Generell ist ein besseres Verständnis der Herstellung und Verarbeitung von Materialien erforderlich, da es nur sehr wenige Informationen gibt, die sich speziell auf SIB in größerem Maßstab beziehen. Obwohl weitreichende Parallelen zur Herstellung von LIB gezogen werden können, gibt es auch Einschränkungen bei der Anwendung auf SIB, was auf die Unterschiede bei den verwendeten Materialien zurückzuführen ist. Wenn eine physikalische Eigenschaft eines Materials,

**Abbildung 14: Schematische Darstellung der F&E-Ansätze zur Realisierung wettbewerbsfähiger SIB-Technologien.**



wie Partikelgröße, Kristallstruktur, Morphologie usw., geändert wird, verändert dies auch die Verarbeitungsparameter und wirkt sich somit auf die elektrochemische Leistung aus [38]. Die meisten Herausforderungen bei der Herstellung liegen auf der Materialebene. Weitere Forschungsbemühungen zu Materialmorphologien, wie die Herstellung von Partikeln mit großer Oberfläche, sind aussichtsreich, um die elektrochemische Leistung zu verbessern. Darüber hinaus sind einige vielversprechende Natriumschichtoxide extrem luft- und feuchtigkeitsempfindlich, was die Handhabung verkompliziert und entsprechende zusätzliche Anforderungen stellt. Es ist möglich, diese Materialien zu modifizieren, um ihre Stabilität an der Luft zu verbessern oder den Natriumgehalt zu verringern, was sich jedoch nachteilig auf die elektrochemische Leistung auswirken kann [39].

### Optimierung der Elektrolyte

Wie bereits beschrieben stellt die Herstellung und Aufrechterhaltung einer stabilen SEI und CEI eine erhebliche Herausforderung bei SIB dar. Gleichzeitig muss eine Degradation des Lösungsmittels und der Salze des Elektrolyten im Betrieb minimiert werden. Auch die Verringerung der Entflammbarkeit des Elektrolyten spielt eine wichtige Rolle. Alle zuvor genannten Faktoren können durch die Optimierung des Elektrolyten hinsichtlich der Lösungsmittel, Salze und Additive verbessert werden.

In SIB kommen größtenteils PC-basierte Lösungsmittel zum Einsatz. Diese werden häufig mit EC oder EMC kombiniert. Als gängigstes Lösungsmittel hat sich fluoriertes

Ethylencarbonat (FEC) erwiesen, welches dem Elektrolyten zu 5–10 vol % beigegeben wird. FEC hat sich in zahlreichen Studien als das beste Additiv (unter anderem mit dem häufig bei LIB verwendeten Vinylencarbonat (VC) verglichen) zur Bildung einer dünneren SEI-Schicht und gleichzeitig einer besseren Coulomb-Effizienz bei der Formierung erwiesen. Gleichzeitig konnte in weiteren Untersuchungen nachgewiesen werden, dass das FEC eine Reihe positiver Wechselwirkungen mit anderen Additiven aufweist, die die SEI-Schichtbildung weiter verbessern und stabilisieren sowie die Entflammbarkeit herabsetzen können. Das genaue Verständnis über die positive Wirkung des FEC ist aktuell noch Forschungsgegenstand. Des Weiteren gilt diese nur eingeschränkt für die Verwendung von  $\text{NaPF}_6$  als Leitsalz. Mit anderen Leitsalzen wurden schlechtere Ergebnisse erzielt. Darüber hinaus erlaubt das FEC den Einsatz nicht flammbarer Lösungsmittel wie Trimethylphosphat oder Triethylphosphat.

Weitere Additive sind beispielsweise Ethoxy(pentafluor)cyclotriphosphazen (EFPN, flammhemmend, Verbesserung der Zyklenlebensdauer), Adiponitril (ADN, Verbesserung der Anodenstabilität) oder Bernsteinsäureanhydrid (SA, Verbesserung der Temperaturstabilität), die vielversprechende Ergebnisse zeigten [40].

Insgesamt ist die Forschung an Elektrolyten für SIB aufgrund der Vielzahl an Kathoden – und Anodenmaterialien, Leitsalzen, Lösungsmitteln und Additiven noch nicht abgeschlossen und ideale Kombinationen müssen noch identifiziert werden. Auf Vorerfahrungen durch LIB kann häufig nur anfänglich zurückgegriffen werden, da die chemischen Unterschiede zwischen Natrium und Lithium bereits zu groß sind.

## 4.3. Übersicht der Forschungs- und Industrieakteure

Seitdem CATL im Juli 2021 die erste Generation der vom Unternehmen entwickelten SIB vorgestellt hat, ist ein neues Level an öffentlichem Interesse gegenüber der LIB-Alternative entstanden [41]. Zuvor gab es neben diversen Grundlagenforschungsprojekten aber auch weitere Industrieakteure, welche die Kommerzialisierung der SIB vorantrieben. In diesem Kapitel soll eine kurze Übersicht der weltweiten Aktivitäten mit Fokus auf die Industrie gegeben werden. Die Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. So ist es insbesondere im asiatischen Raum schwer einen vollumfänglichen Überblick aller Unternehmen zu erlangen.

Vergleichbar mit den Akteuren in der Feststoffbatterieentwicklung lassen sich bei einer Analyse der Industrieakteure von SIB die Unternehmen in zwei Gruppen unterteilen. Zum einen versuchen die etablierten Zellhersteller mit ihrer Erfahrung, insbesondere bei der großskaligen Fertigung, die Entwicklung von SIB voranzutreiben. Dem gegenüber stehen Start-Ups, teilweise Ausgründungen von Forschungseinrichtungen, welche zumeist aufgrund innovativer Materialinnovationen die Kommerzialisierung ihrer Produkte realisieren möchten. Eher mit geringeren TRL-Leveln befassen sich Forschungseinrichtungen, welche beispielsweise neue Aktivmaterialkombinationen testen.

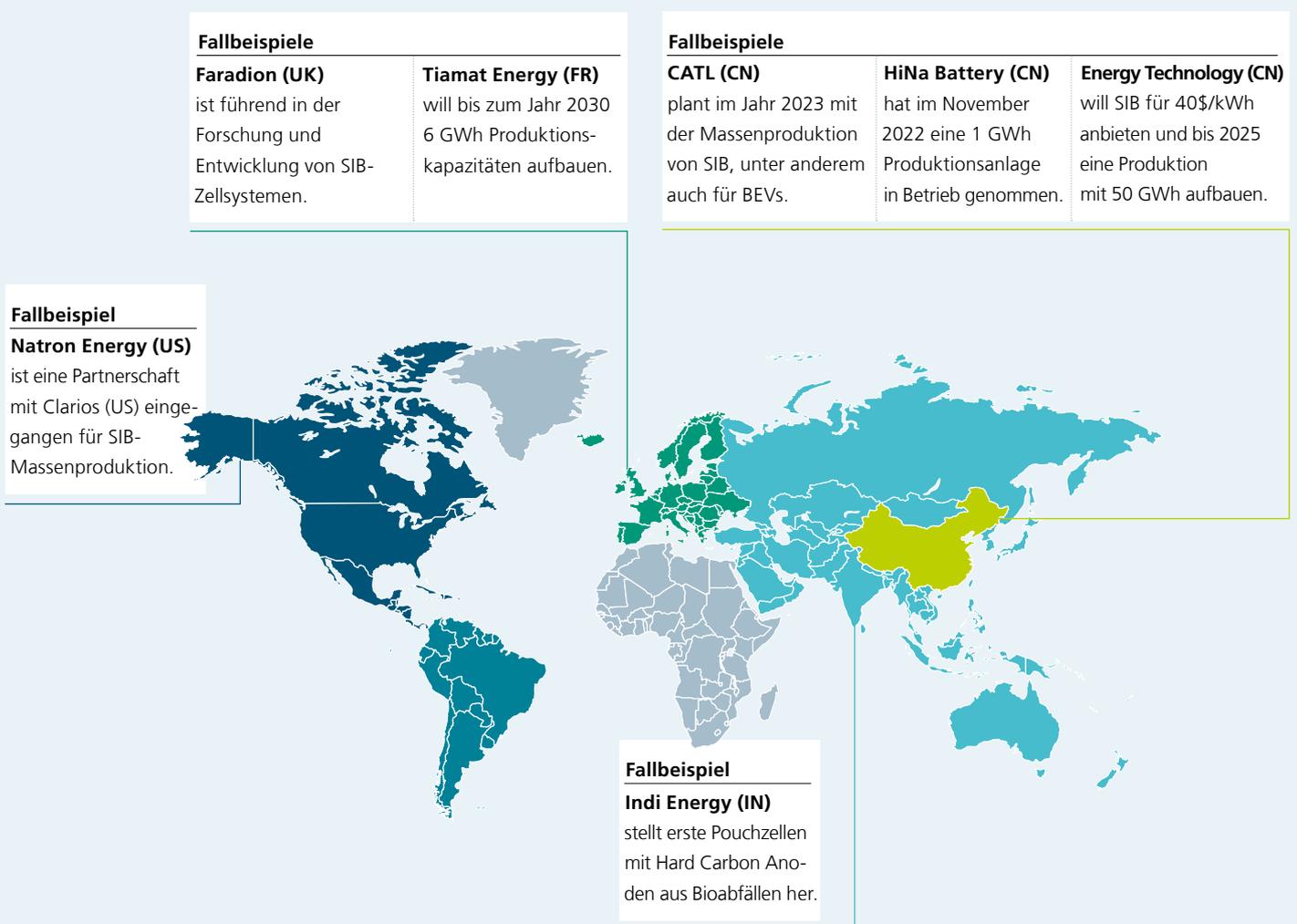
## Vorgestellte SIB-Produkte

Hersteller realisieren ihre (zumeist) Prototypzellen oftmals entweder in zylindrischen Zellen [42-44] oder in Pouchzellen [42,45,46]. Nur wenige Zellhersteller, wie High Star oder Pylion Zellen, bieten SIB in prismatischem Zelldesign an. Zudem zeigte CATL bei ihrer SIB Ankündigung bereits ein gerendertes Bild einer prismatischen Zelle [21,47]. Perspektivisch könnten also alle Zellformate, wie auch bei der LIB, kommerzialisiert werden.

Für die kommerzialisierten Zellkonzepte kommen bisweilen meist Hard Carbon Anoden sowie unterschiedliche Kathodenmaterialien (siehe Kapitel 3) zum Einsatz. Schichtoxide setzen beispielsweise der britische Hersteller Faradion ein, sowie Hena Battery, SVOLT, LiFun und Energy Technology aus China.

[42,45,48-50] Die Serienentwicklung der Zellen ist bereits fortgeschritten. Hena Batterys hat Produktionskapazitäten von 1 GWh SIB geplant und will diese perspektivisch auf 5 GWh erweitern. Die Batterien konnten bereits in Solarspeichern sowie in einem Pilotfahrzeug von JAC verbaut werden (siehe Kapitel 5). Bereits 2015 stattete Faradion ein eBike mit SIB Pouchzellen aus. Durch eine Kooperation mit AMTE Power (GB) soll zusätzliches Prozessverständnis für die Produktion erlangt werden. Mittlerweile hat das Unternehmen mehrere Batteriegenerationen entwickelt. SVOLT ist in der Entwicklungsphase und hat erste Zellen vorgestellt. LiFun sowie Energy Technology haben bereits Prototypzellen demonstriert und stellten konkrete Pläne für die Massenproduktion ab 2023 vor. Die in den Zellen realisierten Energiedichten reichen aktuell von 100 Wh/kg (Energy Technology) bis 160 Wh/kg (Faradion und CATL).

**Abbildung 15: Weltweite Fallbeispiele für den Aufbau von SIB-Zellproduktionen.**



Die Abbildung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die geographische Zuordnung erfolgt auf der Grundlage der rechtlichen Hauptsitze der Unternehmen

Die erste SIB mit PBA-Kathodenmaterial wurde 2015 von Sharp Laboratories of America validiert. Novasis Energy baute auf diesem Wissen auf und entwickelte eine Testzelle mit 100-130 Wh/kg Energiedichte (sowie 150-210 Wh/l) [42,51]. Auch Zellen mit PBA-Kathode sind in der Regel mit einer Hard Carbon Anode ausgestattet. Das US Start-Up Natrion Energy forscht hingegen an SIB mit PBAs auf Anoden und Kathodenseite. Deren Zellen erreichen 130-160 Wh/kg und sind auf viele (>50.000) Schnellladungsvorgänge bei teilweise über 12C ausgelegt [42,52,53]. Auch Novasis Energy, ebenfalls aus den USA, hat Testzellen mit 100-130 Wh/kg bzw. 150-210 Wh/l sowie PBA Kathoden- und HC Anodenmaterial realisiert. Die bereits genannte CATL Ankündigung sieht ebenfalls eine PBA Kathode, zusammen mit einer Hard Carbon Anode vor. Das Unternehmen plant im Laufe dieses Jahres die Massenproduktion zu starten sowie die zugehörigen Lieferketten aufzubauen. Neben der ersten Generation mit 160 Wh/kg ist bereits eine zweite Generation mit 200 Wh/kg in der Produktpipeline.

Als dritte Kathodenmaterialmöglichkeit gibt es die polyanionischen Materialien. Im Jahr 2015 konnte Tiamat (bzw. damals RS2E) eine 18650 Prototypenzelle mit einer polyanionischen Kathode präsentieren. Unter den Industrieakteuren entwickelt zudem das chinesische Start-Up Zoolnasm ersten Prototypzellen-Konfigurationen mit Natrium-Ionen Technologie.

Neben den genannten Unternehmen, bei denen schon einige Details zu ihren (zukünftigen) Zellprodukten bekannt sind, gibt es weitere Akteure, welche die SIB in den nächsten Jahren kommerzialisieren wollen. Zellhersteller wie BYD und Farasis planen noch dieses Jahr mit einer Massenmarkteinführung sowie die Zellintegration in BEVs (siehe auch Kapitel 5) [54,55].

### Preisliche Entwicklung und Aussicht

Aufgrund der Neuheit der Ankündigungen gibt es noch keine valide Preiseinschätzung für SIB beim Produktionsstart der einzelnen Unternehmen. Obwohl es Kosteneinsparpotenziale gibt, werden die Zellen bei Markteinführung und fehlender Skalierung zunächst nur bedingt günstiger sein als LIB. Faradion gab 2018 in einer Kostenabschätzung die (auf realistische Produktionsdurchsätze skalierten) Rohstoffkosten mit einem Wert von 150 USD/kWh an. Energy Technology aus China hat als zukünftiges Preisziel 40 USD/kWh ausgegeben, was als sehr optimistisch angesehen werden kann.

Neben Industrieakteuren beschäftigen sich international Forschungsinstitute wie das zuvor genannte Sharp Laboratories of America in den USA, das AIT in Österreich oder Institute wie das CNRS oder CEA in Frankreich mit der Weiterentwicklung von Natrium-Ionen-Batterien. Auch in Deutschland ist die ausgeprägte Forschungslandschaft involviert in Förderprojekte. Ein kleiner Auszug aus unterschiedlichen EU-Projekten bzw. öffentlichen Förderinitiativen in Deutschland sind zusammen mit den Industrieankündigungen im Anhang gelistet.

Einzelne Industrieakteure fallen durch ihre Patentanmeldungen auf. Faradion beispielsweise hat bereits über 21 aktive Patentfamilien sowie weitere Patentanmeldungen. Außerdem sind Natron Energy, HiNa Battery und CATL aktiv im Patentieren ihrer SIB Technologie. [49,50] Neben den Zellherstellern mit expliziten Produktankündigungen kann davon ausgegangen werden, dass auch weitere Hersteller sich zur Zeit aktiv mit der Forschung und Entwicklung von SIB beschäftigen.

Das Dachkonzept des BMBF hat explizit Entwicklungsziele für die SIB festgelegt. Genannt werden unter anderem Maßnahmen zur Hochskalierung von Aktivmaterialien oder der Forschung an der »Drop-In« Fähigkeit bei einer Umstellung von bisherigen Produktionsprozessen der LIB auf die neue Technologie. Langfristig gibt es konkrete Zielvorstellungen diverser KPIs (z.B. spezifische Energie >190 Wh/kg, Zyklusfestigkeit > 3.500).

Werden global alle Produktionsankündigungen aufaddiert, so ist diesen zu Folge Ende 2023 eine Produktionskapazität von über 8 GWh errichtet. Außer den 0,6 GWh Batterieproduktionskapazität von Natron Energy in den USA findet die restliche Zellproduktion ausschließlich in China statt. Transimage mit 4,5 GWh installierter Produktionskapazität sticht als momentan größter Hersteller heraus. Diese Angaben können jedoch nicht validiert werden. In den nächsten Jahren, insbesondere bis zum Ende des Jahrzehnts, wird sich die Kapazität schnell erhöhen. Bis 2025 sind den gesammelten Ankündigungen zufolge ca. 16 GWh Fertigungskapazität installiert, bis 2030 könnte die Kapazität auf über 75 GWh ansteigen. Mit 50 GWh hat Energy Technology davon die größten Ausbaupläne.

# Anwendungen und Integrationskonzepte

---

# 5. Anwendungen und Integrationskonzepte

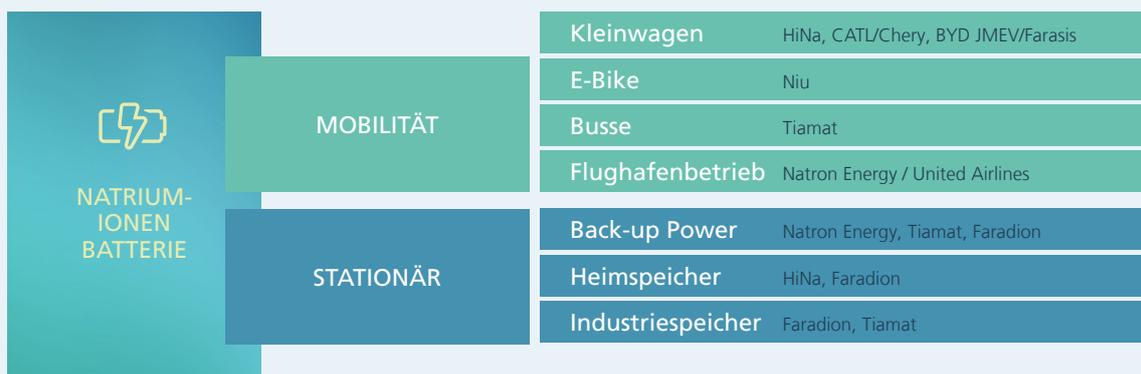
## 5.1. Roadmaps und Ziele

Aktuelle Ankündigungen und Kommerzialisierungen für SIB sind im Anhang zusammengefasst. Im amerikanischen Raum stehen insbesondere industrielle Anwendungen im Vordergrund. Diese verteilen sich sowohl auf stationäre Bereiche wie die Verwendung als Power Backup in Data Centers, als auch auf mobile Bereiche wie die Elektrifizierung des Bodenbetriebs in Flughäfen. Der asiatische Markt hingegen hat nicht zuletzt durch die Ankündigung von CATL zur Applikation von SIB in EV, zunächst in einem hybriden System bestehend aus LIB und SIB, im Jahr 2021 für großes Aufsehen gesorgt. Darüber hinaus haben auch weitere chinesische OEMs angekündigt SIB in Kleinwagen oder auch 2W-Anwendungen sortenrein zu integrieren. Die europäischen Ankündigungen für Anwendungen beschränken sich eher auf Start-Ups, welche planen ihre entwickelten SIB, sowohl in stationären Anwendungen, als auch in EVs, und eBikes zu integrieren. Im Folgenden werden die Ankündigungen nach Anwendungsfeld genauer beschrieben.

Während Studien berichten, dass SIB hinsichtlich ihrer Prozessierbarkeit eng an die Eigenschaften von Li-Ionen Zellen anknüpfen, so unterscheiden sie sich hinsichtlich ihrer Zelleigenschaften (z.B. Energiedichte) deutlich von ihnen.

Dies hat einen Einfluss auf ihre jeweils möglichen Endanwendungen. So werden Anwendungen, die über einen langen Zeitraum viel Energie benötigen, weitgehend ausgeschlossen. Wie in Kapitel 4 erläutert, sind Beispielzellen in allen drei großen Zellformaten bekannt. Entsprechend den Ankündigungen der Na-Ionen Zellen produzierenden Unternehmen und den vorliegenden Marktstrukturen, kann eine grobe Zuordnung von prismatischen Zellen und für (insbesondere in Kleinserien gefertigten Stückzahlen) Pouch-Zellen für hybride und kleine elektrische Fahrzeuge festgestellt werden. Insbesondere mit Blick auf diese, sowie die weitere Kernanwendung in denen die SIB ihre Stärken ausspielen kann, nämlich den stationären Energiespeichern, können außerdem zylindrische Batteriezellen (18650, 21700, 26700) Einsatz finden. [50] Gerade die zylindrischen Zellen passen vor dem Hintergrund ihrer preiswerten und hochstandardisierten Fertigungsmöglichkeiten hervorragend zu den Eigenschaften von Natrium-Ionen Zellen und eignen sich potentiell als Energiespeicherlösung für sehr kostensensible Endanwendungen (bspw. High-Power Zellen für kleine Geräte und Power Tools, sowie als günstige Volumenzelle in Schwellenländern und elektrischen Kleinfahrzeugen). [56]

**Abbildung 16: Schematische Darstellung der Bandbreite möglicher SIB-Anwendungen.**



## Stationäre Speicher

Die Firma Natron Energy bietet eine Lösung für eine Backup-Stromversorgung für Data Center [57] auf PBA-Basis für Anode und Kathode und einem wässrigen Elektrolyten. Die PBA-Aktivmaterialien werden im Auftrag durch die in der Schweiz ansässige Chemiefirma Arxada hergestellt [19]. Die Batterie wurde speziell für schnelle Lade- und Entladezyklen entwickelt und kann zudem je nach Anwendung zwischen 50.000 und 100.000 Entladezyklen bieten. Ein weiterer Vorteil dieser Batterie ist ihre Fähigkeit, bei starken Temperaturschwankungen zu funktionieren.

Ein weiteres bemerkenswertes Energiespeichersystem ist der HiNa 1 MWh-Speicher, der in Taiyuan, China, erfolgreich in Betrieb genommen wurde [58]. Dieses System dient der Speicherung von Solarenergie und intelligenten Mikronetzsystemen. Die spezifische Energie der Zellen soll Werte von über 105 Wh/kg für zylindrische Zellen und 140 Wh/kg für Pouch-Zellen erreichen. Das Speichersystem soll bei Raumtemperatur eine Lebensdauer von 6.000 Zyklen bei 100 % DOD (Depth of Discharge) erreichen. Dieser Meilenstein wurde durch eine Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Physik der Chinesischen Akademie der Wissenschaften und HiNa Battery Technology Co. Ltd. erreicht.

## Mobile industrielle Anwendungen

Natron Energy stellt SIB her, die sich für den Einsatz in bodennahen Industrieanwendungen, wie beispielsweise Flurförderfahrzeuge, eignen. Diese Batterien können vielfältig eingesetzt werden, beispielsweise zum Laden von Elektro-Bodenfahrzeugen oder zum Aufladen von Elektroflugzeugen. Die Firma erläutert einen großen Vorteil der SIB aufgrund ihrer Nicht-Brennbarkeit (wässriger Elektrolyt), wodurch sie sicher in Bodenoperationen verwendet werden könne. Natron hat Pläne, die Produktion von SIB in seiner Produktionsstätte in Michigan zu beschleunigen. Eine Investition von United Airlines [59] ist Teil ihrer Nachhaltigkeitsstrategie. Durch die Zusammenarbeit mit Natron Energy treibt United Airlines die Elektrifizierung des Bodengeräts voran.

## Automotive Traktionsbatterien

CATL hat im Juli 2021 mit der SIB eine Alternative zur LIB in automobilen Anwendungen vorgestellt [47]. Diese zeichnet sich durch eine für Natrium-Ionen-Anwendungen hohe spezifische Energie von bis zu 160 Wh/kg und eine schnelle Ladezeit

von 15 Minuten auf 80 % bei Raumtemperatur aus. CATL plant den Aufbau einer Lieferkette für diese Technologie bis 2023 und arbeitet bereits an einer nächsten Generation mit einer spezifischen Energie von 200 Wh/kg. Eine weitere Besonderheit dieser Meldung ist die angekündigte Kompatibilität mit LIB (hybride Packs) unter Nutzung der Cell-to-Pack-Technologie, um die Reichweite von Fahrzeugen zu erhöhen.

HiNa Battery ist ebenfalls ein chinesischer Batteriehersteller und der erste, der SIB in Elektrofahrzeugen einsetzt [60]. Das Testfahrzeug Sehol E10X, das in Zusammenarbeit mit JAC und Volkswagen Anhui entwickelt wurde, ist das erste Auto, das mit dieser Technologie ausgestattet ist. Es verfügt über eine Batteriekapazität von 25 kWh und eine spezifische Energie von 120 Wh/kg.

Ein weiterer chinesischer Batteriehersteller, Farasis Energy, soll bald Jiangling Motors Electric Vehicle (JMEV) mit SIB für den E-Kleinwagen EV3 beliefern [61]. Farasis hat seine Produktionslinien bereits für die Herstellung von SIB-Zellen umgerüstet und plant, die Massenproduktion in 2023 zu starten.

Im Juli 2023 hat die chinesische Firma Jiangsu Transimage Tech bekanntgegeben einen Auftrag eines deutschen Automobilherstellers für ihre SIB erhalten zu haben. Damit ist es das erste chinesische Unternehmen, das eine internationale Bestellung für solche Batterien bekanntgab. Der Kunde bleibt anonym, sei jedoch ein renommierter deutscher Automobilhersteller mit mehreren bekannten Marken. Der Auftrag umfasst eine vergleichsweise kleine Menge SIB. Transimage hat eine Kapazität von 4,5 GWh, der Umsatz mit SIB betrug von Januar bis Juni 3,23 Millionen RMB (449.300 USD) [62].

## Mikromobilität

Gerade im Bereich der Mikromobilität, die von den eBikes, über eScooter und E-Motorrädern auch Lastenfahrräder oder „TukTuks“ bis hin zu kleinen vierrädrigen Fahrzeugen umfasst, bietet sich die SIB aufgrund der vergleichsweise niedrigen Performanceanforderungen als Lösung an. Der Elektrofahrzeughersteller Niu plant beispielsweise für das Jahr 2023 die Markteinführung eines E-Zweirads mit SIB [63]. Das Hauptziel besteht darin, die Kosten gegenüber den herkömmlichen LIB zu reduzieren. Trotz des höheren Gewichts bietet die SIB-Variante bei gleicher Reichweite den Vorteil eines günstigeren Preises. Niu hat bisher keine Informationen darüber preisgegeben, wer die SIB-Zellen liefern wird oder welche Spezifikationen diese haben werden.

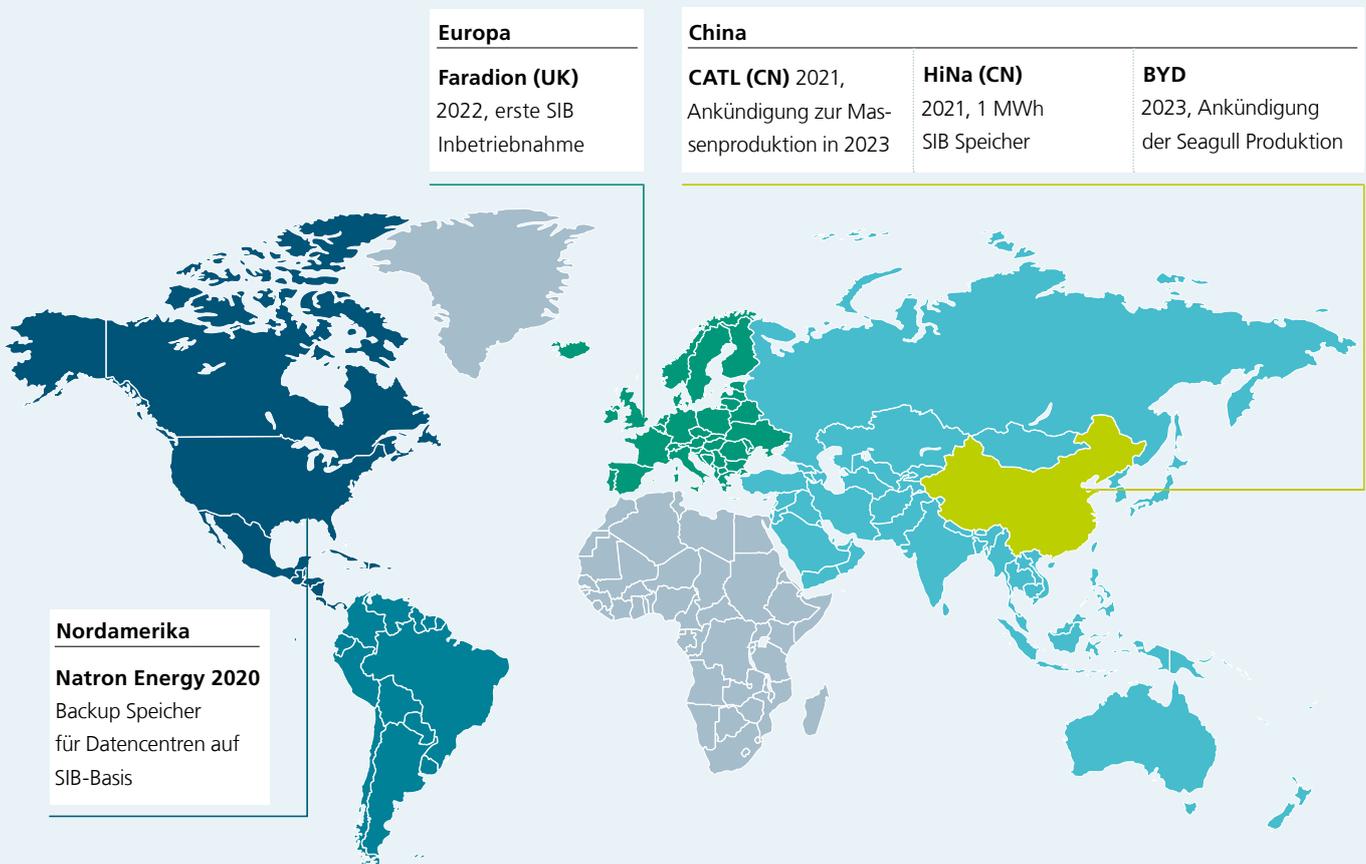
### Zeitliche Entwicklung der SIB-Ankündigungen und Markterwartung

Abb. 17 zeigt unterschiedliche SIB-Nachfrageszenarien im Zeitraum bis 2030 auf Basis verschiedener Marktstudien. Im Untersuchungszeitraum zeigt sich eine hohe Streuung und in 2030 reicht die Spannweite von rund 35 GWh bis hin zu rund 580 GWh in sehr optimistischen Projektionen. Zusätzlich sind zwei Bandbreiten zur Plausibilisierung eingezeichnet. Hierzu wurden Lernraten auf Basis der historischen Entwicklung von Wachstumsraten über die kumulierte Nachfrage analysiert und ermittelt. Der rote Korridor ergibt sich durch die höchsten chemieübergreifenden (NMC, NCA, LFP, LMO, etc.) historischen Wachstumsraten für LIB. Dieser repräsentiert daher ein sehr optimistisches Szenario. Dem gegenüber basiert der orangene Korridor auf den ermittelten historischen Wachstumsraten von Li-LFP als SIB-Vergleichstechnologie in einem gemäßigeren Szenario. Je nach angenommenem

Startwert in 2023 (0,01 bis 0,05 GWh für SIB) ergibt sich im gemäßigten Szenario eine Nachfrage von 3-8 GWh im Jahr 2026 sowie 9-14 GWh im sehr optimistischen Szenario (siehe Abb. 18). Unter Annahme der beiden Wachstumsszenarien wächst die Nachfrage bis 2030 stark an und liegt zwischen 125-175 GWh im gemäßigten sowie 290-400 GWh im sehr optimistischen Szenario. Neben der Betrachtung mittels Lernkurven ist oftmals eine Spiegelung der getätigten Projektionen anhand der demgegenüber stehenden Marktbedarfe hilfreich. Zu diesem Zweck sind in Abb. 18b nochmals die SIB-Projektionen aus Abb. 18a für das Jahr 2030 in grau aufgetragen. Vergleichend hierzu finden sich in grün die erwartete Gesamtmarktgröße in GWh für bestimmte Anwendungen, für die SIB in Frage kommen dürften.

Abb. 18b verdeutlicht, dass es zur Erreichung der SIB-Marktgröße von 100 GWh beispielsweise ausreichend wäre, wenn bis 2030 alle eBikes und LSEV (Low Speed Vehicles =

**Abbildung 17: Globale Verteilung großer Ankündigung für die Integration von SIB in Endanwendungen.**



Kleinfahrzeuge) mit SIB ausgestattet würden. Ein Markt von etwa 100 GWh kann für diesen Zeitpunkt daher als erreichbar, bzw. im Vergleich zu den anderen Prognosen als eher konservativ betrachtet werden. Würden zusätzlich alle Gabelstapler (inkl. verwandter Funktionen) und auch alle neuen LIB-basierten stationären Speicher (ESS) [66] mit SIB ausgestattet, so entspräche dies einer Marktgröße von 300 bis 400 GWh in 2030. Darüberhinausgehende Projektionen bedeuten, dass z.B. der gesamte Markt für ESS und zusätzlich noch ein Teil des Marktes für PKW und Busse mit SIB ausgestattet werden müssten. Entsprechende Prognosen können aus Sicht der SIB also eher als optimistisch eingestuft werden.

Zum Vergleich sei gesagt, dass heute der gesamte Markt für Blei-Säure-Batterien (LAB) bei etwa 400-450 GWh liegt und somit in den kommenden sieben Jahren ein SIB-Markt entstehen müsste, der vom Volumen her mit dem heutigen und über viele Jahrzehnte gewachsenen Markt für LAB vergleichbar ist. Auch aus Sicht der Applikationen scheinen Szenarien in diesem Umfang sehr ambitioniert. Da ein Umstieg auf SIB auch ein Redesign vieler Anwendungen erfordern würde, erscheint eine

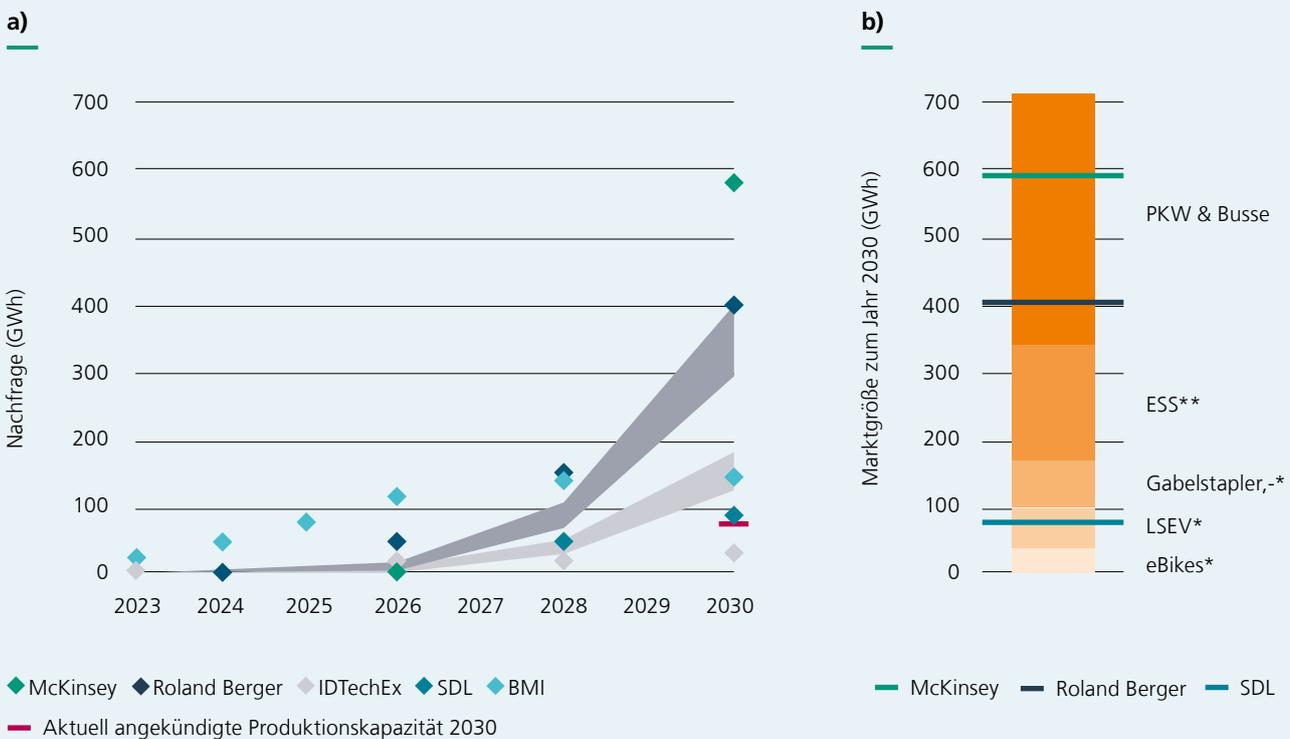
komplette Umstellung ganzer Märkte wie eBikes, Gabelstapler, Kleinfahrzeuge, etc. in Anbetracht der riesigen Produktpalette bis 2030 eher nicht nachvollziehbar.

Auch wenn die Entwicklung des Bedarfes nach SIB zum heutigen Zeitpunkt nur schwer eingeschätzt werden kann, gehen wir aufgrund der geschilderten Einordnungen, davon aus, dass Szenarien im Umfang mehrerer 100 GWh bis 2030 nur äußerst schwer zu verwirklichen sein dürften. SIB werden sicherlich Ihre Vorteile in den genannten Anwendungen LSEV, Gabelstapler, eBikes und ESS einbringen und dort auch relevante Marktanteile gewinnen. Bis 2030 ist es jedoch unwahrscheinlich, dass es dabei zu einer vollständigen Substitution der dort vorherrschenden Batterietechnologien kommen dürfte. Auch in PKWs und Bussen werden SIB zum Einsatz kommen, wobei sie jedoch aufgrund der hohen Performanceanforderungen eher noch eine vergleichsweise untergeordnete Rolle spielen dürften. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen gehen wir davon aus, dass sich der Markt für SIB im Jahr 2030, je nach Diffusionsgeschwindigkeit, in einem Bereich zwischen 100 und maximal 400 GWh, bewegen dürfte.

**Abbildung 18:**

**a) Projektion der SIB-Nachfrage bis 2030 auf Grundlage von Marktstudien [50,64,65] und der Annahme zu LFP bzw. LIB äquivalenten Wachstumsraten.**

**b) Batterie Gesamtbedarf nach Anwendungen (orange) vs. erwartete SIB-Nachfrage im Jahr 2030. Eigene Darstellung mit Informationen aus Avicenne\* [67], Roland Berger (LIB)\*\* [68] und [64].**



Maximale Lernraten – abgeleitet aus den historischen Wachstumsraten (materialübergreifend)

LFP-Lernraten – abgeleitet aus den historischen Wachstumsraten

## 5.2. (F&E)-Herausforderungen

### BMS-Konzepte:

Das BMS ist ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von SIB für mobile Anwendungen. Die meisten verfügbaren wissenschaftlichen Literaturquellen zur Batteriemodellierung basieren auf LIB. Die grundlegenden Prinzipien dieser Modelle gelten auch für SIB. Es gibt jedoch nicht viele Studien zur Simulation von SIB in Bezug auf Wärmeerzeugung, Temperaturverteilung, Degradationsmechanismen und insbesondere Detektion des Thermal Runaway [23,69]. Um jedoch eine schnelle kommerzielle Anpassung von SIB zu ermöglichen, sind vollwertige Batteriesimulationen erforderlich, um deren thermische Stabilität, Zyklusleistung, Alterungsmechanismen und andere Eigenschaften zu untersuchen.

### Smart Integration:

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die kostengünstige und energiedichteoptimierte Integration von SIB, auch als "Smart Integration" bezeichnet. Die Entwicklung geeigneter Batteriepacks stellt eine große Herausforderung für Unternehmen dar,

die SIB verwenden möchten. Das CTP-Konzept («cell-to-pack») von z.B. BYD zeigt, wie eine Batteriechemie mit geringerer

Energiedichte (LFP) dennoch Fahrreichweiten liefern kann, die denen von NMC/NCA-basierten Elektrofahrzeugen ähnlich sind. Aus der Sicht der Grundprinzipien gibt es keinen Grund, warum SIB-Packs nicht auch solche "Struktur-Batterie"-Ansätze nutzen können. Möglicherweise ist jedoch eine einzigartige strukturelle Batterielösung für die Natrium-Ionen-Technologie erforderlich. Das CTP-Konzept könnte für die Natrium-Ionen-Chemie einfacher umzusetzen sein als sogar für die LFP-Chemie, aufgrund der ggf. geringeren Wärmeerzeugung von SIB [70]. Eine umfangreiche weitere Forschung wäre jedoch erforderlich, um dies endgültig zu bestätigen. Natrium-Ionen CTP-Batterien für Elektrofahrzeuge könnten den Fahrzeugherstellern eine kostengünstige und nachhaltige Option für Fahrzeuge mit moderater Reichweite bieten.

Schließlich ist die Entwicklung von Fertigungstechnologien auf Packebene für kommerzielle SIB von großer Bedeutung. Dies umfasst die Entwicklung der CTP-Technologie, die dazu beiträgt, die Energiedichte des Batteriepacks zu verbessern.

## 5.3. Übersicht der Forschungs- und Industrieakteure

Die aktuelle intensive Dynamik in der Forschung und Entwicklung zu SIB wurde maßgeblich durch technologische Fortschritte von asiatischen Firmen hervorgerufen. Die Aktivitäten in Europa wurden infolgedessen insbesondere mit dem Ziel der erfolgreichen Realisierung von Material- und Zellkonzepten vorangetrieben – ein "Tech Pull" durch europäische Integratoren, welche SIB-Zellen für ihre Anwendung nicht nur gefordert, sondern auch bereits genutzt hätten, lässt sich nicht beobachten. Aktuell sichtbare Aktivitäten konnten im Rahmen dieses Berichts nur in zwei öffentlich geförderten F&E-Projekten ausgemacht werden. In den vom Wirtschaftsministerium

Baden-Württemberg geförderten Projekten NAWIN und PRONTO [71,72] beforscht das Fraunhofer ISE die Entwicklung von Natrium-Ionen-Batterien zum Einsatz in stationären Speichersystemen. In dem im Horizon 2020 Programm geförderten Projekt NAIMA (2019-2023) hat das Konsortium rundum das Start-Up TIAMAT drei Business-Cases für Natrium-Ionen-Batterien durch die Umsetzung von Prototypen evaluiert (Netzspeicher, Industriespeicher, Heimspeicher) [20]. Über diese Aktivitäten hinaus, steht eine konkrete Positionierung der großen europäischen Akteure, wie bspw. die Automobilkonzerne, noch aus.

# Innovationspfade an der Fraunhofer FFB

---

# 6. Innovationspfade an der Fraunhofer FFB

Zur Unterstützung der europäischen Batterieindustrie errichtet die Fraunhofer-Gesellschaft unter dem Namen "Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB" in Münster für insgesamt 680 Millionen Euro eine weltweit einzigartige, offene Batteriezellfabrik im Gigawatt-Maßstab. In dieser Forschungsfabrik können neue Produktionstechnologien erprobt und neue Batterietechnologien hergestellt werden. Die theoretische Produktionskapazität der Fraunhofer FFB beträgt bis zu 7 GWh pro Jahr (Elektrode) und es können alle gängigen Zellformate (zylindrisch, Pouch, prismatisch) hergestellt werden. Für eine genauere Beschreibung der Fraunhofer FFB und ihrer Infrastruktur sei auf Referenz [3] verwiesen. Die Fabrik ist für alle Akteure aus Industrie und Forschung offen. Durch diese entstehende Großforschungsinfrastruktur und Fachexpertise kann ein wichtiger Beitrag für Stakeholder aus Industrie und Forschung zur Entwicklung und Industrialisierung von

Lithium-Ionen- und Natrium-Ionen-Batterien geleistet werden. Bereits heute entwickeln Teams an und mit der Fraunhofer FFB erste Natrium-Ionen-Batteriezellen und erproben deren Produktion.

Eine Projektinitiative der Fraunhofer FFB mit Beteiligung von Standortpartnern aus Industrie und Forschung zum strukturierten Aufbau von Kernkompetenzen auf dem Feld der Natrium-Ionen-Batterien wird im Rahmen des EFRE-Programms des Landes NRW gefördert. Konkret ist geplant, dass die Fraunhofer FFB Fragestellungen der weiteren Skalierung der Natrium-Ionen Zellfertigung übernimmt, während die übrigen Partner Aktivitäten der Materialanalyse und -synthese sowie der Packfertigung und Systemkonfiguration bearbeiten. Damit nimmt die Fraunhofer FFB ihre zugeordnete Funktion als Beschleunigungseinheit und Transferplattform auch für aussichtsreiche, neben der

Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf des weiteren Aufbaus der FFB und der Integration von F&E-Aktivitäten zur SIB.



Lithium-Ionen Zelle bestehende Zellchemien, wie das Aktivitätsfeld der Natrium-Ionen Zellen im Rahmen des "Dachkonzepts Batterieforschung" des BMBF wahr.

Für die Fraunhofer FFB steht hier insbesondere das Ziel der Demonstration einer skalierbaren Fertigung von SIB in einem industriell relevanten Maßstab bis 2026 im Arbeitsfokus.

**„Fast Track“-Arbeiten zur Realisierung eines schnellen Einstiegs in die Natrium-Ionen Zellforschung und -fertigung:**

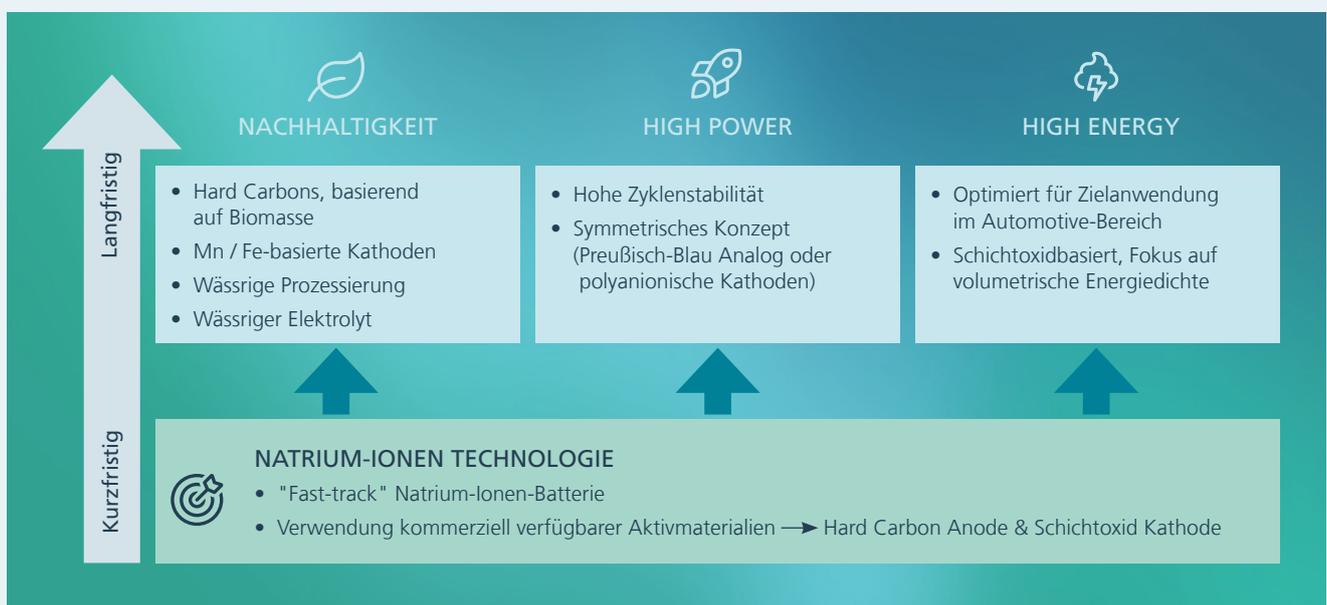
Zum Zeitpunkt der Verschriftlichung des hier vorliegenden Berichts im Jahr 2023 erfolgt die wässrige Prozessierung von Hard Carbons (HC) mit einem CMC/SBR-Bindersystem in den Räumlichkeiten des »FFB Workspace«. Das Hauptziel ist zunächst die Etablierung einer »Fast-track«-Natrium-Ionen-Batterie unter Verwendung kommerziell verfügbarer Aktivmaterialien, nämlich einer Hard Carbon Anode (siehe Kapitel 3.1.2) und einer Schichtoxid Kathode (siehe Kapitel 3.1.1). Dies dient der Überprüfung der »Drop-In«-Fähigkeit der SIB-Technologie. Um eine schnelle Selbstbefähigung zu erreichen, werden zahlreiche Synergien und Erkenntnisse aus der Lithium-Ionen-Batterietechnologie genutzt. Dazu gehören Pränatrierung, Na-Festkörperzellen, Anodenanreicherung mit Zinn, HP-Zellen (High Power) und polyanionische Zellen, die intrinsisch stabil sind. Durch diese Ansätze soll eine SIB-Technologie entwickelt werden, welche in den Leistungseigenschaften aber auch den Zellkosten die Lücke zur Lithiumeisenphosphat

(LFP)-Technologie auf Packebene schließt, bzw. im Fall der Energiedichte sogar einen Gewinn erzielt. Ein wichtiger Aspekt besteht darin ein anwendungsorientiertes und bedarfsgerechtes »Zell-Portfolio« zu entwickeln, um die Diversifizierung voranzutreiben.

**Langfristiger Aktivitätsschwerpunkt der Fraunhofer FFB zur Skalierungsforschung und Aufbau eines Zellportfolios für SIB**

Nach dem initialen Aufbau der grundlegenden Prozessierungsfähigkeit von SIB-Zellen an der Fraunhofer FFB sind im Weiteren, und zeitlich nach der initialen Inbetriebnahme der »FFB-PreFab« angesiedelt, vor allem Skalierungsforschungen, insbesondere im Hinblick auf großformatige Zellen und möglicherweise auch Cell-to-Pack-Konzepte, geplant. Es werden unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt, wie zum Beispiel High-Energy-Zellen mit Blick auf den Automobilbereich als potenzielle Ergänzung zur LFP-Zelle. Hierbei werden schichtoxidbasierte Materialien betrachtet, um eine höhere Volumenenergiedichte zu erzielen. Ein weiterer Fokus liegt auf High-Power-Zellen, die anwendungsbedingt oft auch eine hohe Zyklenlebensdauer aufweisen müssen. Hier werden symmetrische Konzepte auf Basis von Preußisch-Blau-Analoga (PBA) oder polyanionischen Kathoden in Betracht gezogen. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Nachhaltigkeit gelegt, beispielsweise durch die Verwendung von Hard Carbons auf Basis von Biomasse und Schichtoxiden ohne Nickelanteile (derzeit 25-30 %). Es wird erwartet, dass Mangan (Mn) und Eisen (Fe) als

**Abbildung 21: Darstellung der Forschungsfelder zu SIB an der FFB. Zeitnaher Fokus auf Erarbeitung einer funktionsfähigen SIB („fast-track“). Langfristige Ausrichtung auf drei Schwerpunktthemen „Nachhaltigkeit“, „High-Power“ und „High-Energy“.**



Nickel-Ersatzmaterialien dienen können. Die wässrige Prozessierung und möglicherweise ein wässriger Elektrolyt werden in Betracht gezogen. Langfristig wird die wässrige Prozessierung von SIB-Kathodenaktivmaterialien, wie PBA und Schichtoxiden, als Ziel betrachtet. Dies ist besonders wichtig, da ein mögliches Verbot von PFAS (Per- und Polyfluoralkylsubstanzen) innerhalb der EU auch in nicht wässrigen, sondern lösungsmittelbasierten Pastenrezepturen häufig verwendete Materialien wie PVDF und PTFE betrifft.

### Transfer von Innovationen und Technologien in die Industrie

Die gemeinsame Entwicklung von Innovationen und die Weiterentwicklung von Technologien mit der Industrie ist Hauptziel der Fraunhofer FFB. Ein Technologietransfer in die Industrie wird somit als natürlicher Abschluss oder Anschluss aller Forschungsaktivitäten an der Fraunhofer FFB gesehen. Die Generierung von Einnahmen für Industrie- und Forschungspartner aus dem Einsatz entsprechender Technologien haben den Anspruch die zuvor getätigten Investitionen in F&E-Arbeiten von öffentlicher und industrieller Seite idealerweise mindestens zu decken und zu nachhaltiger Wertschöpfung beizutragen. Dieser Anspruch besteht auch für die Ergebnisverwertung zu SIB, auch wenn sich diese heute noch auf einem gegenüber LIB niedrigeren TRL bewegen.

Für den Transfer von technologischem Wissen existieren diverse Verwertungswege, die in Abhängigkeit der entsprechenden Kooperationsvereinbarungen mit der Fraunhofer FFB zur Technologieentwicklung im Nachgang zum Einsatz kommen können. Der Regelfall einer Technologieentwicklung mit Partnern an der Fraunhofer FFB sieht vor, dass diese bereits vorhandenes geschütztes Wissen bei Kooperationsbeginn einbringen (Background-IP). Eine Voraussetzung zur Initiierung einer zur Fraunhofer FFB Mission kompatiblen Kooperation liegt darin, dass die Partner eine Verwertungsbereitschaft in Form der gegenseitigen Erteilung von Nutzungsrechten (wenn beidseitige IP benötigt wird / vorhanden ist) zeigen.

Die Fraunhofer FFB wird in ihrer Rolle als Einrichtung der öffentlichen F&E-Landschaft zur Batteriezellfertigung wissenschaftliche Erkenntnisse in Form von Publikationen der breiten Öffentlichkeit aus Forschung und Industrie zugänglich machen,

um ihrer Aufgabe der unabhängigen Wissensgeneration und Dissemination gerecht zu werden. Implizites Wissen, also "Know-How", zur praktischen Nutzung und dessen bedarfsgerechte Anpassung auf industrielle Akteure, wird in Form von Beratungsdienstleistungen angeboten.

Liegen die wissenschaftlichen Erkenntnisse in Form technologischer Problemlösungen vor, können sich die Anmelder durch die Einreichung von Patenten ein rechtlich exklusives Nutzungsrecht auf Zeit als Aufwandsentschädigung für die Entwicklungsleistung sichern. Die Fraunhofer FFB arbeitet wie auch alle anderen Akteure der öffentlichen F&E-Landschaft zum Teil mit öffentlichen Mitteln und hat daher die Aufgabe Wissen langfristig und unabhängig dem Geltungsbereich des jeweiligen Fördergebers (z. B. des deutschen Wirtschaftsraums) zur Verfügung zu stellen. Erwünscht ist daher, dass in kooperativer Forschungsarbeit geschaffene Erfindungen durch die Fraunhofer-Gesellschaft angemeldet und gehalten werden. Kooperationspartner erhalten generell die Option auf nichtausschließliche Nutzungsrechte (Lizensierung) zu beihilferechtskonformen Bedingungen. Der Innovationspfad sieht somit eine industrielle Verwertung unter Rückgriff auf das angemeldete IP direkt beim Industriepartner vor. Nur in gesonderten Ausnahmefällen werden dem Kooperationspartner das Eigentum oder auch unbeschränkte Exklusivrechte an dem im Auftrag entstandenen IP der Fraunhofer-Gesellschaft übertragen bzw. eingeräumt. Entscheidend dafür ist der Wert für das Patent- und Technologieportfolio der Fraunhofer-Gesellschaft und die Möglichkeit, die Ergebnisse auch auf anderen Anwendungsbereichen oder über andere Transferpfade zu verwerten.

Zeichnen sich, trotz des generellen gegenseitigen Interesses an einer Zusammenarbeit, nicht zu überwindende Schwierigkeiten bei der Einigung von IP-Fragen ab, kann der Wechsel von »F&E-Kooperation« zu »Auftragsforschung« als Arbeitsmodus eine geeignete Lösung darstellen. In dem Fall, dass sich kein Industriepartner im Forschungskonsortium befindet und auch während des laufenden F&E-Projekts kein Interesse an einer Verwertung geäußert wurde, existiert die Möglichkeit der direkten Verwertung von geschütztem Wissen aus dem öffentlichen F&E-Umfeld durch die Gründung eines Spin-Offs. Eine Übersicht an Entscheidungsmöglichkeiten zur direkten Verwertung mit Kooperationspartnern ist nachfolgend abgebildet.

# Anhang & Literaturverzeichnis

---

# Anhang

## Übersicht Industrie und Forschungsaktivität Zellproduktion

Akteur	Hauptsitz	Kurzbeschreibung	Quelle
<b>Zellhersteller</b>			
AMTE Power	GB	In der Entwicklung ist die Ultra Safe Pouchzelle (auf Grundlage Faradion NIB IP): 135-140 Wh/kg, 215-280 Wh/l, > 1000 Cycles, 30 Ah Zelle bei 3,1 V, geplante Produktion von 0,5 GWh bis 2025	[46,50]
BYD/FinDreams	CN	Plant Kombinierte NIB/LIB Technologie auf Packebene, Markteinführung 2023 im BYD Seagull, mit Huaihai Kooperation für eine Produktionsstätte - Ziel ist es größter Anbieter von NIB Systemen für Kleinstfahrzeuge zu werden	[54]
CATL	CN	Markteinführung 2023, zunächst 160 Wh/kg, später Produktgeneration 200 Wh/kg, Schnellladefähigkeit (15 min auf 80%), 90% Kapazitätserhaltungsrate bei -20°C, PBA Kathode zusammen mit Hard Carbon Anode, will auf Packebene NIB und LIB kombinieren, angebliche Zellkosten zunächst bei 77 USD/kWh, später bei 40 USD/kWh	[41,47, 54,73, 74]
Energy Technology	CN	NIB Sample Rundzellen, 3,2 V und 8 Ah mit aktuell 100 Wh/kg, Ende 2023 155 Wh/kg, Preistarget 40 USD/kWh, aktuell angeblich 1 GWh Fertigungskapazität, 2023 5 GWh und 2025 50 GWh, Zellaufbau: NaMnO <sub>2</sub> Schichtoxid-Kathode + Hard Carbon Anode + Anoden Aluminium Stromableiter + Natrium Hexafluorophosphat Elektrolyt + Ethanol Lösungsmittel	[44]
Eve Energy	CN	F&E an zylindrischen NIB mit 135 Wh/kg und 90% Kapazitätserhaltungsrate bei 10°C, Zellen besitzen Schichtoxid-Kathode sowie Hard Carbon Anode	[43,50]
Faradion / Reliance	GB	160 Wh/kg, 270-290 Wh/l, 3000 Zyklen, 4C Schnellladung, -30-80°C Temperaturbereich, Lagerung/Transport bei 0V, 12 Ah prototype, SIB für eBike im Jahr 2015 (400 Wh Pack aus Pouchzellen mit Na <sub>a</sub> N <sub>11-x-y-z</sub> Mn <sub>x</sub> Mg <sub>y</sub> Ti <sub>z</sub> O <sub>2</sub> Kathode), Rohstoffpreis bei rund 150 USD/kWh, wurde an Reliance Industries nach Indien verkauft und plant wohl eine Gigafactory in Indien (3 GWh bis 2024)	[42,45, 49]
Farasis	CN	Massenproduktion (1 GWh) soll 30.6.23 in Gigafactory in Ganzhou starten	[55]
High Star	CN	Produktion von Prismatischen Zellen (70 und 80 Ah) sowie 18650 Rundzellen (1,3 Ah) mit bis zu 135 Wh/kg, sowie 1500-2000 Zyklen	[21]
HiNa Battery	CN	140 Wh/kg Zelle, sowohl 10 Ah Pouchzelle als auch 18650 und 26650 Rundzellen, 3000 Zyklen mit 3C, -40-80°C Temperaturbereich, Schichtoxid-Kathode (Cu-basiert), spätere Batteriegeneration 180-200 Wh/kg und über 8000 Zyklen, 5 GWh Gigafactory geplant, 1 GWh Produktionskapazität wurde im November 2022 in Betrieb genommen (Fuyang, China)	[42,75]
Huaihai	CN	Hersteller von Zwei- und Dreirädern investiert zusammen mit BYD in NIB Produktionsstätte	
Indi Energy	IN	Pouchzellen mit Hard Carbon Anoden aus Bioabfällen für alle Anwendungen	[50,76]

Akteur	Hauptsitz	Kurzbeschreibung	Quelle
<b>Zellhersteller</b>			
LiFun Technology	CN	Ab 2023 Pouchzellen in Massenproduktion mit 140 Wh/kg und 240 Wh/l, die nächste Generation soll 160 Wh/kg und 280 Wh/l ermöglichen, Ladung innerhalb 15 min auf 80 %. 88 % Kapazitätserhaltung bei -20 °C, 4000 Zyklen mit Schichtoxid Kathode und Hard Carbon Anode	[50,77]
Natron Energy	US	Spin-Off der Stanford University, Pouchzellen mit <50 Wh/kg, 30s mit 775 W/kg bzw. 1550 W/l, >50.000 Zyklen, >12C, PBA auf Anoden und Kathodenseite, wässriges Elektrolyt, Partnerschaft mit Clarios für die Massenproduktion (0,6 GWh) der Zellen ab 2023	[42,52, 53,78, 79]
Novasis Energy	US	Testzelle, 100-130 Wh/kg, 150-210 Wh/l, Flächenladung von 2 mAh/cm <sup>2</sup> , bis 5 V, erste Zelle mit Na <sub>x</sub> MnFe(CN) <sub>6</sub> PBA Kathode und HC Anode mit, Entwicklung mit Goodenough	[42,51]
Puna	CN	18650, 26700 und 32140 Rundzellen, 100-150 Wh/kg und 240-260 Wh/l, Temperaturrange: -40-80°C, 90% Kapazitätserhaltungsrate bei -20 °C, 2000-3000 Zyklen, bis zu 20C möglich, Gigafactory mit 0,5 GWh in Betrieb	[21]
Phylion	CN	Prismatische 20 Ah Zelle, 2000 Zyklen, Maximal 2C, -30-60 °C Temperaturrange, 70 % Kapazitätserhaltungsrate bei -30 °C	[21]
SVOLT	CN	Prototyp Zelle mit 100 Wh/kg und Schichtoxid-Kathoden, 135 Wh/kg bis Anfang 2023, später im Jahr sollen 160 Wh/kg sowie >2000 Zyklen mit den Zellen erreicht werden können	[50,81]
Tiamat Energy	FR	Spin Off RS2E, 2015 erste Sample 18650 Rundzelle (damals RS2E) mit Na <sub>3</sub> V <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> F <sub>3</sub> Polyanionische Kathode, HC Anode, und 90 Wh/kg, spätere Weiterentwicklung von TIAMAT erreicht Leistungsdichten von 2-5 kW/kg und ca. 120 Wh/kg, 4000-8000 Zyklen möglich, Ziel ist eine Produktion von 6 GWh bis 2030, strategische Kooperation mit Zenergy (China)	[42,48, 50]
Transimage	CN	Unternehmen wurde 2007 gegründet und hat seit April 2023 4,5 GWh Produktionskapazität für Rundzellen im Format 18650 und 26700	[62]
Zoolnasm	CN	Start-Up im Jahr 2021 gegründet, erste Sample Zellen mit unterschiedlichen Aktivmaterialkombinationen (unter anderem polyanionische Materialien) mit teilweise 120 Wh/kg und über 6000 Zyklen, plant eine 5 GWh Factory	[50, 81,82]

Akteur	Hauptsitz	Kurzbeschreibung	Quelle
<b>Forschungseinrichtung</b>			
AIT	AT	Hat Forschungseinheit mit Thema Beyond Lithium, in der u.a. auch Natrium-Ionen-Batterien beforscht werden	[83]
BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)	DE	Betreibt Forschungskonsortium für SIB Herstellung	[84]
CEA	FR	Hat zusammen mit CNRS erste 18650 NIB Rundzelle entwickelt	[51]
CNRS	FR	Hat zusammen mit CEA erste 18650 NIB Rundzelle entwickelt mit damals 90 Wh/kg und 2000 Zyklen	[51]
HU Berlin	DE	Materialforschung für SIB (AG Prof. Adelhelm)	[85]
Sharp Laboratories of America	US	Validierung der ersten PBA 3 V Na <sub>1,92</sub> Fe(Fe(CN) <sub>6</sub> ) Zelle 2015 durch Unterstützung/ Finanzierung von ARPA-E	[42]

Akteur	Hauptsitz	Kurzbeschreibung	Quelle	
<b>Förderprogramme/-projekte</b>				
BMBF	Dachkonzept	DE	Hochskalierung von NIB Kathodenmaterials im industriell relevanten Maßstab, „Drop-In“-Fähigkeit bei der NIB Produktion soll demonstriert werden, langfristig sollen definierte KPIs wie Lebensdauer (> 3.500 Zyklen) und Energiedichten (> 190 Wh/kg) erreicht werden, zudem soll in Deutschland mindestens eine Pilotanlage für die NIB Produktion erfolgreich demonstriert werden	[86]
BMBF	STOREENERGY	DE	Entwicklung von Elektrodenmaterialien für stationäre Natrium-Ionen-Batterie-Speichersysteme für die kostengünstige und effiziente Speicherung erneuerbarer Energien (2019 abgeschlossen)	[87]
BMBF	TRANSITION	DE	Natrium-Ionen-Batterie-Demonstratoren für mobile und stationäre Energiespeicher (2022 abgeschlossen)	[87]
EU	Mixed Anion Cathodes	EU	Designing of Novel Mixed Anion Compounds as High Voltage and High Energy Density Sodium-ion Battery Cathodes	[88]
EU	NAIMA	EU	Na-Ion Materials as Essential Components to manufacture robust battery cells for non-automotive applications	[89]
EU	OptiCarb	EU	Optimising hard carbon anodes for efficient energy storage in sodium-ion batteries	[90]
EU	SEED	EU	Solvated Ions in Solid Electrodes: Alternative routes toward rechargeable batteries based on abundant elements	[91]
EU	SIMBA	EU	Sodium-Ion and sodium Metal Batteries for efficient and sustainable next-generation energy storage	[92]
DFG	POLIS	DE	Exzellenzcluster POLiS (Post Lithium Storage)	[93]

# Literaturverzeichnis

---

- [1] MetaMarktMonitoring LIB, Fraunhofer ISI 2023, Das MetaMarktMonitoring ist eine Integration und Meta-Analyse von Marktanalysten, Datenquellen, sowie Fraunhofer ISI Batterie-markt Modellen. Die genutzten Daten stammen beispielsweise von Avicenne, BNEF, Takeshita B3, Benchmark Minerals, Yole, F&S, SNE, Yano, P3, UBS, FEV, Syrah, Roland Berger, Wood Mackenzie, IEA sowie aus vielen weiteren Quellen.
- [2] Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, Förderkennzeichen 03XP0256, 03XP0416A, Gesamtvorhaben: Forschungsfertigung Batteriezelle Deutschland, "FoFeBat".
- [3] B. Bürklin, T. Latz, L. Schenk, F. Degen, M. Diehl, O. Krätzig, T. Paulsen, S. Wessel, A. Kampker, N. Lackner, C. Neef, T. Wicke, Umfeldbericht zum europäischen Innovationssystem Batterie 2022, Fraunhofer IPT, Fraunhofer FFB, Fraunhofer ISI, PEM RWTH Aachen, 2022 [https://www.forschungsfertigung-batteriezelle.fraunhofer.de/content/dam/ipt/forschungsfertigung-batteriezelle/Dokumente/Fraunhofer\\_Umfeldbericht\\_Innovationssystem\\_Batterie\\_2022.pdf](https://www.forschungsfertigung-batteriezelle.fraunhofer.de/content/dam/ipt/forschungsfertigung-batteriezelle/Dokumente/Fraunhofer_Umfeldbericht_Innovationssystem_Batterie_2022.pdf)
- [4] Scopus.com by Elsevier
- [5] Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of the mineral commodity salt, United States Geological Survey USGS, 2023, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-salt.pdf>
- [6] V.M. Sedivy, Upgrading and refining of salt for chemical and human consumption, Salt Partners, Zurich, Switzerland, <https://www.salt-partners.com/pdf/Ahmedabad2006P.pdf>
- [7] B. Sayahpour, H. Hirsh, S. Parab et al. Perspective: Design of cathode materials for sustainable sodium-ion batteries, MRS Energy & Sustainability 9, 183–197, 2022, <https://doi.org/10.1557/s43581-022-00029-9>
- [8] K.M. Abraham, Intercalation positive electrodes for rechargeable sodium cells, Solid State Ionics 7(3), 199-212, 1982, [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(82\)90051-0](https://doi.org/10.1016/0167-2738(82)90051-0)
- [9] L.-F. Zhao, Z. Hu, W.-H. Lai, Y. Tao, J. Peng, Z.-C. Miao, Y.-X. Wang, S.-L. Chou, H.-K. Liu, S.-X. Dou, Hard Carbon Anodes: Fundamental Understanding and Commercial Perspectives for Na-Ion Batteries beyond Li-Ion and K-Ion Counterparts, Advanced Energy Materials 11(1), 2002704, 2021, <https://doi.org/10.1002/aenm.202002704>
- [10] X. Dou, I. Hasa, D. Saurel, C. Vaalma, L. Wu, D. Buchholz, D. Bresser, S. Komaba, S. Passerini, Hard carbons for sodium-ion batteries: Structure, analysis, sustainability, and electrochemistry, Materials Today 23, 87-104, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.12.040>
- [11] L. Fang, N. Bahlawane, W. Sun, H. Pan, B. B. Xu, M. Yan, Y. Jiang, Conversion-Alloying Anode Materials for Sodium Ion Batteries, Small 17(37), 2101137, 2021, <https://doi.org/10.1002/smll.202101137>
- [12] J. Xiao, X. Li, K. Tang, D. Wang, M. Long, H. Gao, W. Chen, C. Liu, H. Liu, G. Wang, Recent progress of emerging cathode materials for sodium ion batteries, Materials Chemistry Frontiers, 5, 3735-3764, 2021, <https://doi.org/10.1039/D1QM00179E>
- [13] T. Perveen, M. Siddiq, N. Shahzad, R. Ihsan, A. Ahmad, M. Imran Shahzad, Prospects in anode materials for sodium ion batteries - A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 119, 109549, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109549>
- [14] Nippon Electric Glass NEG, The First Exhibit of All-Oxide All-Solid-State Sodium (Na) Ion Secondary Battery –World Smart Energy Week–, <https://www.neg.co.jp/en/news/20220315-4660.html>
- [15] GlobeNewsWire, Global Industrial Salt Industry to 2025 - Key Players, 2020, <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/04/08/2013483/0/en/Global-Industrial-Salt-Industry-to-2025-Key-Players-Include-Cargill-Tata-Chemical-Compass-Minerals-Among-Others.html>

- [16] CIECH S.A.: Soda ash, <https://ciechgroup.com/en/relacje-inwestorskie/o-ciech/business/soda-segment/soda-ash/>
- [17] Argus Media, China to promote sodium-ion batteries during 2021-25, 2021, <https://www.argusmedia.com/en/news/2247600-china-to-promote-sodiumion-batteries-during-202125>
- [18] Altris, Altris to Manufacture Ground-breaking Cathode Material in Sandviken, Sweden, 2022, <https://news.cision.com/altris-ab/r/altris-to-manufacture-ground-breaking-cathode-material-in-sandviken--sweden.c3544005>
- [19] Arxada, Natron and Arxada Announce World's First Large-Scale Production of Battery Grade Preußisch Blue Materials, 2022, <https://www.arxada.com/en/media/2022/Oct-18>
- [20] Zabala Innovation Consulting, NAIMA Project, <https://naimaproject.eu/>
- [21] Shmuel de-Leon, Sodium Ion (Na- Ion) Battery Market 2023 – The Next Technology Ready for Mass Production, Presentation at AABC Europe 2023
- [22] N. Tapia-Ruiz et al, Roadmap for sodium-ion batteries 2021, J. Phys. Energy 3, 031503, 2021, 10.1088/2515-7655/ac01ef
- [23] D. Velumani, A. Bansal, Thermal Behavior of Lithium- and Sodium-Ion Batteries: A Review on Heat Generation, Battery Degradation, Thermal Runway – Perspective and Future Directions, Energy Fuels 36(23), 14000–14029, 2022 <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c02889>
- [24] I. Hasa, S. Mariyappan, D. Saurel, P. Adelhelm, A. Y. Kuposov, C. Masquelier, L. Croguennec, M. Casas-Cabanas, Challenges of today for Na-based batteries of the future: From materials to cell metrics, Journal of Power Sources 482, 228872, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228872>
- [25] The London Metal Exchange, [www.lme.com](http://www.lme.com)
- [26] G. G. Eshetu, G. A. Elia, M. Armand, M. Forsyth, S. Komaba, T. Rojo, S. Passerini, Electrolytes and Interphases in Sodium-Based Rechargeable Batteries: Recent Advances and Perspectives, Advanced Energy Materials 10(20), 2020, <https://doi.org/10.1002/aenm.202000093>
- [27] M. Wang, Q. Wang, X. Ding, Y. Wang, Y. Xin, P. Singh, F. Wu, H. Gao, The prospect and challenges of sodium-ion batteries for low-temperature conditions, Interdisciplinary Materials 1(3), 373-395, 2022, <https://doi.org/10.1002/idm2.12040>
- [28] C. Masquelier, J. Berry, Stanford Storage X International Symposium, 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=mG07pXAbqc4&list=PLyyl3ZP6Sz2I4SsJVbPNAr0CHI1XGlm&index=3>
- [29] B. Kishore, L. Chen, C. E. J. Dancer E. Kendrick, Electrochemical formation protocols for maximising the life-time of a sodium ion battery, Chemical Communications 85, 2020, <https://doi.org/10.1039/D0CC05673A>
- [30] K. Chayambuka, G. Mulder, D. L. Danilov, P. H. L. Notten, From Li-ion batteries toward Na-ion chemistries: challenges and opportunities Advanced Energy Materials 10, 2001310, 2020, <https://doi.org/10.1002/aenm.202001310>
- [31] J. Barker, R. J. Heap, N. Roche, C. Tan, R. Sayers, J. Whitley, Y. Lui, The commercialization of high energy density Na-ion battery technology 2nd Int. Symp. on Sodium Batteries, 2015
- [32] N. Yabuuchi, K. Kubota, M. Dahbi, S. Komaba, Research development on sodium-ion batteries Chem. Rev. 114 11636–11682, 2014, <https://doi.org/10.1021/cr500192f>
- [33] T. S. Pathan, M. Rashid, M. Walker, W. D. Widanage, E. Kendrick, Active formation of Li-ion batteries and its effect on cycle life, J. Phys. Energy 1 044003, 2019, DOI 10.1088/2515-7655/ab2e92
- [34] Y. Jin, P. M. L. Le, P. Gao et al, Low-solvation electrolytes for high-voltage sodium-ion batteries. Nat Energy 7, 718–725, 2022, <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01055-0>
- [35] J. Sun, I. E. Gunathilaka, L. A. O'Dell, P. C. Howlett, M. Forsyth, High-rate formation protocol enables a high ionic conductivity SEI for sodium-ion batteries, Journal of Power Sources 554, 232298, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232298>
- [36] S. Roberts, E. Kendrick, The re-emergence of sodium ion batteries: testing, processing, and manufacturability, Nano-technol Sci Appl, 11, 23-33, 2018, Doi: 10.2147/NSA.S146365
- [37] L. Mu, S. Xu, Y. Li, Y.-S. Hu, H. Li, L. Chen, X. Huang, Prototype Sodium-Ion Batteries Using an Air-Stable and Co/Ni-Free O<sub>3</sub>-Layered Metal Oxide Cathode, Advanced Materials 27(43), 6928-6933, 2015, <https://doi.org/10.1002/adma.201502449>

- [38] W. Haselrieder, S. Ivanov, H. Y. Tran, S. Theil, L. Froböse, B. Westphal, M. Wohlfahrt-Mehrens, A. Kwade, Influence of formulation method and related processes on structural, electrical and electrochemical properties of LMS/NCA-blend electrodes, *Prog. Solid State Chem.* 42 157–74, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2014.04.009>
- [39] P.-F. Wang, Y. You, Y.-X. Yin, Y.-G. Guo, Layered oxide cathodes for sodium-ion batteries: phase transition, air stability, and performance, *Advanced Energy Materials* 8, 1701912, 2018, <https://doi.org/10.1002/aenm.201701912>
- [40] B. Mosallanejad, S. S. Malek, M. Ershadi, A. A. Daryaknari, Q. Cao, F. B. Ajdari, S. Ramakrishna, Cycling degradation and safety issues in sodium-ion batteries: Promises of electrolyte additives, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 895, 115505, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115505>
- [41] S. Schaal / Rabbit Publishing GmbH, CATL will Natrium-Ionen-Batterie bis 2023 bringen, 2021, <https://www.electrive.net/2021/07/29/catl-will-natrium-ionen-batterie-bis-2023-bringen/>
- [42] E. Goikolea, V. Palomares, S. Wang, I. R. Larramendi, X. Guo, G. Wang, T. Rojo, Na-Ion Batteries—Approaching Old and New Challenges, *Advanced Energy Materials* 10(44), 2020, <https://doi.org/10.1002/aenm.202002055>
- [43] C. Werwitzke / Rabbit Publishing GmbH, Eve Energy baut F&E-Kapazitäten in China stark aus, 2023, <https://www.electrive.net/2023/01/03/eve-energy-baut-fe-kapazitaeten-in-china-stark-aus/>
- [44] J. Wan, LinkedIn, 2023, <https://www.linkedin.com/pulse/et-sib-na-ion-battery-roadmap-jerry-wan/>
- [45] A. Rudola, A. J. R. Rennie, R. Heap, S. S. Meysami, A. Lowbridge, F. Mazzali, R. Sayers, C. J. Wright, J. Barker, Commercialisation of high energy density sodium-ion batteries: Faradion's journey and outlook, *Journal of Materials Chemistry A* 9, 8279–8302, 2021, <https://doi.org/10.1039/D1TA00376C>
- [46] Amte Power, Introducing our smartest technologies, 2022, <https://amtepower.com/wp-content/uploads/2022/08/Ultra-Safe-Leaflet.pdf>
- [47] Contemporary Amperex Technology, CATL Unveils Its Latest Breakthrough Technology by Releasing Its First Generation of Sodium-ion Batteries, 2021, <https://www.catl.com/en/news/665.html>
- [48] SAS Tiamat, <http://www.tiamat-energy.com/>
- [49] Faradion Limited, <https://faradion.co.uk/technology-benefits/>, <https://faradion.co.uk/about-us/intellectual-property/>
- [50] IDTechEx, Sodium-ion Batteries 2023-2033: Technology, Players, Markets, and Forecasts, 2023
- [51] A. Bauer, J. Song, S. Vail, W. Pan, J. Barker, Y. Lu, The Scale-up and Commercialization of Nonaqueous Na-Ion Battery Technologies, *Advanced Energy Materials* 8(17): Sodium-Ion Batteries, 2018, <https://doi.org/10.1002/aenm.201702869>
- [52] Natron Energy, Blue Pack Industrial Power Battery, 2023, [https://natron.energy/wp-content/uploads/natron\\_collateral\\_BluePack\\_Industrial\\_Power\\_Battery\\_021723.pdf](https://natron.energy/wp-content/uploads/natron_collateral_BluePack_Industrial_Power_Battery_021723.pdf)
- [53] S. Cheng, T. Wen, M. Wang / Deloitte, China Lithium Industry, Deloitte POV 2.0: "Battery of the Time", 2022, [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/strategy/deloitte\\_cn\\_lithium\\_pov\\_%202\\_en\\_20220406.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/strategy/deloitte_cn_lithium_pov_%202_en_20220406.pdf)
- [54] S. Schaal / Rabbit Publishing GmbH, Natrium-Ionen-Zellen von CATL und BYD kommen wohl noch 2023 in E-Autos, 2023, <https://www.electrive.net/2023/04/21/natrium-ionen-zellen-von-catl-und-byd-kommen-wohl-noch-2023-in-e-autos/>
- [55] S. Schaal / Rabbit Publishing GmbH, 2023, <https://www.electrive.net/2023/03/01/china-farasis-liefert-natrium-ionen-batterien-an-jmev/>
- [56] S. Link, C. Neef, T. Wicke, T. Hettesheimer, M. Diehl, O. Krätzig, F. Degen, F. Klein, P. Fanz, M. Burgard, R. Kleinert, Development perspectives for lithium-ion battery cell formats, Fraunhofer ISI, Fraunhofer IPA, Fraunhofer FFB, Fraunhofer ICT, 2022, [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2022/Development\\_perspectives\\_for\\_lithium-ion\\_battery\\_cell\\_formats\\_Fraunhofer\\_2022.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2022/Development_perspectives_for_lithium-ion_battery_cell_formats_Fraunhofer_2022.pdf)
- [57] Businesswire, Natron Energy Introduces Blue Rack Sodium-Ion Battery Cabinet for Data Centers and Mission Critical Applications, 2022, <https://www.businesswire.com/news/home/20221012005289/en/Natron-Energy-Introduces-Blue-Rack%E2%84%A2-Sodium-Ion-Battery-Cabinet-for-Data-Centers-and-Mission-Critical-Applications>
- [58] Medium, News: The World's First 1 MWh Na-Ion Battery for Solar Energy Storage and Smart Microgrid System are Operating, 2021, <https://medium.com/batterybits/news-the-worlds-first-1-mwh-na-ion-battery-for-solar-energy-storage-and-smart-microgrid-system-4ef14699063c>
- [59] CISION PR Newswire, United Airlines Invests in Battery-Maker Natron Energy With Eye Toward Further Electrifying Ground Operations, 2022, <https://www.prnewswire.com/news-releases/united-airlines-invests-in-battery-maker-natron-energy-with-eye-toward-further-electrifying-ground-operations-301689521.html>

- [60] L. Kang / CnEVPost, Hina Battery becomes 1st battery maker to put sodium-ion batteries in EVs in China, 2023, <https://cnevpost.com/2023/02/23/hina-battery-puts-sodium-ion-batteries-in-sehol-e10x/>
- [61] T. Shihua, China's Farasis Energy to Supply Sodium-Ion Batteries to Renault's Jiangling Motors, 2023, <https://www.yicaglobal.com/news/china-farasis-energy-to-supply-sodium-ion-batteries-to-renault-jiangling-motors>
- [62] P. Zhang / CnEVPost, Chinese tech firm Transimage secures order for sodium-ion batteries from German automaker, 2023, <https://cnevpost.com/2023/07/24/transimage-secures-order-for-sodium-ion-batteries-german-automaker/>
- [63] P. Zhang / CnEVPost, Niu Technologies to launch e-bikes with sodium-ion batteries in 2023 as lithium battery prices rise, 2022, <https://cnevpost.com/2022/08/07/niu-to-launch-e-bikes-with-sodium-ion-batteries-in-2023/>
- [64] Konferenzbeiträge der Analysten Roland Berger, Shmuel De Leon und McKinsey auf der Battery Show Europe, Stuttgart, 2023
- [65] S. Moore / Benchmark Mineral Intelligence, <https://source.benchmarkminerals.com/article/sodium-ion-2030-pipeline-capacity-hits-150-gwh-as-cathode-trends-emerge> (Link nicht mehr erreichbar, Prognose abrufbar über LinkedIn-Beitrag: [https://www.linkedin.com/posts/simon-moores-b0661418\\_sodium-lithium-activity-7076289009282371584-9kW-?utm\\_source=share&utm\\_medium=member\\_ios](https://www.linkedin.com/posts/simon-moores-b0661418_sodium-lithium-activity-7076289009282371584-9kW-?utm_source=share&utm_medium=member_ios)), 2023
- [66] Die Prognosen für den stationären Markt weisen große Spannen auf und gehen bis über 1200 GWh (BNEF, [66]) in 2030. Die hier unterlegten Werte von Roland Berger [64] beziehen sich zwar nur auf LIB, erscheinen jedoch eher pessimistisch. <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-to-grow-15-fold-by-2030/>
- [67] Avicenne Energy, The Worldwide rechargeable Battery Market 2021 –2030, 2022
- [68] W. Bernhard / Roland Berger, Digging deeper: How to manage supply chain risk for lithium-ion batteries, 2022, <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Digging-deeper-How-to-manage-supply-chain-risk-for-lithium-ion-batteries.html>
- [69] K. M. Abraham, How Comparable Are Sodium-Ion Batteries to Lithium-Ion Counterparts?, ACS Energy Lett. 5(11), 3544–3547, 2020, <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.0c02181>
- [70] M. Fichtner, Recent Research and Progress in Batteries for Electric Vehicles, Batteries & Supercaps 5(2), e202100224, 2022, <https://doi.org/10.1002/batt.202100224>
- [71] NAWIN Projekt, Fraunhofer ISE, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/nawin.html>
- [72] PRONTO Projekt – Production of Sodium-Ion Batteries in Baden-Württemberg, Fraunhofer ISE, <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/pronto.html>
- [73] P. Adelhelm, Natrium-Ionen-Batterien, Materialien und Anwendungen, Vortrag Batterieforum, 2023
- [74] J. Opletal, Sodium-ion batteries from CATL and BYD to be installed in mass-produced cars by Q4 2023, 2023, <https://carnewschina.com/2023/04/20/catl-and-byd-sodium-ion-batteries-will-be-put-into-a-mass-produced-car-in-q4-2023/>
- [75] S. Schaal / Rabbit Publishing GmbH, Chinesischer Hersteller setzt erstmals Natrium-Ionen-Zellen im E-Auto ein, 2023, <https://www.electrive.net/2023/02/23/chinesischer-hersteller-setzt-erstmal-natrium-ionen-zellen-im-e-auto-ein/>
- [76] Indi Energy, Sodium-ion Batteries, <https://indienergy.in/sodium-ion-batteries/>
- [77] S. Wunderlich-Pfeiffer / Golem Media GmbH, Neue Natrium-Ionen-Akkus von Lifun aus China ab 2023, 2022, <https://www.golem.de/news/akkutechnik-neue-natrium-ionen-akkus-von-lifun-aus-china-ab-2023-2205-165120.html>
- [78] R. Gaida / BurdaForward GmbH, Natrium-Ionen-Batterie: Der unsterbliche Akku geht in Massenproduktion, 2022, [https://efahrer.chip.de/news/natrium-ionen-batterie-der-unsterbliche-akku-geht-in-massenproduktion\\_108014](https://efahrer.chip.de/news/natrium-ionen-batterie-der-unsterbliche-akku-geht-in-massenproduktion_108014)
- [79] S. Schaal / Rabbit Publishing GmbH, United Airlines investiert in Entwickler von Natrium-Ionen-Batterien, 2022, <https://www.electrive.net/2022/12/08/united-airlines-investiert-in-entwickler-von-natrium-ionen-batterien/>
- [80] Panorica, Svolt makes the first 100 Wh/kg sodium battery for less than \$100, 2022, <https://www.panorica.com/svolt/svolt-makes-first-100-whkg-sodium-battery-less-100>
- [81] P. Zhang / CnEVPost, Sodium-ion battery startup Zoolnasm secures investment from property developer Country Garden, 2022, <https://cnevpost.com/2022/03/04/sodium-ion-battery-start-up-zoolnasm-secures-investment-from-property-developer-country-garden/>

- [82] Kallanish Commodities, Zoolnasm to construct 5 GWh sodium-ion battery project in Jiangsu, <https://www.kallanish.com/en/news/power-materials/market-reports/article-details/zoolnasm-to-construct-5-gwh-sodium-ion-battery-project-in-jiangsu-1222/>
- [83] S. Schaal / Rabbit Publishing GmbH, AIT gründet Batterie-Forschungseinheit, 2022, <https://www.electrive.net/2022/05/03/ait-gruendet-batterie-forschungseinheit/>
- [84] D. Sciurti / Rabbit Publishing GmbH, BAM will mit Kooperationsprojekt Natrium-Batterien-Technologie voranbringen, 2021, <https://www.electrive.net/2021/08/17/bam-will-mit-kooperationsprojekt-natrium-batterien-technologie-voranbringen/>
- [85] HU Berlin, Physical Chemistry of Materials, Electrochemistry, Batteries / Adelhelm Group, <https://adelhelmgroup.com/>
- [86] Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, BMBF-Dachkonzept Batterieforschung, 2023, [https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/bmbf-dachkonzept-batterieforschung-2023.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/bmbf-dachkonzept-batterieforschung-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=5)
- [87] Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. (KLiB), Projektdatenbank, <https://www.batterieforum-deutschland.de/projektdatenbank/>
- [88] Novel cathode materials for high-voltage, high-energy-density sodium-ion batteries, 898264, <https://cordis.europa.eu/project/id/898264>
- [89] Sodium-ion technology for solid cells, 875629, <https://cordis.europa.eu/project/id/875629>
- [90] Optimising sodium storage in a low-cost lithium battery alternative, 101025294, <https://cordis.europa.eu/project/id/101025294>
- [91] Solvated ions in solid electrodes for reversible energy storage based on abundant elements, 864698, <https://cordis.europa.eu/project/id/864698>
- [92] The future of energy storage, 963542, <https://cordis.europa.eu/project/id/963542>
- [93] Post Lithium Storage Cluster of Excellence/ Karlsruher Institut für Technologie KIT, <https://www.postlithiumstorage.org/de/>

# Danksagung

---

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), sowie für die Koordination der Projektdurchführung durch den Projektträger Jülich. Großer Dank gilt ebenfalls dem gesamten FoFeBat-Projektteam für die inhaltliche Unterstützung und im Besonderen Christoph Berger, Jonas Henschel und Saskia Wessel für die inhaltliche Korrektur dieses Berichts.

# Impressum

## Herausgeber

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB  
Bergiusstraße 8  
48165 Münster

## Förderung

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Heinemannstraße 2, 53175 Bonn-Bad Godesberg,  
Postanschrift 53170 Bonn  
www.bmbf.de  
Förderkennzeichen: 03XP0256



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

## Kontakt

Dr. Oliver Krätzig  
Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB  
oliver.kraetzig@ffb.fraunhofer.de  
Bergiusstraße 8  
48165 Münster  
<https://www.ffb.fraunhofer.de>

## Projektträger

Projektträger Jülich (PtJ)  
Neue Materialien und Chemie  
Werkstofftechnologie für Energie und Mobilität (NMT 1)  
52425 Jülich

## Layout

EARLZ GmbH

## Abbildungen

Alexander Sieffert und Tim Latz, Fraunhofer IPT

## Titelbild

Marius C. Merkel

© Fraunhofer Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB,  
Münster, September 2023

## Autoren (alphabetisch)

Dr. Florian Degen<sup>2</sup>  
Marcel Diehl<sup>2</sup>  
Dr. Tim Hettesheimer<sup>4</sup>  
Prof. Dr. Achim Kampker<sup>3</sup>  
Dr. Oliver Krätzig<sup>2</sup>  
Nikolaus Lackner<sup>3</sup>  
Steffen Link<sup>4</sup>  
Tim Latz<sup>1</sup>  
Dr. Christoph Neef<sup>4</sup>  
Dr. Thomas Paulsen<sup>2</sup>  
Inés Rosellón Inclán<sup>4</sup>  
Dr. Moritz Schaefer<sup>2</sup>  
Prof. Dr. Ulrich Schmoch<sup>4</sup>  
Dr. Richard Schmoch<sup>2</sup>  
Alexander Sieffert<sup>1</sup>  
Dr. Lukas Weymann<sup>4</sup>  
Tim Wicke<sup>4</sup>

1 Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT  
<https://www.ipt.fraunhofer.de/>

2 Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB  
<https://www.ffb.fraunhofer.de>

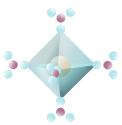
3 Production Engineering of E-Mobility Components PEM,  
RWTH Aachen University  
<https://www.pem.rwth-aachen.de>

4 Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI  
<https://www.isi.fraunhofer.de/>

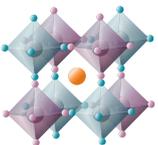
**Die Kristallstrukturabbildungen auf der Titelseite sind den folgenden Na-Verbindungen entlehnt:**



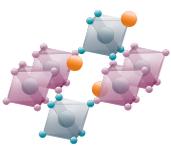
Kochsalz NaCl-Struktur:  
Na oktaedrisch durch Cl-Ionen koordiniert



Natriumcarbonat  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -Struktur:  
Na durch  $\text{CO}_3$ -Gruppen koordiniert.



Preußisch-Blau-Analog (PBA)  
kubischer  $\text{Na}_x\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  Polymorph  
mit  $\text{FeN}_6$ - und  $\text{FeC}_6$ -Gruppen

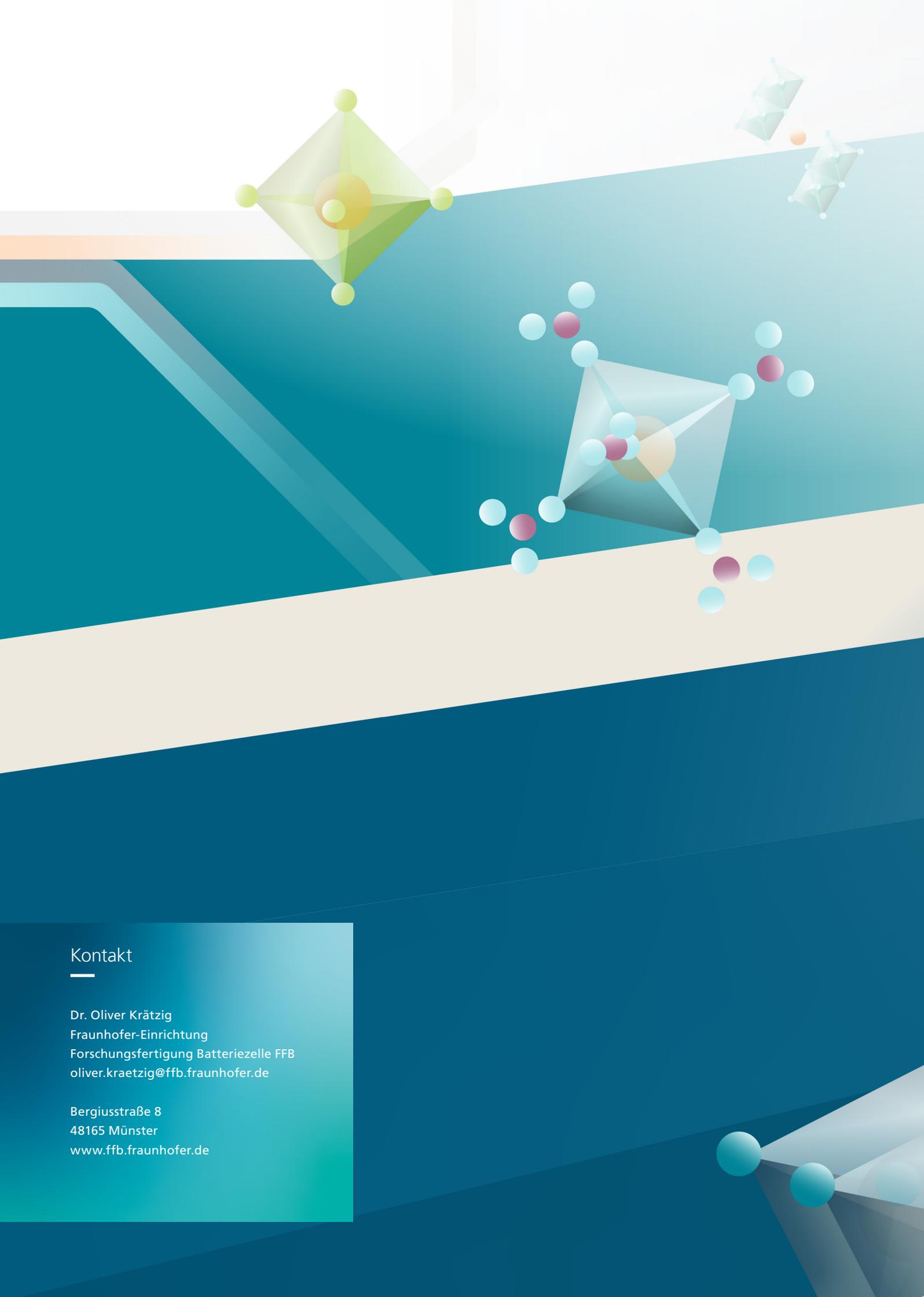


Preußisch-Blau-Analog (PBA)  
rhomboedrischer  $\text{Na}_x\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  Polymorph



Schichtoxid  $\text{NaMnO}_2$ -Struktur:  
Mn oktaedrisch durch O koordiniert

-  — Na
-  — Fe
-  — Mn
-  — Cl
-  — N
-  — O
-  — C



## Kontakt

---

Dr. Oliver Krätzig  
Fraunhofer-Einrichtung  
Forschungsfertigung Batteriezelle FFB  
[oliver.kraetzig@ffb.fraunhofer.de](mailto:oliver.kraetzig@ffb.fraunhofer.de)

Bergiusstraße 8  
48165 Münster  
[www.ffb.fraunhofer.de](http://www.ffb.fraunhofer.de)