



# Zellproduktion in Deutschland

Eine Betrachtung aus Sicht der Wissenschaft

Prof. Eberhard Umbach (Hrsg.)

acatech MATERIALIEN

**Autoren/Herausgeber:**

Prof. Eberhard Umbach  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Karolinenplatz 4  
80333 München  
eberhard.umbach@kit.edu

**Projekt:**

Moderation Nationale Plattform Elektromobilität

**Reihenherausgeber:**

acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN, 2016

Geschäftsstelle  
Karolinenplatz 4  
80333 München

Hauptstadtbüro  
Pariser Platz 4a  
10117 Berlin

Brüssel-Büro  
Rue d'Egmont/Egmontstraat 13  
1000 Brüssel  
Belgien

T +49 (0) 89 / 5 20 30 90  
F +49 (0) 89 / 5 20 30 99 00

T +49 (0) 30 / 2 06 30 96 0  
F +49 (0) 30 / 2 06 30 96 11

T +32 (0) 2 / 2 13 81 80  
F +32 (0) 2 / 2 13 81 89

E-Mail: [info@acatech.de](mailto:info@acatech.de)  
Internet: [www.acatech.de](http://www.acatech.de)

© acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN, 2016

Koordination: Robert Hirsch, Michael Püschner

Redaktion: Linda Treugut

Layout/Konzeption: acatech

Konvertierung und Satz: Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS, Sankt Augustin

#### **> DIE REIHE acatech MATERIALIEN**

In dieser Reihe erscheinen Diskussionspapiere, Vorträge und Vorstudien, die im Rahmen der acatech Projektarbeit entstanden sind. Die Bände dieser Reihe liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Herausgeber und Autoren.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter [www.acatech.de/publikationen](http://www.acatech.de/publikationen) zur Verfügung.

Das vorliegende Materialienband ist das Ergebnis einer acatech Workshopreihe im Rahmen des acatech Projektes „Moderation der Nationalen Plattform Elektromobilität“. Diese Workshopreihe wurde von acatech Mitglied Prof. Eberhard Umbach geleitet und fand im März, April und Juni 2015 statt. Wir danken allen nachstehend aufgeführten Workshopteilnehmerinnen und -teilnehmern sowie Autorinnen und Autoren:

- Prof. Matthias Busse, Fraunhofer IFAM
- Prof. Peter Elsner, Fraunhofer ICT
- Prof. Jürgen Fleischer, Karlsruher Institut für Technologie
- Dr. Andreas Gutsch, Karlsruher Institut für Technologie
- Dr.-Ing. Heiner Hans Heimes, RWTH Aachen
- Dr. Heiko Hennrich, Karlsruher Institut für Technologie
- Prof. Gerhard Hörpel, Universität Münster
- Prof. Jürgen Janek, Universität Gießen
- Prof. Achim Kampker, RWTH Aachen
- Prof. Arno Kwade, TU Braunschweig
- Prof. Gunther Reinhart, TU München
- Prof. Dirk Uwe Sauer, RWTH Aachen
- Dr.-Ing. Julian Schwenzel, Fraunhofer IFAM
- Rainer Stern, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
- Prof. Werner Tillmetz, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
- Dr. Axel Thielmann, Fraunhofer ISI
- Dr. Jens Tübke, Fraunhofer ICT
- Prof. Martin Wietschel, Fraunhofer ISI
- Prof. Martin Winter, Universität Münster
- Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
- Dr. Olaf Wollersheim, Karlsruher Institut für Technologie

# INHALT

|          |                                                                   |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN</b>                           | <b>7</b>  |
| <b>2</b> | <b>EINLEITUNG</b>                                                 | <b>8</b>  |
| <b>3</b> | <b>STAND UND AUSBLICK DER TECHNOLOGIE</b>                         | <b>10</b> |
|          | 3.1 Zelltechnologie                                               | 10        |
|          | 3.2 Produktionstechnologie                                        | 12        |
|          | 3.2.1 Zergliederte Wertschöpfungsstrukturen bei Batteriezellen    | 12        |
|          | 3.2.2 Effiziente Fertigungsprozesse                               | 14        |
|          | 3.2.3 Einfluss von Produktentwicklungen auf den Fertigungsprozess | 15        |
|          | 3.2.4 Zusammenfassung und Fazit                                   | 17        |
| <b>4</b> | <b>SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>                                         | <b>19</b> |
| <b>5</b> | <b>NÄCHSTE SCHRITTE</b>                                           | <b>20</b> |



# 1 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

In dem vorliegenden Papier sollen wissenschaftliche Empfehlungen zu Zelltechnologie und Produktionstechnologie für die AG2-Batterietechnologie der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) ausgesprochen werden. Es soll der AG2 als wissenschaftlicher Input bei der Erstellung einer Roadmap zur integrierten Zell- und Batterieproduktion in Deutschland dienen. Zu diesem Zweck wird die Entwicklung sowohl der Zelltechnologie als auch der Zellproduktion betrachtet. In einem Expertenkreis aus führenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern wurde intensiv reflektiert, welche Maßnahmen in den Bereichen Zelltechnologie und Produktionstechnologie einen signifikanten Beitrag leisten können, um den Rückstand gegenüber asiatischen Herstellern weiter zu verringern und diese gar zu überholen. Zelltechnologie und Produktionstechnologie werden hierzu simultan und interaktiv betrachtet.

Die Diskussion der **Zelltechnologie** bezieht sich auf gängige Lithium-Ionen-Systeme (Generation 2), optimierte Lithium-Ionen-Systeme (Generation 3) sowie Post-Lithium-Ionen-Systeme (Generation 4a, c und 5). Nach aktuellem Stand der wissenschaftlichen Forschung und Entwicklung ist die Generation der Lithium-Ionen-Systeme nahezu ausgereift. Bis zum Jahr 2025 wird voraussichtlich eine optimierte Lithium-Ionen-Technologie die dominierende Zelltechnologie sein. Damit ist noch weitgehend offen, wann und ob sich später ein Wechsel zu den Post-Lithium-Ionen-Technologien vollziehen wird. Deutlich wahrscheinlicher scheint aus heutiger Sicht eine Weiterentwicklung der Solid-State-Systeme (Generation 4b). Viele Fragen der zyklischen und kalendarischen Lebensdauer oder der Sicherheit sowie die Frage, ob überhaupt ein Vorteil in der volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte gegenüber optimierten Lithium-Ionen-Batteriezellen generiert werden kann, können heute noch nicht abschließend geklärt werden. Außerdem ist noch wenig erforscht, ob alternative Zellchemien, die nicht auf Lithium-Ionen basieren (unter anderem Generation 4a, c und 5), zukünftig eine tragende Rolle spielen werden.

Bei der **Produktionstechnologie** sollte aus Sicht der Wissenschaft in Deutschland eine industrielle Massenfertigung von Lithium-Ionen-Batterien für die aktuellen und zukünftigen Lithium-Ionen-Systeme aufgebaut werden. Der Wechsel von aktuellen Lithium-Ionen-Systemen (Generation 2) zu zukünftigen Zellsystemen gelingt wesentlich besser, wenn sehr fundierte Produktionserfahrungen aus vorangegangenen Zelltechnologien bestehen und nicht am Anfang der Lernkurve

begonnen werden muss. Wichtig für die zukünftige Entwicklung der Zellproduktion in Deutschland ist, dass durch Steigerung von Energiedichte, Sicherheit und Produktivität sowie Senkung der Kosten hierzulande im internationalen Wettbewerb führende Zellen produziert werden. Für die deutschen Unternehmen ergibt sich so die Chance, durch die „schnellere oder bessere“ Lösung bestehender Produktionsherausforderungen den Rückstand zu asiatischen Herstellern aufzuholen und das gewonnene Prozessverständnis auch für zukünftige Batteriezelltechnologien zu nutzen. Es ist eine modulare Gestaltung des Produktionsprozesses anzustreben, damit einzelne Module bestehender Produktionsanlagen bei neuen Produkttechnologien ausgetauscht oder erweitert werden können. Dies ermöglicht es, auch einer Weiterentwicklung in der Produktionstechnologie – beispielsweise beim Übergang auf optimierte Lithium-Ionen-Systeme (Generation 3) –, die sich nur auf Teilbereiche des Produktionsprozesses bezieht, besser zu begegnen. Bei dieser Modularisierung wird der deutsche Maschinen- und Anlagenbau, der international erfolgreich Maschinen verkauft, einen wichtigen Erfolgsfaktor darstellen. Darüber hinaus besteht die Notwendigkeit, mit Prozessinnovationen wie zum Beispiel kontinuierlicher Pastenherstellung, schnellen Trocknungs-, Wickel- und Stapelprozessen sowie kurzen Formierungszeiten den Produktionsprozess der Batteriezelle nochmals zu verbessern, um eine weitere Senkung der Herstellkosten zu ermöglichen. Der Übergang von Zellen mit Flüssigelektrolyten zur Solid-State-Technologie (Generation 4b) wird dabei aller Voraussicht nach größere Änderungen in der Produktionstechnologie für die Elektroden und die Zellaassemblierung nach sich ziehen.

Damit **deutsche Forschungsinstitute** signifikante Impulse für die Weiterentwicklung der Zelltechnologie und der Produktionstechnologie setzen können, sollten die Kompetenzen der deutschen Forschungslandschaft über das bekannte Instrument der Clusterbildung gebündelt werden. Zelltechnologien und Produktionstechnologien müssen in verschiedenen, eng aufeinander abzustimmenden Forschungsinstitutionen mit der dort schon bestehenden und gegebenenfalls noch zu erweiternden Produktionsinfrastruktur parallel und in enger Kooperation entwickelt werden. Zusammen mit der Forschungsproduktionslinie in Ulm sollte das Scale-Up von kleinen Pilotanlagen außerhalb von Laborbedingungen erforscht werden. Die Bündelung wird den Wissensaustausch und damit den Wissensaufbau sowie Innovationen begünstigen.

## 2 EINLEITUNG

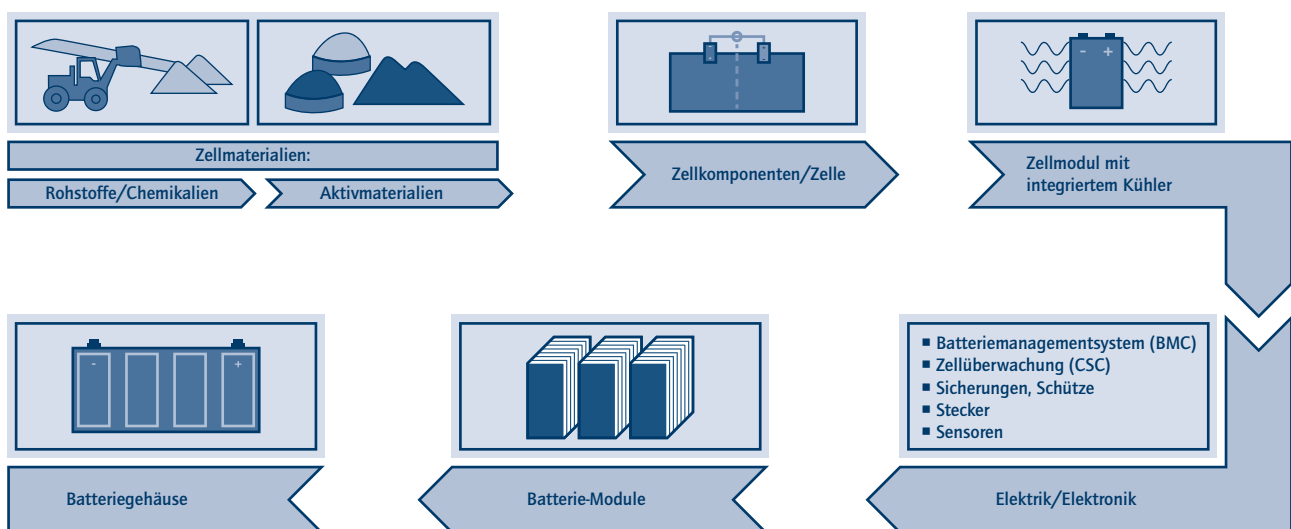
Die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) ist 2010 mit dem Ziel angetreten, durch eine Leitanbieterschaft von Elektromobilität die gesamte Wertschöpfungskette in Deutschland zu etablieren. Dadurch sollen die diesbezügliche Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland gehalten und weiter ausgebaut werden. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Zell- und Batterietechnologie. Die Batterie ist mit 30 bis 40 Prozent Wertschöpfungsanteil eine der wichtigsten Komponenten des Elektrofahrzeugs. Batteriemodule und Batteriesysteme werden bereits heute erfolgreich in Deutschland entwickelt und gefertigt. Batterien und ihre Zellen hingegen werden hauptsächlich auf dem internationalen Markt hergestellt.

**Batterien unterscheiden sich wesentlich durch ihre Zellen, weil neben Betriebssicherheit und Lebensdauer vor allem auch funktionale Eigenschaften der Batterie durch die Zellen bestimmt sind.** Diese funktionalen Eigenschaften umfassen zum Beispiel die Energiedichte und die Abhängigkeit des Zellinnenwiderstandes von der Temperatur, aber auch den Ladezustand. Wesentliche Fahrzeugeigenschaften (Reichweite, Verhalten beim Kaltstart etc.) werden daher maßgeblich durch die Zelle beeinflusst. Aus diesem Grund ist die Zelle nicht nur ein entscheidendes Wertschöpfungsglied der Batterie, sondern auch bedeutend für das Ziel der

Leitanbieterschaft. Um dieses Ziel zu erreichen, hat es sich die NPE mit dem Fortschrittsbericht 2014 zur Aufgabe gemacht, die Etablierung einer integrierten Batterie- und Zellproduktion in Deutschland gemeinsam voranzutreiben.

In den vergangenen zehn Jahren wurde die Batterieforschung und Batterieentwicklung in Deutschland massiv ausgebaut. An vielen Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen wurden rund zwanzig Professuren neu eingerichtet oder umgewidmet, Institute gegründet und landesweite Forschungsverbünde aufgebaut. Zwei durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsverbünde (Süd und Nord) ermöglichten die Beschaffung dringend erforderlicher Investitionen. Es wurden zwei Helmholtz-Institute zur Batterieforschung neu gegründet (Ulm, Münster), ein neues Helmholtz-Programm zur Speichertechnologie aufgelegt sowie Förderprogramme zur Batterieforschung durch die Bundesministerien BMWi und BMBF ausgeschrieben. Außerdem fand von Beginn an eine intensive Kooperation zwischen Industrie und öffentlich geförderter Forschung statt, sei es durch bilaterale Projekte, Gemeinschaftslabore oder sogar Netzwerke. Vor allem auch hat sich die Industrie mit großem Einsatz dem Thema Batterieentwicklung und Batterieherstellung gewidmet, neue Materialien entwickelt, Produktionsverfahren optimiert und an mehreren Orten mit eigener Zellfertigung begonnen.

Abbildung 1: Schwerpunkte der Batterieproduktion entlang der Wertschöpfungskette



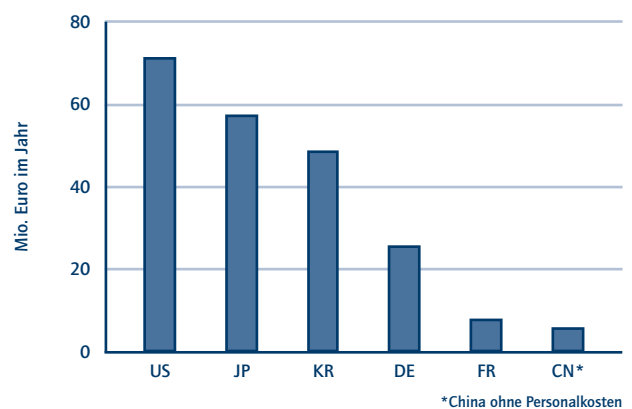
Quelle: Nationale Plattform Elektromobilität (2014)

Die letzten zehn Jahre waren nach einer mehrjährigen Stag-nations- beziehungsweise sogar Abbauphase (zum Beispiel in der Elektrochemie) durch eine abrupte Trendumkehr und eine beispiellose, international mit Anerkennung bedachte Aufbauanstrengung gekennzeichnet, welche die deutsche Batterieforschung und -entwicklung zurück ins internationale Spitzenfeld gebracht hat. Die aktuelle Forschungsförderung in Deutschland ist bereits auf einem guten Niveau, im internationalen Vergleich jedoch noch ausbaufähig (siehe Abbildung 2). Wettbewerber in Fernost (China, Japan, Korea) oder in den USA haben ebenfalls beachtliche Fortschritte gemacht, sodass ihr Vorsprung gegenüber Deutschland in den letzten Jahren zwar kleiner wurde, aber noch nicht ganz aufgeholt werden konnte.

Allerdings werden die bereits vorhandenen und neu aufgebaute Zellfertigungskapazitäten für Batterien in Deutschland derzeit aus Rentabilitätsgründen in der Regel nicht erweitert. Große Volumenmärkte für Batteriezellen werden von der deutschen Industrie (Original Equipment Manufacturer – Zulieferindustrie) kurzfristig noch nicht gesehen.

Dennoch sind Forschung und Entwicklung in Deutschland nach wie vor durch breite Aufbruchsstimmung und Pioniergeist gekennzeichnet und bilden auch weiterhin eine sehr gute Basis für den Aufbau von Anlagen zur Volumenproduktion von Batteriezellen in Deutschland.

Abbildung 2: Öffentliche Batterieforschungsförderung im Ländervergleich 2014<sup>1</sup>



Quelle: Thielmann et al. (2014), eigene Darstellung

<sup>1</sup> Thielmann, A. et al., 2014: *Energiespeicher für die Elektromobilität. Deutschland auf dem Weg zum Leitmarkt und Leitanbieter?*, Fraunhofer ISI, URL: [http://www.emotor.isi-projekt.de/emotor-wAssets/docs/privat/EMOTOR\\_Leitmarkt-und-Leitanbieter\\_Fraunhofer-ISI\\_web.pdf](http://www.emotor.isi-projekt.de/emotor-wAssets/docs/privat/EMOTOR_Leitmarkt-und-Leitanbieter_Fraunhofer-ISI_web.pdf) [Stand: 22. Juli 2015].

## 3 STAND UND AUSBLICK DER TECHNOLOGIE

### 3.1 ZELLTECHNOLOGIE

Innerhalb von Batterien gibt es nicht nur eine Zelltechnologie. Durch unterschiedliche Zusammensetzungen von Materialien in Verbindung mit verschiedenen Zellendesigns ergibt sich eine breite Palette von Möglichkeiten für Batteriezellen. Heute werden besonders die folgenden Zellen erforscht und entwickelt, wobei die Generationen nicht unbedingt aufeinander aufbauen, sondern auch parallel geplant und produziert werden (insbesondere Weiterentwicklung Lithium-Ionen und alternative Zellchemien (siehe Tabelle 1).

Die Übergänge zwischen den Zellgenerationen sind fließend. Einen Technologie- und Produktionssprung erfordert die Realisierung einer All-Solid-State-Batterie (Generation 4b). Dabei handelt es sich um Lithium-Batterien, die entweder anstelle eines Flüssigelektrolyten einen keramischen Feststoffelektrolyten nutzen, oder aber um PVD- oder CVD-Schichten, die über Gasphasenprozesse aufgebracht werden. Sowohl das Elektroden- als auch das Zelldesign dieser Feststoffbatterien unterscheiden sich signifikant von Lithiumzellen mit Flüssigelektrolyt. Eine wesentliche Voraussetzung für die Einführung der nächsten Generationen sind unveränderte oder stark verbesserte Daten im

Vergleich zu den heute verfügbaren großformatigen Zellen, zum Beispiel bezüglich erhöhter Sicherheit, Verbesserung der Leistung und Lebensdauer oder Zugewinn an Energiedichte bei gleichzeitiger Reduktion der Kosten/kWh. Um diese Zielwerte erreichen zu können, müssen für alle zukünftigen Zellchemien parallel auch die Elektroden- und Zelldesigns optimiert werden.

Die Anforderungen an die jeweilige Zelltechnologie sind im Automotive-Bereich hoch und beziehen sich auf folgende Kriterien:

- Kosten
- Leistung
- Energiedichte
- Zyklenfestigkeit
- Lebensdauer
- Sicherheit
- Schnellladefähigkeit
- End-of-Life-Management

Vor diesem Hintergrund kann eine Abschätzung über zukünftige Potenziale von Zelltechnologien auf Basis des heutigen Kenntnisstandes vorgenommen werden.

Abbildung 3: Bewertung zukünftiger Zelltechnologien nach heutigem Kenntnisstand mit noch notwendigen, massiven Entwicklungsdurchbrüchen:

| BEWERTUNG ZUKÜNFTIGER ZELLTECHNOLOGIEN<br>AUF BASIS DES AKTUELLEN STANDS DER TECHNIK |                                            | Li-Ion | Li-Ion opt | Li-S | Li-Air |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------|------------|------|--------|
|                                                                                      |                                            | 2a     | 2b, 3a, 3b | 4    | 5      |
| PERFORMANCE                                                                          | Gravimetrische Energiedichte (theoretisch) |        |            |      |        |
|                                                                                      | Gravimetrische Energiedichte (praktisch)   |        |            |      |        |
|                                                                                      | Volumetrische Energiedichte (praktisch)    |        |            |      |        |
|                                                                                      | Sicherheit                                 |        |            |      |        |
|                                                                                      | Leistungsfähigkeit                         |        |            |      |        |
|                                                                                      | Schnellladefähigkeit                       |        |            |      |        |
|                                                                                      | Lebensdauer                                |        |            |      |        |
| End-of-Life-Management                                                               |                                            |        |            |      |        |
| Kosten {€/kWh}                                                                       |                                            |        |            |      |        |

● = hohes Potenzial      ● = mittleres Potenzial      ● = geringes Potenzial

Quelle: MEET – Münster Electrochemical Energy Technology (angepasst durch PEM der RWTH Aachen)

Tabelle 1: Überblick und aktueller Stand von Zelltechnologien

| GENERATION, TYP                      | SPEZIFISCHE ENERGIE/ENERGIEDICHTE                                                                        | MATERIAL                                                                                                                                                  | AKT. STAND WISS. F&E | PRODUKTIONSTECHNOLOGIE                                                             | AKT. STAND WISS. F&E | MARKT-EINFÜHRUNG* |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------|
| 2a, Li-Ion                           | Ca. 150 Wh/kg<br>Ca. 220 Wh/l                                                                            | <b>Kathode:</b> NCM111<br><b>Anode:</b> 100% Kohlenstoff                                                                                                  | ●                    | Nassmischen, Nassbeschichtung, Kalandrieren, Konfektionieren, Packaging            | ●                    | 2015, aktuell     |
| 2b, Li-Ion                           | Ca. 150 – 180 Wh/kg<br>220 – 400 Wh/l                                                                    | <b>Kathode:</b> NCM523 bis NCM622<br><b>Anode:</b> 100% Kohlenstoff                                                                                       | ●                    | Wie Generation 2a                                                                  | ●                    | 2017              |
| 3a, Li-Ion opt                       | >180 Wh/kg – 280 Wh/kg<br>350 – 600 Wh/l                                                                 | <b>Kathode:</b> NCM622 bis NCM811<br><b>Anode:</b> Kohlenstoffanode (Graphit) + Siliziumanteil (5 – 10%)                                                  | ●                    | Wie Generation 2a                                                                  | ●                    | 2020              |
| 3b, Li-Ion opt                       | >250 Wh/kg – ca. 320 Wh/kg<br>600 – 800 Wh/l                                                             | <b>Kathode:</b> NMC 811, HE-NCM, HVS (high voltage spinel)<br><b>Anode:</b> Silizium/Kohlenstoff                                                          | ●                    | Wie Generation 2a + Vorlithierung, Elektrodennachbehandlung                        | ●                    | 2025              |
| 4a, Li-S (konventionell)             | >300 Wh/kg<br><50% Kosten                                                                                | <b>Kathode:</b> S/C Komposit oder Li <sub>2</sub> S/C Komposit<br><b>Anode:</b> Lithiummetall oder Silizium (Zinn)/Kohlenstoffanode<br>Elektrolyt flüssig | ●                    | Wie Generation 2a mit Anpassungen für Lithiummetall                                | ●                    | > 2020            |
| Sprung in der Produktionstechnologie |                                                                                                          |                                                                                                                                                           |                      |                                                                                    |                      |                   |
| 4b, Li-Ion opt solid state           | >400 Wh/kg<br>nicht brennbar, sicher<br>Ca. 1000 Wh/l                                                    | All solid state mit Li-Ion                                                                                                                                | ●                    | Keramische Mischungen, Sintern, ggf. Kalandrieren, Konfektionierung, Packaging     | ●                    | > 2025            |
| 4c, Li-S solid state (Post-Li)       | >500 Wh/kg<br>>1000 Wh/l<br>All solid state<br>400 – 500 Wh/kg<br>>600 Wh/l<br>Li-S<br>50% Kosten Li/Ion | All solid state mit Lithiumanode, Konversionsmaterialien, z. B. Li-S                                                                                      | ●                    | Keramische Prozesse, Sintern, Trockenbeschichtung, Konfektionierung, Packaging     | ●                    | > 2025            |
| Technologiesprung                    |                                                                                                          |                                                                                                                                                           |                      |                                                                                    |                      |                   |
| 5, Li-air (Post-Li)                  | >500 Wh/kg                                                                                               | Li-O <sub>2</sub> (Li-air)                                                                                                                                | ●                    | Gasdiffusionselektroden, Konfektionieren, Packaging aus Brennstoffzellen adaptiert | ●                    | > 2035            |

\*Annahme: großformatige Zellen, internationaler Stand

● = etabliert/laufend

● = Handlungsbedarf – weitere Entwicklung zur Steigerung der Zellperformance und Wirtschaftlichkeit erforderlich

● = grundlegender Handlungsbedarf

Quelle: eigene Darstellung

Es wird deutlich, dass in den nächsten Jahren (bis mindestens 2025) eine **optimierte Lithium-Ionen-Technologie (Generation 3)** die dominierende Zelltechnologie sein wird und noch zahlreiche Möglichkeiten bestehen, diese Technologie hinsichtlich Performance und Kosten pro kWh zu optimieren. Der weiteren technologischen Entwicklung stehen die Materialkosten gegenüber, die einer weiteren Kostenreduzierung bei den optimierten Lithium-Ionen-Zellen unter Umständen Grenzen setzen. Vor allem auch für die Herstellungs- und Fertigungsprozesse (Materialien, Elektroden, Zelle) stellen sich neue Herausforderungen, etwa aufgrund der Notwendigkeit, aufwendige Elektrodenstrukturen (zum Beispiel Si/C-Komposite) zu nutzen.

Wenn für die Themen zyklische und kalendarische Lebensdauer sowie Sicherheit bei Lithium-Schwefel-Technologien befriedigende Lösungen gefunden wurden, kann **Lithium-Schwefel (Generation 4a und c)** gegenüber optimierter Lithium-Ionen-Technologie zunehmend an Bedeutung gewinnen und parallel zur Lithium-Ionen-Technologie einen Marktzugang finden. Heutige Erkenntnisse lassen jedoch lediglich auf eine theoretische Erhöhung der volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte gegenüber der weiterentwickelten Lithium-Ionen-Technologie, wie sie für etwa 2020 zu erwarten ist, schließen. Es ist noch weitgehend offen, ob sich der theoretisch nachgewiesene Vorteil der höheren Energiedichte auch praktisch – in Form einer funktionstüchtigen Batteriezelle – umsetzen lässt. Daher ist derzeit noch nicht abzusehen, ob sich künftig ein Wechsel zu Post-Lithium-Ionen-Technologien (Generation 4a, c und 5) vollziehen wird. Deutlich wahrscheinlicher scheint aus heutiger Sicht eine Weiterentwicklung zu Solid-State-Systemen (Generation 4b). Dennoch bieten auch weiterhin sowohl Post-Lithium-Ionen-Batterien (Generation 4a, c und 5) als auch nicht auf Lithium basierende Batteriechemien mögliche disruptive Entwicklungsoptionen, die von Forschung und Entwicklung nicht vernachlässigt werden dürfen.

### 3.2 PRODUKTIONSTECHNOLOGIE

Der industrielle Fertigungsprozess von Lithium-Ionen-Batteriezellen kann in die drei Teilbereiche Elektrodenproduktion, Zellassemblierung sowie Formation und Prüfung gegliedert werden. Innerhalb der genannten Fertigungsbereiche werden Maschinen und Anlagen in Form von Fertigungsressourcen und Montagesystemen benötigt. Mischsysteme, Beschichtungs- und Trocknungsanlagen sowie Kalandrierstellen

Beispiele für Fertigungsressourcen zur Elektrodenherstellung dar. Innerhalb der Zellassemblierung werden sowohl Fertigungsressourcen wie zum Beispiel Ultraschallschweißanlagen als auch Montagesysteme eingesetzt. Im Rahmen der Formation und Prüfung kommen unter anderem Fertigungsressourcen wie Formations- und Aging-Anlagen zum Einsatz.

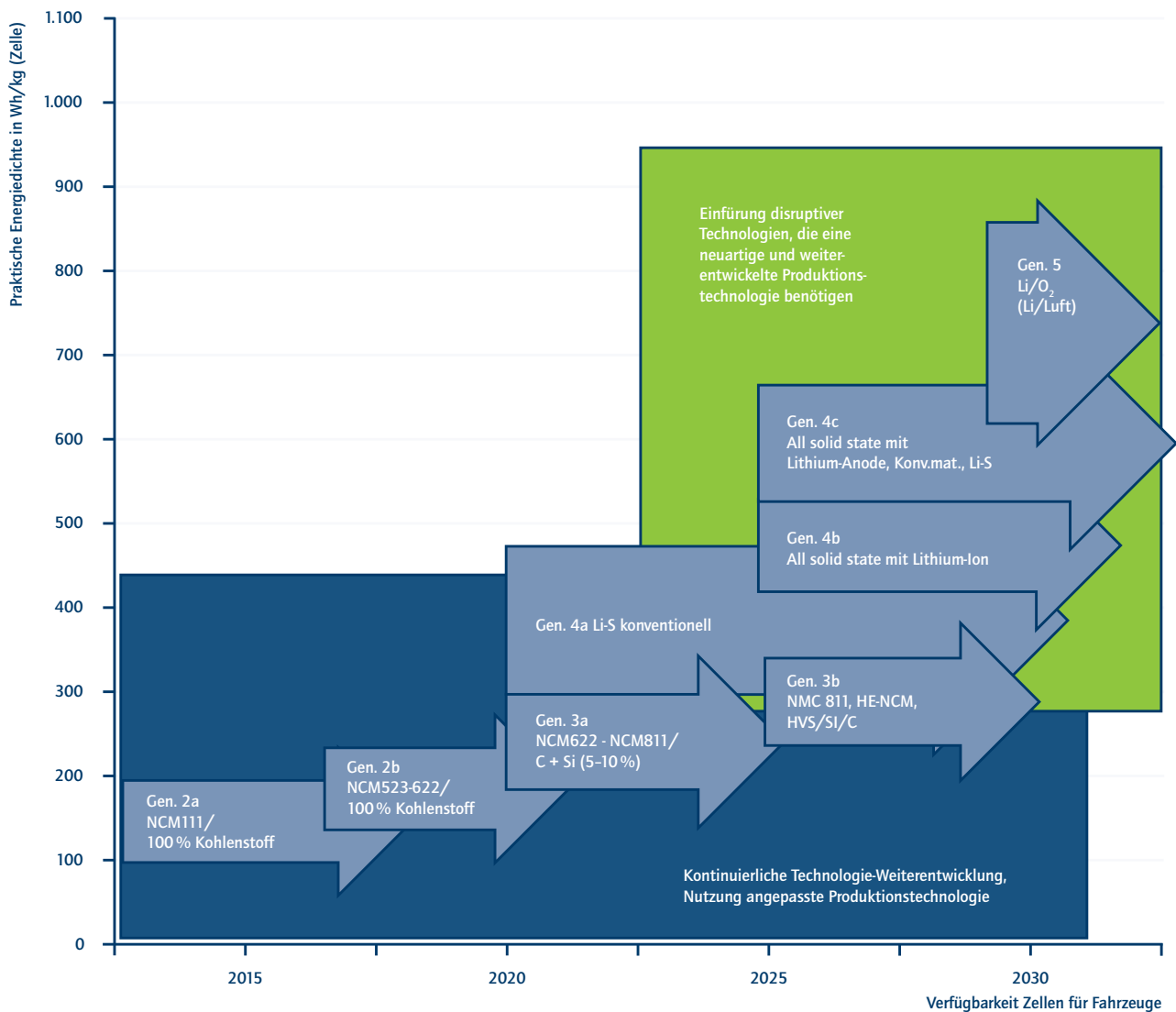
Wichtig für eine schnelle und wirtschaftlich erfolgreiche Markteinführung neuer Zellgenerationen ist die synchrone, simultane Entwicklung der zugehörigen Produktionstechnologie. Dies ist nicht nur bei Technologiesprüngen zum Beispiel von Generation 4a zu 4b oder von 4c zu 5 von Bedeutung, sondern auch bei systematischer Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Technologie. Werden Zellgeneration und Produktionstechnologie simultan und interaktiv betrachtet, so wird ersichtlich, dass ein Sprung in der Zelltechnologie die Prozessschritte der Elektroden- und Zellproduktion unterschiedlich stark berührt. Welche Prozesse beziehungsweise einzelnen Schritte der Elektroden- und Zellproduktion besonders stark betroffen sind, kann nur in Abhängigkeit von der Art des Sprunges ermittelt werden. Während die ersten Maschinen zur Herstellung von großformatigen Zellen jeweils speziell als Sondermaschinen gefertigt wurden, sollten daher in Zukunft modulare Anlagen entwickelt werden, bei denen einzelne Module bei Bedarf ausgetauscht werden können, ohne die gesamte Anlage zu ändern. Hierdurch und mittels möglichst flexibler Produktionsmaschinen und -anlagen können in Zukunft neue Zellgenerationen ohne oder mit nur geringfügigen Änderungen an den Maschinen und Anlagen durch verständnisbasierte Anpassung der Prozessparameter hergestellt werden.

Neben dem übergeordneten Ziel einer solchen Modularität können drei zentrale Herausforderungen bei der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen ausgemacht werden, die in den folgenden Unterkapiteln dargestellt werden. Abschließend wird in einer Zusammenfassung reflektiert, wie diesen Herausforderungen begegnet werden kann.

#### 3.2.1 ZERGLIEDERTE WERTSCHÖPFUNGSSTRUKTUREN BEI BATTERIEZELLEN

Deutschland verfügt mit seinem international agierenden Maschinen- und Anlagenbau über eine herausragende produktionstechnische Kompetenz und hohes Potenzial. Die

Abbildung 4: Entwicklungsschritte der praktischen gravimetrischen Energiedichte von Zellen



Quelle: eigene Darstellung

Prozesskette der Zellproduktion wird durch eine Vielzahl von spezialisierten Maschinen- und Anlagenbauern bedient. Während ein Maschinen- und Anlagenbauer innerhalb der Batteriemodul- und Packfertigung die gesamte Prozesskette abdecken kann und somit als Generalist auf dem Markt präsent ist, muss bei der Herstellung von Batteriezellen auf eine Vielzahl von Maschinen- und Anlagenbauern mit unterschiedlichen spezifischen Kompetenzen zurückgegriffen werden (vgl. Abbildung 5). Entsprechend sind auch zur wissenschaftlichen Durchdringung des Produktionsprozesses unterschiedliche Kompetenzen aus

dem Bereich Verfahrenstechnik, Montagetechnik, Elektrotechnik und Elektrochemie notwendig.

In den drei Bereichen der Zellherstellung existieren eine Vielzahl von spezialisierten Maschinen- und Anlagenbauern, die über Expertise für einen bestimmten Produktionsschritt verfügen und diesen durch diverse Fertigungsressourcen, aber auch spezifisches Anwendungswissen und Erfahrung abdecken können. In den vor- oder nachgelagerten Produktionsschritten weisen diese Unternehmen jedoch keine beziehungsweise nur eine

geringe Kompetenz auf (vgl. Abbildung 5). Der Betreiber einer Produktionsanlage für Lithium-Ionen-Zellen steht somit vor der Herausforderung, geeignete Maschinen- und Anlagenbauer für jeden Prozessschritt zu identifizieren. Er muss ihnen Anweisungen bezüglich der zu verwendenden Fertigungsressourcen geben und die jeweiligen Maschinen und Anlagen in Form von Fertigungsressourcen zu einem wirtschaftlichen Gesamtprozess vereinen. Die **erste produktionstechnische Herausforderung** liegt somit darin, dass die Zellproduktion – bedingt durch die benötigten unterschiedlichen Kompetenzen und die zergliederte Wertschöpfungskette der Maschinen und Anlagenbauer – hinsichtlich **produktionssystematischer oder technologischer Gestaltungskriterien** noch nicht optimal ausgelegt ist. Zentrale Herausforderungen sind hierbei:

- Genaue Kenntnis der Zusammenhänge von Anlagenkonfiguration und Prozessparametern mit Zellperformance und -qualität.
- **Qualitätsmanagementsysteme** zur effizienten Dokumentation von Parametern entlang der gesamten Wertschöpfungskette und zur Darstellung des Einflusses dieser Parameter auf die Zellperformance.
- Entwicklung einer optimalen Konfigurationslogik aus den zur Verfügung stehenden alternativen Fertigungsressourcen der Batteriezellfertigung.
- Durchgehende **Warenträgerkonzepte** von der Elektrodenfertigung bis zur Formation.

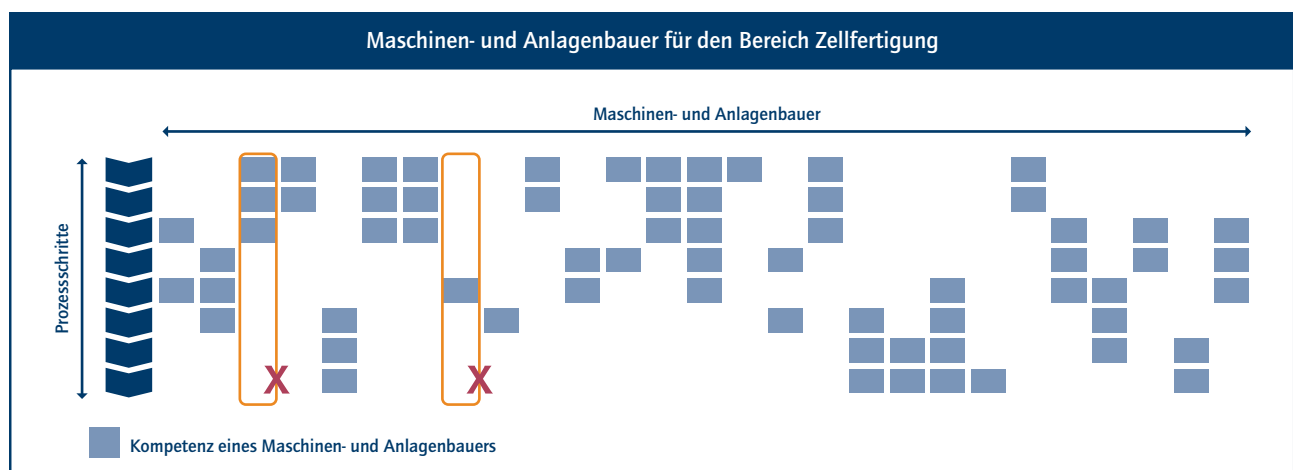
- **Leitstandsysteme** zur Erfassung sämtlicher Fertigungsdaten und Auswertungsalgorithmen zur regelbasierten Steigerung der Fertigungsqualität.

### 3.2.2 EFFIZIENTE FERTIGUNGSPROZESSE

Nach aktuellem Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass Weiterentwicklungen in der Zelltechnologie die Module des Produktionsprozesses unterschiedlich stark beeinflussen. So wird zum Beispiel bei den Lithium-Ionen-optimierten Systemen (ab Generation 3) die Elektrodenfertigung mit jeder Generation komplexer (unter anderem Mehrschichtaufbau, Nachbehandlung, lösungsmittelfreie Prozessierung), um die bessere Zellperformance auch zu erreichen und eine weitere Zellassemblierung in prismatischen Zellen zu ermöglichen. Ein Wechsel des Zelltyps (Rundzelle, Flachzelle und prismatische Zelle) würde sich darüber hinaus deutlich auf den Produktionsprozess auswirken. Die Zelltypen, die in Abbildung 6 dargestellt sind, unterscheiden sich stark in ihrem inneren Aufbau.

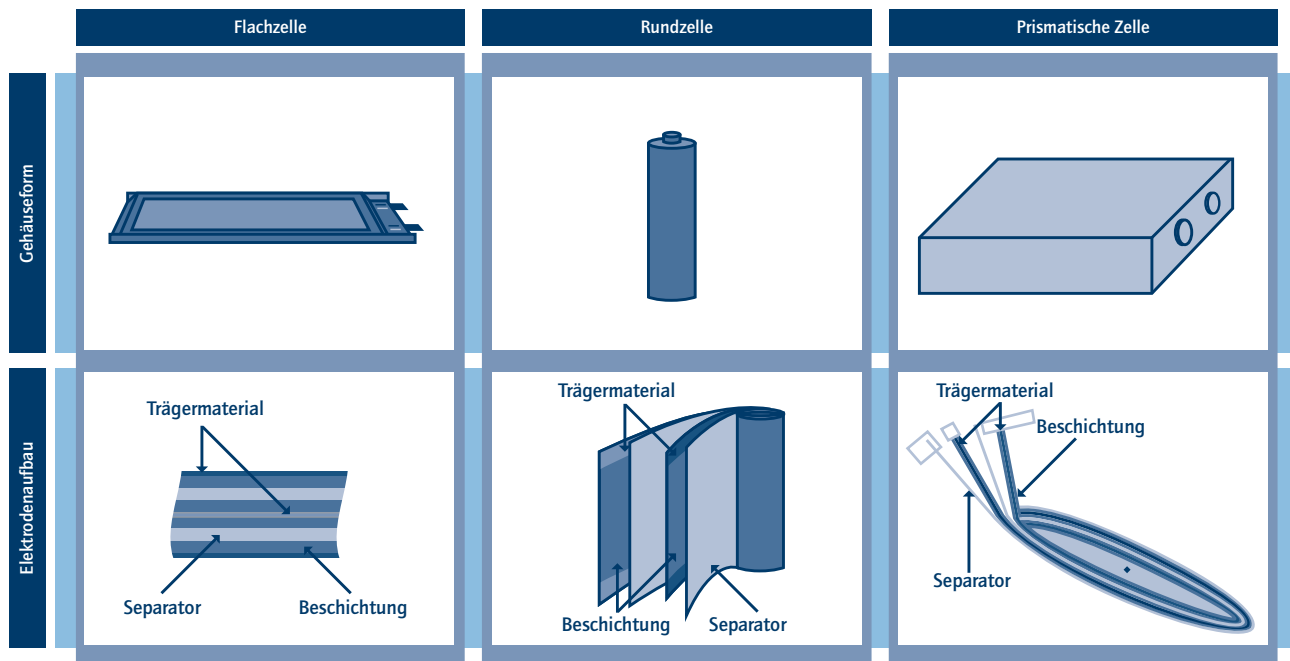
Der unterschiedliche Aufbau der Zelltypen wirkt sich auf den Produktionsprozess und vor allem auf die Zellmontage aus. Er erfordert deshalb geeignete individuelle Fertigungsressourcen, insbesondere bei der Zellassemblierung. Skaleneffekte können daher nur begrenzt über unterschiedliche Zelltypen hinweg erzielt werden. Vielmehr hat jeder Zelltyp

Abbildung 5: Kompetenzprofil des Maschinen- und Anlagenbaus



Quelle: PEM der RWTH Aachen

Abbildung 6: Aufbau aktuell verfügbarer Zelltypen



Quelle: PEM der RWTH Aachen

Investitionen in neue Montagesysteme zur Folge. Aufgrund dessen ist es zur maximalen Ausnutzung von Lerneffekten und für die getätigten Investitionen wichtig, dass bei der Weiterentwicklung der Zellgenerationen (Generation 2b bis 4a) der Zelltyp nicht verändert wird.

Eine **zweite produktionstechnische Herausforderung** liegt in der **Effizienzsteigerung der zelltypspezifischen Fertigungsprozesse**. Effizienzsteigerungen mit Fokus auf Zeit, Kosten und Qualität lassen sich hierbei im Besonderen in den folgenden Bereichen erzielen:

- **Lösungsmittelfreie und wasserbasierte Produktion** von Elektroden zur umweltfreundlichen Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen.
- **Kontinuierliche Misch- und Hochdurchsatz-Beschichtungs- und Trocknungsverfahren** der Elektroden zur Senkung der Herstellkosten. Besondere Aufmerksamkeit kommt hier auch den intermittierenden Beschichtungen zu, welche für Stapelbildungsverfahren sehr wichtig sind.
- Neue **Stapelbildungsverfahren** und Verpackungsprinzipien, welche eine möglichst gute Energie- und

Leistungsdichte sowie Lebensdauer bei möglichst geringen Herstellkosten gewährleisten.

- Effiziente **Wetting- und Formierungsstrategien** mit dem Ziel, die Wetting- und Formierzeiten zu reduzieren, die einen großen Anteil an der Gesamtherstellzeit der Zelle haben.
- Charakterisierung von Zwischenprodukteigenschaften zur **Früherkennung von Produktionsausschuss**.

### 3.2.3 EINFLUSS VON PRODUKTENTWICKLUNGEN AUF DEN FERTIGUNGSPROZESS

In Kapitel 3.1 wurden die Entwicklungstrends der Lithium-Ionen-Batterie (von Lithium-Ionen-optimiert, Generation 3, bis Post-Lithium-Ionen, Generation 5) vorgestellt. Während bereits gezeigt wurde, dass optimierte Systeme kontinuierliche systematische Weiterentwicklungen in Teilbereichen der Produktionstechnik bedingen (vgl. Kapitel 3.2.2), führen die Solid-State-Ansätze und in wesentlich stärkerem Maße die Metall-Luft-Systeme im Zuge der Technologiesprünge zu deutlich stärkeren Veränderungen des Produktionsprozesses. Besonderes Augenmerk bei der Verbesserung von Produktionsverfahren

für optimierte Lithium-Ionen-Technologie (Generation 3) sollte daher auf Lösungen liegen, welche bereits unmittelbar in eine industrielle Anwendung überführt werden können. Um eine solche Übertragung zu gewährleisten, sollten nicht nur separierte Einzelbereiche untersucht werden, sondern der Betrachtungsraum auf die gesamte Wertschöpfungskette modular (das heißt Abfolge von zusammenhängenden Prozessschritten) und parallel ausgeweitet werden (vgl. hierzu auch Kapitel 3.2.1). Bei Solid-State-Ansätzen (Generation 4b) und Metall-Luft-Systemen (Generation 5) müssen die Produktionsprozesse jedoch von Grund auf neu gedacht werden. So geht beispielsweise mit der Entwicklung einer Lithium-Luft-Batterie auch die Konzeption eines neuen Produktionsprozesses einher. Bei Solid-State-Ansätzen muss zumindest die Elektrodenherstellung, aber auch die Zellausbaueinheit neu entwickelt oder wenigstens angepasst werden.

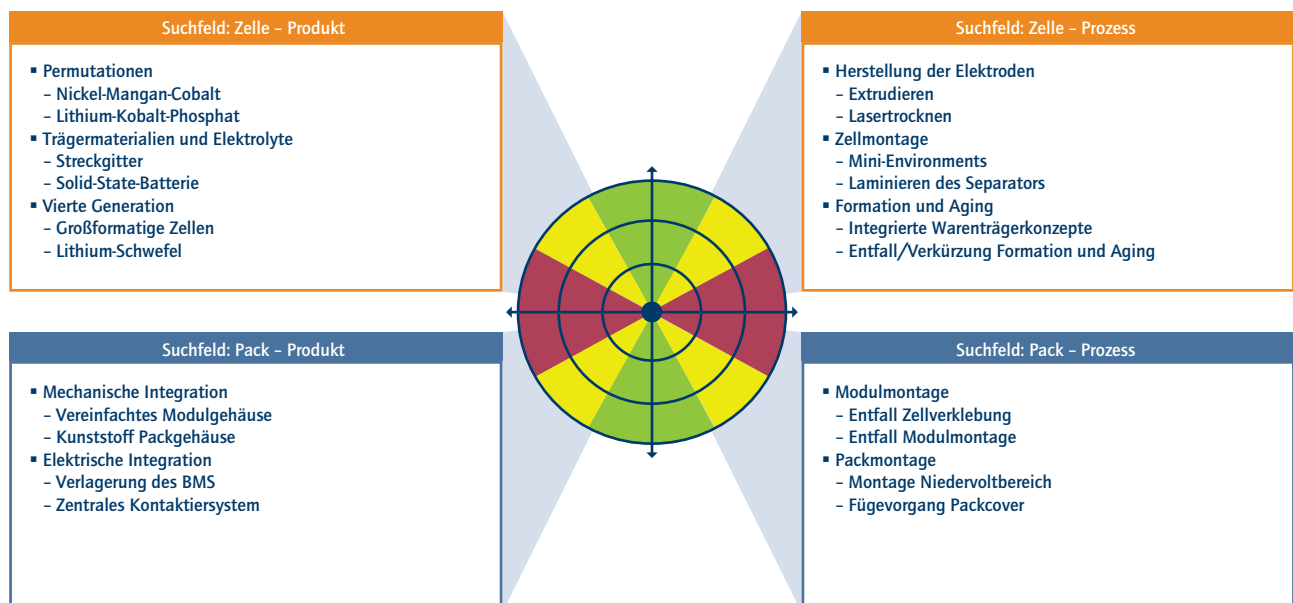
Die produkt- und prozessseitige Weiterentwicklung (sowie deren Interdependenzen) wurde vom VDMA, vom PEM der RWTH Aachen sowie vom Fraunhofer ISI in einer Technologie-Roadmap untersucht. Die Untersuchung hat gezeigt, dass Produkt- und Prozessentwicklungen insbesondere im Bereich der Batterie und ihrer Zelle zu erwarten sind. Ein Auszug aus

den zu erwartenden technologischen Produkt- und Prozessentwicklungen ist in Abbildung 7 dargestellt.

Eine **dritte Herausforderung** besteht daher darin, frühzeitig die **Fertigungstechnologien für zukünftige Batterien** zu entwickeln. Diese Herausforderung schlägt sich im Besonderen in den Post-Lithium-Ionen-Systemen (Generation 4a, c und 5) nieder, kann aber auch auf andere Produktentwicklungen ausgeweitet werden.

Optimierte Lithium-Ionen-Systeme (ohne Solid-State-Ansätze, Generation 3) erfordern technologisch gesehen nur eine stetig systematische Änderung der gesamten Anlagentechnik, wobei Anpassungen der Prozessparameter oder Erweiterungen der Anlagentechniken in einzelnen Teilbereichen der Zellproduktion weiterhin nötig sind. Wirtschaftlichkeit und Produktionsqualität dieser Anlagen sollten kontinuierlich verbessert und weiterentwickelt werden. Prinzipiell lassen sich auch Lithium-Schwefel-Batteriezellen (Generation 4a) mit vergleichbaren Produktionsanlagen herstellen, wobei hier insbesondere die Zellausbaueinheit mit Lithiumfolien eine Herausforderung darstellt.

Abbildung 7: Zu erwartende Produkt- und Prozessentwicklungen der Lithium-Ionen-Batterie



Quelle: PEM der RWTH Aachen

Für Solid-State-Ansätze (Generation 4b) hingegen sind sowohl im Bereich der Zellausfertigung als auch im Bereich der Elektrodenherstellung neue Produktionsanlagen erforderlich. Diese Maschinen und Anlagen sollten daher parallel zur Weiterentwicklung der Anlagen für optimierte Lithium-Ionen-Systeme (Generation 3) in enger Zusammenarbeit zwischen Maschinen- und Anlagenbau, Wissenschaft und Zellherstellern teilweise vollständig neu oder auf Basis bereits vorhandener Maschinen ausgearbeitet werden. Folgende Produktentwicklungen werden einen signifikanten Einfluss auf die Änderung der Produktionstechnologien haben:

- Elektrodenproduktion und Montageprozesse für **Solid-State-Konzepte von Lithium-Ionen-Batterien (Generation 4b)**,
- Elektrodenproduktion und Zellausfertigung für **Lithium-Schwefel-Batterien (Generation 4a und c) sowie**
- Produktionsprozesse für **Metall-Luft-Systeme** (Fokus: Lithium-Luft, Generation 5).

### 3.2.4 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Zusammenfassend sei festgehalten, dass drei übergeordnete Herausforderungen innerhalb der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen bestehen, die sich in untergeordnete Forschungsfragen aufteilen lassen. Die skizzierten Herausforderungen müssen nicht nur von nationalen Unternehmen, sondern auch von internationalen Zellherstellern gemeistert werden. Für die deutschen Unternehmen ergibt sich somit die **Chance, durch die „schnellere oder bessere“ Lösung** der Herausforderungen den **Rückstand gegenüber den asiatischen Herstellern aufzuholen**. Da für eine wirtschaftlich erfolgreiche Zellfertigung in Deutschland neben dem sehr guten Verständnis der Produktionsprozesse auch fundierte Detailerfahrung mit einer Massenproduktion wichtig ist, sollte aus Sicht der Wissenschaft so schnell wie möglich eine industrielle Massenfertigung von Lithium-Ionen-Batterien bereits ab Generation 2b hierzulande aufgebaut werden, um schnell in den hinteren Bereich der Lernkurve zu kommen. Eine industrielle Massenfertigung unter Berücksichtigung des Numbering-up von Linien ist erreicht, wenn eine Null-Serie der industriellen Fertigung steht. Dies entspricht etwa 0,5 GWh pro Linie und Jahr. Die in diesem Zusammenhang gewonnenen Kenntnisse können später auf marktreife neue Zelltechnologien übertragen werden, sodass sowohl Wissenschaft als auch Wirtschaft

nicht am Anfang der Lernkurve beginnen müssen. Ferner ergeben sich aus dieser industriellen Massenfertigung neue wissenschaftliche und wirtschaftliche Fragestellungen, die für eine Leitanbieterschaft der Zelle hochinteressant sind.

Einen wichtigen Erfolgsfaktor für den Aufbau einer großen Zellproduktion in Deutschland stellt der deutsche Maschinen- und Anlagenbau dar, der mittlerweile erfolgreich Maschinen für die Zellproduktion nach Asien und Nordamerika verkauft. Deutsche Unternehmen sind international konkurrenzfähig und decken dabei alle Prozessschritte der Zellproduktion ab: Mischer, Beschichtung und Trocknung, Kalandrierung, komplette Zellausfertigung für Wickel- und Stapelzellen inklusive Formierung und Alterung sowie Leitstandtechnik. Darüber hinaus sind bei einigen deutschen Herstellern auch Bestrebungen, als Systemanbieter aufzutreten, zu beobachten, wobei sie Anlagen für einzelne Prozessschritte einkaufen beziehungsweise zukaufen müssen. International sind deutsche Systemanbieter nach aktuellem Kenntnisstand aber noch nicht erfolgreich.

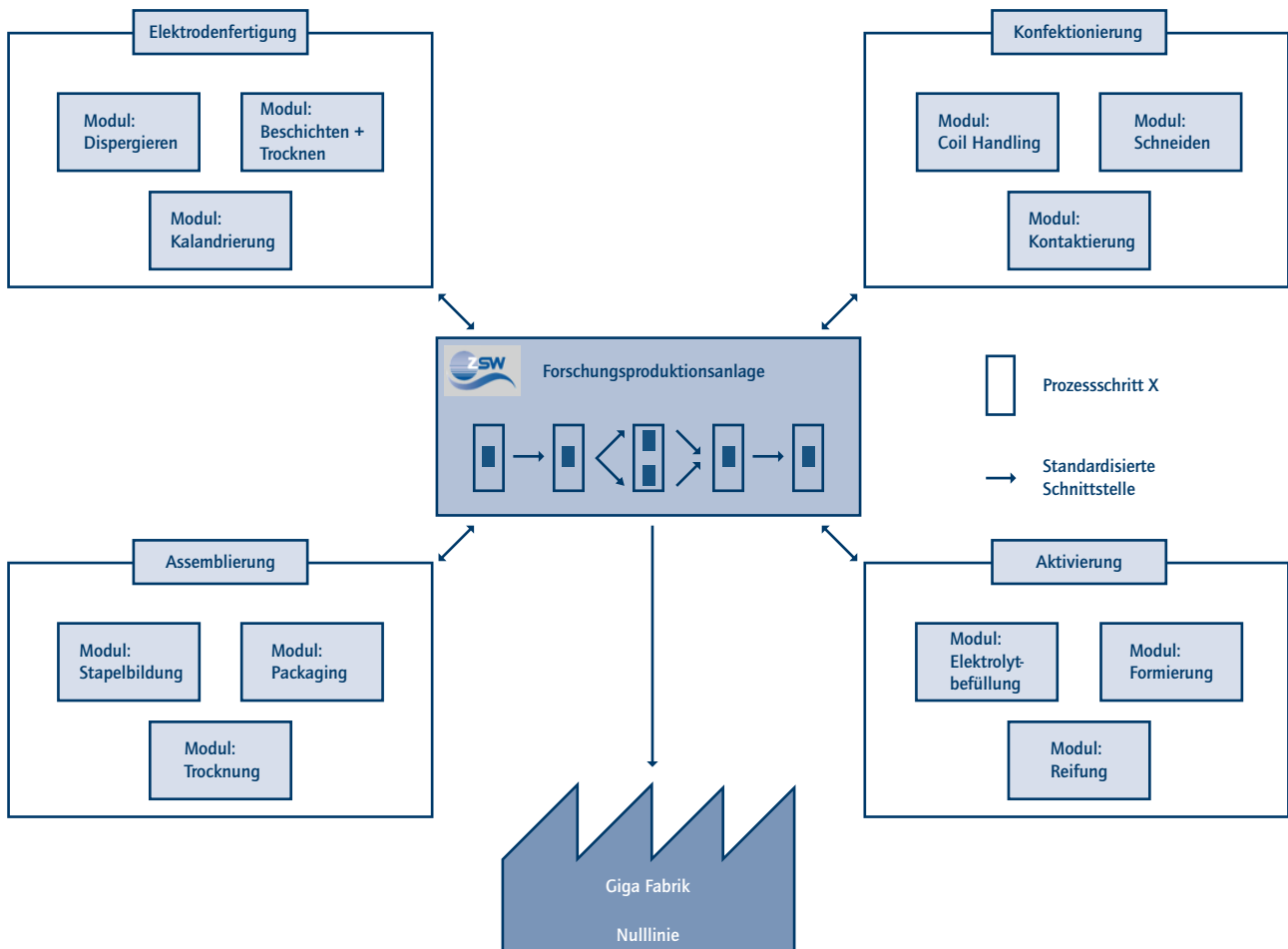
Ein vielversprechender Ansatz ist unter diesen Voraussetzungen ein Paradigmenwechsel in der Produktionstechnologie von Sonderanlagen hin zu modularen Anlagen. Durch neue Materialien können neue Prozessparameter entstehen, Förderungen von internationalen Projekten können weitere Erkenntnisse liefern, oder weitere unklare Entwicklungen können eintreten, die durch das modulare Konzept integrierbar und damit nutzbar sind.

Abbildung 8 veranschaulicht eine mögliche Struktur von modularen Anlagen. Es handelt sich dabei um einen Aufbau mit verschiedenen, austauschbaren Pilotprozessmodulen. Diese modulare Architektur ist erforderlich, damit Prozessmodule in eine Forschungsproduktionsanlage integriert werden können, ohne Änderungen in der Gesamtstruktur vornehmen zu müssen. Voraussetzung für eine solche Modularisierung wären klar definierte mechanische, steuerungstechnische und informationstechnische Schnittstellen. Für einen industriellen Produktionsmaßstab, der zu einer Nulllinie führt, müsste die Forschungsproduktionsanlage rund 6,25 MWh pro Schicht ausbringen, um sich am Maßstab der Automobilproduktion zu orientieren<sup>2</sup>.

Durch diese Modulstruktur wären die Erfahrungen einer zeitnahen Massenproduktion von optimierten Lithium-Ionen-Zellen (Generation 3) in Teilen auch auf die konventionelle

<sup>2</sup> Annahmen: 500 Fahrzeuge pro Schicht; Taktzeit ~ 1 min; Verhältnis ICE:BEV = 1:1; Mittelklasse-BEV ~ 25 KWh.

Abbildung 8: Pilot-Prozessmodule werden an unterschiedlichen Forschungsinstituten entwickelt und an eine Forschungsproduktionsanlage übermittelt.



Quelle: wbk Institut für Produktionstechnik, eigene Darstellung

Lithium-Schwefel-Technologie (Generation 4a) übertragbar, womit diese Strategie einen zusätzlichen Mehrwert böte. Der Technologiesprung von Generation 3 auf Generation 4 wird aufgrund der Solid-State-Technologie jedoch auch einen Sprung bei der Produktionstechnologie mit sich bringen und sich insbesondere in der Elektrodenherstellung signifikant von bestehenden Produktionstechnologien unterscheiden. Der Frage, ob und für welche Prozessschritte bei der Solid-State-Technologie (Generation 4b) auch Erfahrungen aus Produktionen vorheriger Zellgenerationen nutzbar sind, kann mit modularen Anlagen ebenfalls gut begegnet werden. Solch ein abgestimmtes Modulkonzept ist aus wissenschaftlicher Sicht ein echter Wettbewerbsvorteil im internationalen Markt.

Damit auch deutsche Forschungsinstitute signifikante Impulse für die eingangs skizzierten Herausforderungen bei der Fertigung setzen können, sollten die Kompetenzen der deutschen Forschungslandschaft über das bekannte Instrument der Clusterbildung gebündelt werden. So können nicht nur vorhandene wissenschaftliche Kompetenzen für mehr Effizienz miteinander verknüpft und der Massenproduktion zur Verfügung gestellt werden, sondern auch Fragestellungen aus dem skizzierten Modulkonzept zur Beantwortung in die Wissenschaft zurückgeführt werden. Die einzelnen Cluster-Mitglieder können dabei auch weiterhin untereinander im Wettbewerb stehen. Die Bündelung wird den Wissensaustausch und -aufbau und damit auch Innovationen begünstigen.

## 4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Forschung unterstützt uneingeschränkt die Anstrengungen, die Batterie- und Zellfertigung in Deutschland massiv auszubauen und den Vorsprung internationaler Anbieter nicht nur aufzuholen, sondern diese möglichst bald zu überholen. Auf diese Weise kann das Ziel erreicht werden, Deutschland zum Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität zu machen, da Batterie und Batteriezellen mindestens ein Drittel der Wertschöpfung von Elektrofahrzeugen ausmachen.

Auf Basis einer Workshop-Reihe führender Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Institutionen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Es wird deutlich, dass in den nächsten Jahren (bis mindestens 2025) eine **optimierte Lithium-Ionen-Technologie (Generation 3) die dominierende Zelltechnologie** sein wird und noch erhebliches Potenzial zu deren Weiterentwicklung besteht.
2. Dabei müssen **Zelltechnologie und Produktionstechnologie simultan und interaktiv** vorangetrieben werden.
3. Ein **Sprung in der Produktionstechnologie** könnte in Zukunft bei Einführung von derzeit stark explorativen Technologien wahrscheinlich werden, wie zum Beispiel der Solid-State-Technologie (Generation 4b) oder der Lithium-Luft-Technologie (Generation 5).
4. Dieser Sprung gelingt wesentlich besser, wenn sehr **fundierte Produktionserfahrungen aus vorangegangenen Zelltechnologien** bestehen. Damit muss nicht am Anfang der Lernkurve begonnen werden, und es besteht eine gute Chance, sich im internationalen Wettbewerb von Anfang an zu behaupten.
5. Aus wissenschaftlicher Sicht ist ein **kurzfristiger Einstieg** in eine **industrielle großvolumige Zellproduktion von optimierten Lithium-Ionen-Zellen** (Generation 3) von großer Wichtigkeit, da bestehende Erkenntnisse der Forschung in die Großproduktion übertragen und neue wissenschaftliche Fragestellungen für Weiterentwicklungen aufgeworfen werden können. Forschungsseitig müssen die einzelnen Prozessschritte (als Module) der Gesamtproduktionskette kontinuierlich weiterentwickelt und genauer verstanden werden, um das Ziel der produktionstechnischen Führerschaft nicht nur zu erreichen, sondern diese dann auch zu halten.
6. Unabhängig von Investitionsentscheidungen ist sicherzustellen, dass **Forschung und Entwicklung in aktuellen und zukünftigen Zellgenerationen und Produktionstechnologien** kontinuierlich vorangetrieben werden. Forschung und Entwicklung müssen dabei technologieoffen gestaltet werden. Sowohl optimierte Lithium-Ionen-Technologien (Generation 3, 4b) als auch Post-Lithium-Konzepte (Generation 4a, c und 5) müssen simultan bearbeitet werden.
7. Zelltechnologien und Zellproduktionstechnologien sollten in verschiedenen, eng aufeinander abgestimmten Forschungsverbünden mit bereits bestehenden und gegebenenfalls noch zu erweiternden Produktionsforschungseinrichtungen (Pilotanlagen) parallel entwickelt werden. Eine enge **Abstimmung und Koordination von Forschung und Entwicklung** kann durch das Instrument der Clusterbildung erfolgen. Schließlich sollte das **Scale-Up von den flexiblen Pilotanlagen** über die Forschungsproduktionslinie in Ulm auf Großanlagen für eine Massenproduktion in einer konzertierten Aktion verfolgt werden, um Produktentwicklungen (Zelltechnologie und Produktionsprozesse) zu beschleunigen. Forschungsergebnisse sollten dabei kontinuierlich prozessschritt- respektive modulweise in die großvolumige Zellproduktion übertragen werden.

## 5 NÄCHSTE SCHRITTE

Batterien sind für unsere heutige Gesellschaft in vielen Bereichen zunehmend von enormer Bedeutung: Elektromobilität, mobile Elektronik und stationäre Speicher für dezentrale Energiesysteme sind hier nur einige wenige Stichworte. Wenn sich Deutschland auf den daraus resultierenden Zukunftsmärkten erfolgreich etablieren möchte, müssen die Batterietechnologien hierzulande beherrscht und zu konkurrenzfähigen Produkten ausgebaut werden. Dabei spielt die Zellfertigung eine Schlüsselrolle in der Wertschöpfungskette. Es erscheint außerordentlich wichtig, in einer konzertierten Aktion konkurrenzfähige **Zelltechnologien** bis zur Produktionsreife zu entwickeln.

Deutschland hat inzwischen wieder eine sehr leistungsfähige Forschungsstruktur in Industrie und öffentlich geförderten Forschungslabors im Bereich der Batterietechnologien aufgebaut. Diese Forschung und Entwicklung deckt die ganze erforderliche Bandbreite von der Grundlagenforschung an Elektrodenmaterialien und Elektrolyten über die verschiedenen Anwendungsbereiche bis hin zur Produktionsforschung für eine hocheffiziente Zellfertigung ab. Die erforderlichen Kooperationen zwischen den unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungslabors sind mittlerweile überwiegend etabliert, neue Forschungs- und Ausbildungskapazitäten wurden geschaffen, und es herrscht eine sehr motivierte Aufbruchstimmung, um gemeinsam die internationale Konkurrenzfähigkeit zu erreichen.

Die Entwicklung von **Produktionsverfahren** zur wirtschaftlichen Zellfertigung, insbesondere zur Fertigung großer Zellvolumina, ist – anders als bei den Zelltechnologien – derzeit nicht in ausreichendem Maße gegeben. Dabei sollte in den nächsten Jahren parallel an Produktionsverfahren für unterschiedliche Zelltypen gearbeitet werden, da momentan nicht abzusehen ist, welche Zelltechnologien sich mittelfristig durchsetzen werden. Außerdem kann der Vorsprung der asiatischen Konkurrenz nur durch konzertiertes Vorgehen wettgemacht werden – vor allem, wenn sich größere Investitionen in großtechnische Produktionslinien lohnen sollen.

Es wird deshalb vorgeschlagen, die heute in der Zellproduktion aktiven Forschungsinstitutionen eng zu vernetzen und die an verschiedenen Standorten heute schon vorhandenen flexiblen Forschungs- und Versuchsanlagen zur Produktionstechnik sinnvoll, das heißt entsprechend den jeweils vorhandenen

wissenschaftlichen Kompetenzen und Stärken, auszubauen beziehungsweise weiterzuentwickeln. Hierbei ist ein koordiniertes und kontinuierlich abgesprochenes Vorgehen innerhalb des Zellproduktion-Netzwerkes anzuraten. Diese Versuchsanlagen sollten von Konsortien aus universitären/außeruniversitären und industriellen Partnern betrieben werden. An der Forschungsproduktionslinie in Ulm (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien – KLiB) sollten begleitende Scale-Up-Untersuchungen zu den erfolgreichsten Versuchen stattfinden, um den Übergang zu großtechnischen industriellen Produktionsanlagen zu erleichtern und zu beschleunigen. Eine solche Produktionstechnik-Forschungsinitiative an mehreren Standorten könnte durch einen gemeinsamen, neutralen Beirat begleitet werden, der für Abstimmung und Kohärenz sorgt. Der effiziente Betrieb dieser Forschungs- und Versuchsanlagen zur Produktionstechnik (Personalressourcen, Betriebskosten) muss mittelfristig zusätzlich durch eine Basisfinanzierung gesichert sein. Diese Finanzierung ist unabhängig vom Projektgeschäft und stellt eine finanzielle Konstante dar, um eine schnelle und effiziente Weiterentwicklung der Produktionstechnologie zu gewährleisten.

Der Forschungsbedarf liegt zum einen in der Stärkung des technologischen Fundamentes für eine Massenproduktion von Lithium-Ionen-Zellen in Deutschland. Forschungsziel muss es hier insbesondere sein, den Einfluss der unterschiedlichen Prozessschritte und Prozessparameter auf die Kosten und Produktqualität (Performance, Qualitätsschwankungen, Ausschuss) im Detail zu verstehen und auch quantitativ beschreiben zu können. Zudem ist gemeinsam mit dem deutschen Maschinen- und Anlagenbau zu prüfen, ob die Wirtschaftlichkeit der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen durch alternative Produktionsverfahren (zum Beispiel kontinuierliche Pastenherstellung, alternative Trocknungsverfahren oder alternative Stapelverfahren) gesteigert werden kann. Zum anderen sollte parallel die Produktionstechnologie für Solid-State-Batterien mit Li-Ionen (Generation 4b) und mit Lithiumanode (Generation 4c) sowie Lithium-Schwefel-Batterien (Generation 4a) rechtzeitig entwickelt und massentauglich gemacht werden. Inwieweit Produktionstechnologien für Lithium-Luft-Batterien (Generation 5) entworfen werden sollen, muss zu einem späteren Zeitpunkt entschieden werden, wenn Performance und Marktchancen dieser Zelltechnologie besser eingeordnet werden können.