Elektrische Energiespeicher

Fahrplan 2020

Bericht

RECHTLICHER HINWEIS: Übersetzungen von Materialien in andere Sprachen als Englisch sind lediglich als Hilfestellung für Personen gedacht, die der englischen Sprache nicht mächtig sind, und sind rechtlich nicht bindend. Wir sind bestrebt, eine genaue Übersetzung des englischen Originaltexts bereitzustellen, aber aufgrund von sprachlichen Nuancen bei der Übersetzung in eine Fremdsprache können geringfügige Unterschiede bestehen. Diese Übersetzung wird Ihnen unter der Voraussetzung, dass Sie diesen rechtlichen Hinweis zur Kenntnis genommen haben, zur Verfügung gestellt. Das APC haftet nicht für die Verwendung der Übersetzung durch Sie oder einen Dritten, falls sich herausstellen sollte, dass die Übersetzung Mängel aufweist.

automotive council UK

ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

Überblick: Elektrische Energiespeicher

Lithium-Ionen-Batterien nähern sich im Automobilbereich zunehmend der Marktreife. Aufgrund drastischer Kostensenkungen bei Batterien blickt die Automobilindustrie auf ein Jahrzehnt voller Umbrüche zurück. Diese Marktreife wird auch in den Themen wieder aufgegriffen, die bei Branchenexperten ganz oben auf der Agenda stehen: die nachhaltige und ethische Versorgung mit Batterien und Rohstoffen sowie die Suche nach kostengünstigen Möglichkeiten zur Wiederverwendung, zum Recycling und zur Entsorgung von Batterien.

Nahezu 80 % der Branchenexperten sind der Auffassung, dass Elektrospeicherfahrzeuge bis zum Jahr 2035 oder gar früher genauso viel in der Herstellung kosten werden wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Aus diesem Grund sind die Hersteller von Fahrzeugen mit hohen Stückzahlen darauf angewiesen, dass ihre Zulieferer immer günstigere Lösungen anbieten, die Energiedichte der Packs aber gleich hoch bleibt. Es gibt keine optimale Batteriestrategie oder technologie – jedes Fahrzeugsegment zwingt die Ingenieure, die verschiedenen Eigenschaften aufeinander abzustimmen und die entsprechenden Kompromisse zu finden. Für zukünftige Transportanwendungen ist es unerlässlich, eine Vielzahl von Forschungs- und Fertigungsmöglichkeiten zu schaffen.

Der Schwerpunkt des Fahrplans 2020 liegt in erster Linie auf kosteneffizienten Anwendungen und ist in zwei Teile unterteilt: die Batteriezelle (Werkstoffe und Herstellung) und die Batteriemodule und -packs. Einzelne Technologiebereiche, die in dem Fahrplan aufgezeigt werden, sind jedoch eher auf Anwendungen mit hohem Stromverbrauch bzw. hoher Leistung ausgelegt.

Fahrplan für Zellwerkstoffe und die Herstellung

- Das Streben nach einer verbesserten Energiedichte wird wahrscheinlich dazu führen, dass Grafitanoden weiterentwickelt werden, und dafür sorgen, dass Silizium oder neuartige Werkstoffe bei Anwendungen mit hohem Leistungsbedarf vermehrt zum Einsatz kommen.
- Lithium-Eisen-Phosphat hat sich in den letzten Jahren als geeigneter Werkstoff für kostengünstige Kathoden herauskristallisiert, während Batterien mit hohem Nickelgehalt (z. B. NCA, NCM, eLNO) eine höhere Energiedichte und schnelleres Aufladen ermöglichen.
- Andere Werkstoffe:
  - Elektrolyte werden weiterentwickelt, allerdings haben Festelektrolyte in Kombination mit Lithium-Metall-Anoden den Vorteil, die Energiedichte deutlich zu verbessern und die Sicherheit zu erhöhen, obwohl sie mit einem komplexen Herstellungsprozess einhergehen.
  - Da die Zellen eine immer größere Kapazität aufweisen, werden verbesserte Separatoren für das Thermomanagement benötigt.
  - Die Nachfrage nach immer dünneren Folien könnte zu einer funktionalen Integration von Kathoden und Anoden führen.
  - Das Streben nach einer nachhaltigen Fertigung wird in vielen Bereichen für Fortschritte sorgen: Der Einsatz von Lösungs- und Bindemitteln wird verringert oder es wird gänzlich darauf verzichtet, die Verwendung knapper Werkstoffe sowie gefährlicher chemischer Stoffe wird schrittweise eingestellt, energieintensive Zellherstellungsverfahren werden reduziert und es gibt verstärkte Bemühungen um die Verringerung von Abfällen und die Wiederverwendung/das Recycling von Werkstoffen.
  - Mit Blick auf die Zukunft zeichnen sich Natriumionen als äußerst kostengünstige Batterielösung ab, die mit Vorteilen in der Versorgung einhergeht, da Natrium das sechsthäufigste Element auf der Erde ist.

Ein vollständiges Glossar ist am Ende dieses Berichts zu finden.

Überblick: Elektrische Energiespeicher

Fahrplan für Batteriemodule und -packs

- Mit der zunehmenden Nutzung von Lithium-Ionen-Zellen setzen die Hersteller auf eine Reihe von Zellformaten. Die drei wesentlichen Optionen sind zylindrische, prismatische und Pouch-Zellen. Es ist schwer vorherzusagen, welche Option sich etablieren wird, da jede einzigartige Vorteile mit sich bringt. Voraussichtlich werden auch neuartige Zellformate entstehen, die für neue chemische Stoffe optimiert sind.
- Die Software für Batteriemanagementsysteme wird in Stromverteilungssystemen immer ausgereifter, wodurch nicht nur die Leistung und der Zustand der Batterie verbessert, sondern auch Lösungen für die Wiederverwendung der Batterien optimiert werden. Sammelschienen (auch Busbars genannt) und Steckverbinder/Schalter müssen optimiert werden, wenn bei Fahrzeugarchitekturen höhere Spannungen zum Einsatz kommen.
- Bei Anwendungen mit einer höheren Leistung und schnellerem Aufladen gewinnt das Thermomanagement zunehmend an Bedeutung. Es bedarf neuer Methoden, um dafür zu sorgen, dass Batterien auf ihrer optimalen Betriebstemperatur gehalten werden können, einschließlich neuer passiver und aktiver Kühlstrategien.
- Neben einer weiteren Gewichtsreduzierung und der Erhöhung des Packungsverhältnisses ist eine verbesserte Integration der Batteriepacks in das restliche Fahrzeug angedacht, und zwar als primäre Strukturelemente, die möglicherweise über das gesamte Fahrzeug verteilt sind, und unter Verwendung kombinierter Thermomanagementsysteme.
- Um dem regulatorischen Druck in Bezug auf Null-Netto-Emissionen und die Ökobilanz gerecht zu werden, müssen an mehreren Fronten Anstrengungen unternommen werden:
  - Verbesserung der Rückverfolgbarkeit, Überwachung des Batteriezustands und Erstellung eines Batteriepasses, um Leistungssteigerungen zu bewirken und weitere Wiederverwendungsmöglichkeiten zu erschließen;
  - Entwicklung von Batteriepacks mit Blick auf die Wiederverwendung – insbesondere umfassendere Kenntnisse in Bezug auf die Degradationsrate und die Möglichkeit, Batteriezellen mit automatisierten Werkzeugen aus den Packs zu extrahieren. Angesichts der zunehmenden Integration und Verwendung von Polymeren und gemischten Werkstoffen stellt dies eine besondere Herausforderung dar;
  - CO_2-freie Herstellung. Die Montage von Modulen und Packs ist im Vergleich zur Zellherstellung ein energiearmer Prozess, bei dem möglicherweise schon früh das Ziel der Null-Netto-Emissionen erreicht werden kann.

Vorwort und Danksagungen

Das Advanced Propulsion Centre UK (im Folgenden „APC“) möchte sich für die umfangreiche Unterstützung durch Industrie und Wissenschaft bei der Ausarbeitung und Veröffentlichung dieses Fahrplans bedanken.

Wir bedanken uns beim Automotive Council für das Vertrauen, das er uns bei der Überarbeitung der Produkt- und Technologiefahrpläne entgegengebracht hat, sowie für die kontinuierliche Unterstützung.

Dieses Vorhaben wurde ferner maßgeblich vom Ministerium für Wirtschaft, Energie und Industriestrategie (Department for Business, Energy and Industrial Strategy, im Folgenden „BEIS“) unterstützt.

Neville Jackson
Im Namen des
UK Automotive Council

Ich freue mich, Ihnen den Technologiefahrplan 2020 für Antriebstechnik in der Automobilindustrie vorstellen zu können, den das Advanced Propulsion Centre (im Folgenden „APC“) in enger Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt hat. In diesen Fahrplänen werden entscheidende Ziele für die Zukunft und die vielversprechendsten Wege zu einem CO_2-freien und nachhaltigeren künftigen Fuhrpark aufgezeigt. Sie sind ein wesentliches Instrument für die Entwicklung einer gezielten FuE-Agenda, die insbesondere für gemeinsame Innovationen relevant ist.

Die Fahrpläne, die auf den Grundlagen der vorherigen Fahrpläne des UK Automotive Council aufbauen, wurden vom APC im Jahr 2017 ausgearbeitet. Sie wurden auf den neuesten Stand gebracht, um zu verdeutlichen, wie dringend das Ziel des Vereinigten Königreichs, bis 2050 Null-Netto-Emissionen zu erreichen, angegangen werden muss. Der Wandel im Bereich der Antriebstechnologien wurde in den letzten Jahren erheblich beschleunigt: Die Verbreitung von Fahrzeugen mit Elektroantrieb nimmt zu, die Preise für Batterien sind schneller gesunken als zunächst angenommen, alternative CO_2-freie Technologien wie Brennstoffzellen kommen in einer beeindruckenden Geschwindigkeit zur Marktreife und saubere Kraftstoffe, unter anderem Wasserstoff, sind auf dem Vormarsch, um derzeitige fossile Kraftstoffe zu ersetzen.

Dabei gilt es allerdings große Herausforderungen zu bewältigen, da der Wandel noch schneller vonstattengehen muss. Voraussetzung dafür ist eine intensivere Forschung und Entwicklung sowie die Kommerzialisierung, wodurch erschwingliche Produkte auf den Markt gebracht werden, die für Verbraucher noch attraktiver sind. Die Technologiefahrpläne 2020 beruhen auf Umfragen unter Branchenexperten und Panels und liefern einen konsolidierten Überblick über zukünftige Ziele, Technologien und Zeithorizonte für Automobilantriebe.

Mit dem Bericht bieten wir der Automobilindustrie Erkenntnisse und eine gemeinsame technologische Ausrichtung, um die Entwicklung und Bereitstellung erstklassiger Lösungen zu beschleunigen. Die Fahrpläne stellen eine wichtige Informationsquelle dar, wenn es darum geht, gemeinsame FuE-Möglichkeiten zu erschließen, um die künftigen Herausforderungen in den Bereichen Mobilität, Gütertransport und Forschung und Entwicklung von nicht für den Straßenverkehr bestimmten Fahrzeugen anzugehen.

Prof. David Greenwood
Universität Warwick
APC Spoke for Electric Energy Storage

Die Batterietechnologie ist der Schlüssel zur Dekarbonisierung des Verkehrs – unabhängig davon, ob sie allein in batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen oder in Kombination mit einem Motor oder einer Brennstoffzelle eingesetzt wird. Sie ist eine einzigartige Komponente, die das Tempo der Elektrifizierung des Verkehrs vorgibt. In den letzten zehn Jahren sind die Kosten drastisch gesunken und die Energiedichte wurde erheblich gesteigert, wodurch Elektrofahrzeuge in den meisten Fahrzeugsegmenten zu praktischen und erschwinglichen Optionen werden.

Gleichzeitig hat sich Großbritannien viel stärker auf die Entwicklung von Batterien fokussiert und verfolgt Pläne für eine Fertigung im Maßstab einer Gigafabrik. Dadurch treten wiederum die Unternehmen der Lieferkette auf den Plan, die die benötigten Komponenten und Werkstoffe liefern. Fortschritte in der Technologie, Innovationen in der Fertigung und Skaleneffekte haben zu Verbesserungen geführt.

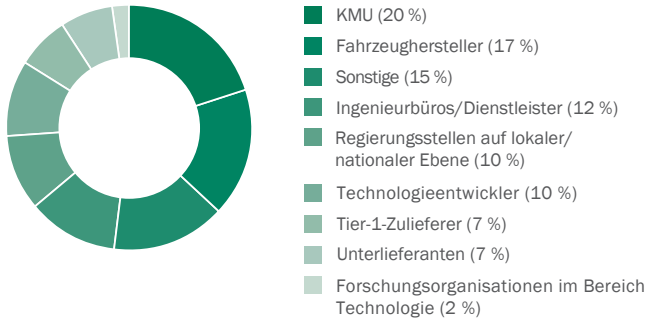
Diese Entwicklungen werden weiter beschleunigt, wodurch sie zu einer weitaus komplexeren Landschaft führen als es sie früher gab. Daher ist der Technologiefahrplan 2020 für die Speicherung elektrischer Energie deutlich umfassender als sein Vorgänger aus dem Jahr 2017. Er enthält die besonderen Anforderungen, die sich aus der zunehmenden Anzahl von Batterieanwendungen für den Verkehr ergeben, sowie technische Lösungen, mit denen diese Anforderungen erfüllt werden können und durch die gleichzeitig die Kosten gesenkt und die Leistung für den jeweiligen Zweck gesteigert werden.

Dadurch wird der Fahrplan für die Zukunft zwar komplexer, aber weitaus umfassender, da kritische Faktoren abgehandelt werden, die in der Vergangenheit nicht berücksichtigt wurden. Wir hoffen, dass dieser Fahrplan den Entscheidungsträgern eine bessere Hilfestellung bietet.

Erkenntnisse aus der Online-Umfrage unter Branchenexperten 2020

Die größten Herausforderungen liegen in der hohen Abhängigkeit von Rohstofflieferungen aus Asien und in der verantwortungsvollen und nachhaltigen Entsorgung von Altbatterien bei einer gleichzeitig rasant wachsenden Nachfrage.

An der im September 2020 durchgeführten Online-Umfrage nahmen unterschiedlichste Branchenexperten teil:



Die drei wichtigsten Themen der Experten

1 Nachhaltige, ethische und kommerziell wettbewerbsfähige Versorgung mit Batterien

2 Gesteigerte Wiederverwendung, effizientes Recycling und ökologisch verantwortungsvolle Entsorgung am Ende der Lebensdauer

3 Umweltfreundliche und auf die Ökobilanz ausgerichtete Rohstoffgewinnung und -veredelung

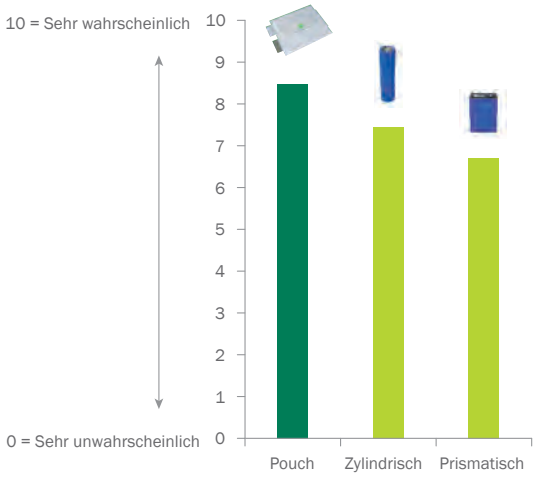
Wann werden batteriebetriebene Elektrofahrzeuge kostenmäßig mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren gleichziehen?

Nahezu 80 % der Experten sind der Auffassung, dass batteriebetriebene Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2035 genauso viel in der Herstellung kosten werden wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

Anmerkung:
Da die Kosten für Batteriepacks bis 2025 voraussichtlich 100 USD/kWh erreichen werden, ist es wahrscheinlich, dass batteriebetriebene Elektrofahrzeuge schon deutlich früher kostentechnisch mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren gleichauf sein werden.

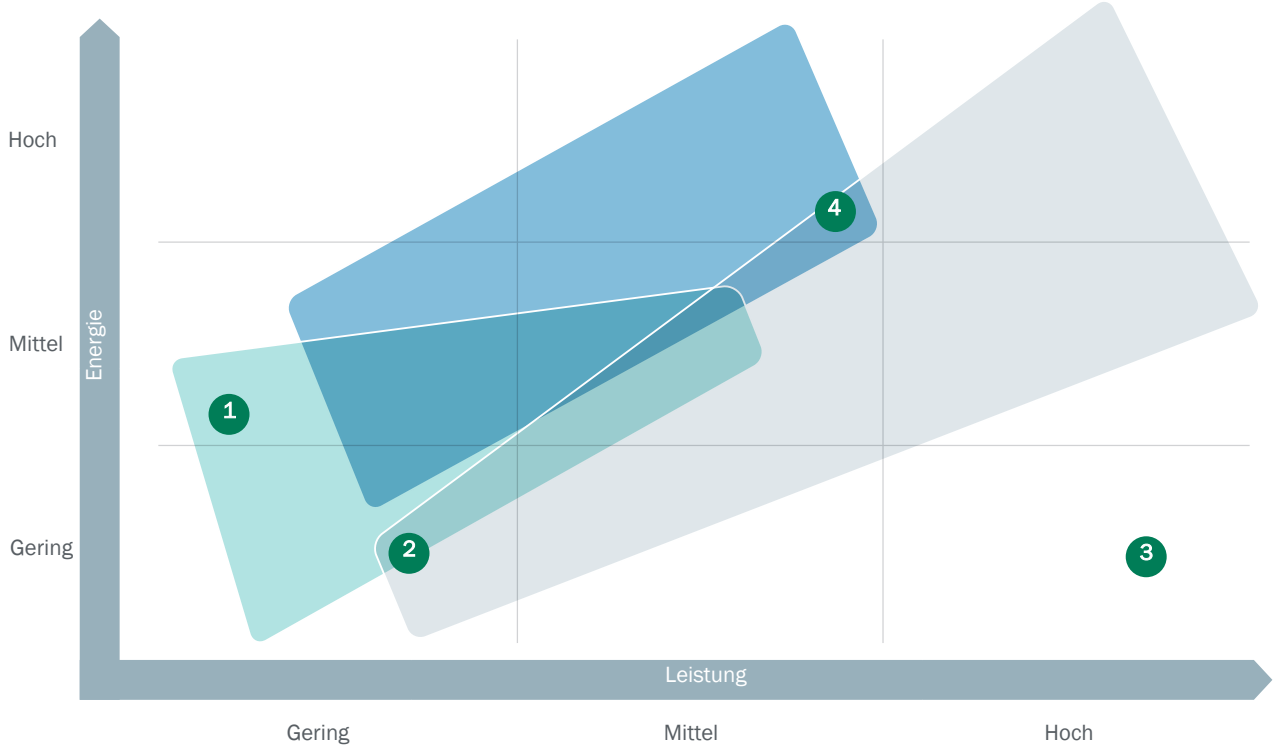
Welches Zellformat wird auf lange Sicht den Markt für Batterien für Elektrofahrzeuge dominieren?

In diesem Bereich gibt es keinen eindeutigen Gewinner, da alle Optionen individuelle Stärken und Schwächen sowie eine entsprechende Abhängigkeit von der Lieferkette aufweisen.



Energie- und Leistungsspektrum bei verschiedenen Anwendungen

Antriebssysteme sind je nach Einsatzgebiet und Arbeitszyklus auf spezifische Leistungs- und Energieanforderungen ausgelegt. Die folgende Grafik bietet einen Überblick über die wichtigsten Massenprodukte.



Leichte Nutzfahrzeuge < 3,5 t | Busse und Reisebusse | Schwerlaster > 3,5 t und nicht für den Straßenverkehr bestimmte Fahrzeuge

Der Fahrplan 2020 liefert Werte für
(1) auf Energie ausgerichtete, kostensensitive Kennzahlen.

Weitere Kennzahlen sind über das Cross-Sector Battery Systems Innovation Network (Innovationsnetzwerk für branchenübergreifende Batteriesysteme; CSBS) des Knowledge Transfer Network (KTN) erhältlich.

1 Auf Energie ausgerichtet, kostensensitiv:
Die zentralen strategischen Treiber sind niedrigere Kosten für Packs und eine verbesserte Ladungsannahme bei gleichbleibender oder optimierter Energiedichte. Der Grund dafür ist, dass eine hohe Kapazität und schnelleres Aufladen erforderlich sind, um die Anforderungen zu erfüllen.

2 Auf Leistung ausgerichtet, kosteneffizient:
Der zentrale strategische Treiber für dieses Cluster ist die kurzzeitige Leistungsaufnahme zu erschwinglichen Preisen. Für die Anwendungen wären eine höhere Leistung und eine verbesserte Energiedichte von Vorteil, jedoch nicht auf Kosten der Preise.

3 Auf Leistung ausgerichtet, gewichtssensibel:
Der wichtigste strategische Treiber für dieses Cluster ist die Erreichung einer hohen Leistung bei minimalem Gewicht, wobei es einige Anforderungen an die Energiedichte gibt. Die Kosten spielen im Vergleich zum Volumen im Automobilbereich eine geringere Rolle.

4 Auf Energie und Gewicht ausgerichtet, leistungseffizient:
Zentrale strategische Treiber sind eine höhere gravimetrische Energiedichte und eine bessere Leistungsdichte bei kontinuierlicher Entladung, um eine konstantere Leistung mit größerer Reichweite oder geringerem Fahrzeuggewicht zu gewährleisten.

Technologiekennzahlen für auf Energie ausgerichtete, kosteneffiziente Anwendungen

Technologiekennzahlen, die die Industrie in einem wettbewerbsorientierten Massenmarkt wahrscheinlich erreichen wird. Sämtliche Kosten- und Leistungskennzahlen sind ehrgeizig, ihnen liegt jedoch die gleiche Technologie zugrunde.

		2020	2025	2030	2035
Kennzahlen für Zellen	Transiente Leistungsdichte bei der Entladung (W/kg)	1100	1180	1260	1340
	Gravimetrische Energiedichte der Zelle (Wh/kg)	280	300	320	340
	Volumetrische Energiedichte der Zelle (Wh/l)	720	770	850	900
	Kosten für Zellen (USD/kWh)	85	70	58	48

		2020	2025	2030	2035
Kennzahlen für Packs	Transiente Leistungsdichte bei der Entladung (W/kg)	715	825	945	1070
	Ladeakzeptanz (kontinuierliche C-Rate)	1,5	2,5	3,5	4
	Gravimetrische Energiedichte des Packs (Wh/kg)	185	210	240	275
	Volumetrische Energiedichte des Packs (Wh/l)	470	540	640	720
	Kosten für Packs (USD/kWh)	125	97	77	63

Anmerkungen:

- Es wurden zwei Fahrpläne erstellt, in denen Innovationen für Packs und für Zellen in gleichem Maße berücksichtigt werden. Dadurch wird deutlich, dass Innovationen in beiden Bereichen erforderlich sind, um die künftigen Leistungskennzahlen zu erreichen.
- Diese Kennzahlen entsprechen der Kategorie 1 „auf Energie ausgerichtet, kosteneffizient“, die von der Warwick Manufacturing Group (WMG) und dem Innovationsprogramm „Faraday Battery Challenge“ im Rahmen des Cross-Sector Battery Systems Innovation Network (Innovationsnetzwerk für branchenübergreifende Batteriesysteme; CSBS) des Knowledge Transfer Network (KTN) entwickelt wurde.
- Für diesen Fahrplan wurden die niedrigsten Kosten der Vorgaben des CSBS Innovation Network übernommen. Damit soll herausgestellt werden, dass niedrige Kosten bei dieser Technologie im Vordergrund stehen.
- Für die Energie- und Leistungsdichte werden folgende Packungsverhältnisse (Cell-to-Pack, CTP) zugrunde gelegt: 65 % für 2020, 70 % für 2025, 75 % für 2030 und 80 % für 2035.
- Die C-Rate wurde in diesem Jahr hinzugefügt, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass neben anderen kostengünstigen chemischen Stoffen in Zukunft auch schnellere C-Raten zu erwarten sind.
- Spezifische Produktanwendungen finden Sie auf Seite 1 des Fahrplans für Energie und Leistung, und die entsprechenden Kennzahlen finden Sie in den Zielen des CSBS Innovation Network des KTN.

Technologiekennzahlen
Im Jahr 2020 ersetzen sie die Ziele in den Fahrplänen und geben eine Stoßrichtung und einen Ansatz zur Messung der Best-in-class-Leistung für diese Technologie vor.

Die Kennzahlen beziehen sich über alle Kosten- und Leistungsbereiche hinweg immer auf die gleiche Technologie.

Technologiekennzahlen für auf Energie ausgerichtete, kosteneffiziente Anwendungen

Technologiekennzahlen, die die Industrie in einem wettbewerbsorientierten Massenmarkt wahrscheinlich erreichen wird. Sämtliche Kosten- und Leistungskennzahlen sind ehrgeizig, ihnen liegt jedoch die gleiche Technologie zugrunde.

		2020	2025	2030	2035
Kennzahlen für Zellen	Transiente Leistungsdichte bei der Entladung (W/kg)	1100	1180	1260	1340
	Gravimetrische Energiedichte der Zelle (Wh/kg)	280	300	320	340
	Volumetrische Energiedichte der Zelle (Wh/l)	720	770	850	900
	Kosten für Zellen (USD/kWh)	85	70	58	48

		2020	2025	2030	2035
Kennzahlen für Packs	Transiente Leistungsdichte bei der Entladung (W/kg)	715	825	945	1070
	Ladeakzeptanz (kontinuierliche C-Rate)	1,5	2,5	3,5	4
	Gravimetrische Energiedichte des Packs (Wh/kg)	185	210	240	275
	Volumetrische Energiedichte des Packs (Wh/l)	470	540	640	720
	Kosten für Packs (USD/kWh)	125	97	77	63

Die **transiente Leistungsdichte** gibt die Spitzenleistung an, die ein Pack oder eine Zelle erreichen kann. Für die Zwecke dieses Fahrplans bedeutet „transient“ weniger als 10 Sekunden bei 25 °C und 50 % Ladezustand.

Die C-Rate ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der ein Batteriepack geladen und entladen wird. Ein Wert von 4C im Jahr 2035 bedeutet, dass die Batteriepacks in 15 Minuten vollständig geladen sein sollen.

Die Energiedichte gilt sowohl für die Zelle als auch für das Pack und wird volumetrisch und gravimetrisch gemessen. Mit der Energiedichte wird angegeben, wie viel Platz ein Batteriepack einnimmt und wie schwer es ist.

Die **Kosten** für diese Ziele beziehen sich auf die Einkaufspreise der Erstausrüster (OEM) für Zellen und Packs. Bei auf Energie ausgerichteten und kostensensitiven Anwendungen sind die Kosten maßgeblich.

Fahrplan 2020

Elektrische Energiespeicher

Fahrplan für Zellwerkstoffe und die Herstellung

Technologiekennzahlen für die Jahre 2020–2035 finden Sie auf Seite 2.

automotive council UK

ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

Dieser Fahrplan stellt eine Momentaufnahme der weltweiten Prognosen für Antriebstechnologien in der Automobilindustrie für den Massenmarkt dar. Anwendungsspezifische Technologien können je nach Region unterschiedlich sein.

Dunkler Balken: Die Technologie ist auf dem Massenmarkt etabliert. In diesem Zeitrahmen werden bahnbrechende Innovationen erwartet.

Übergang: Ein Übergang bedeutet kein Rückzug aus dem Markt, sondern eine Neuausrichtung des FuE-Schwerpunkts.

Balken mit gestrichelter Linie: Marktreife: Die Technologie hat Marktreife erreicht. Sie verbleibt voraussichtlich im Massenmarkt, bis sie verdrängt wird.

Elektroden

Anoden

- Verbesserte Energiedichte für Li-Ionen-Anoden (z. B. Grafit, Si-Komposite) → Maximale Energiedichte für Li-Ionen-Anoden (z. B. 100 % Silizium)
- Verbesserte Leistungsdichte für Li-Ionen-Anoden (z. B. LTO) → Maximale Leistungsdichte für Li-Ionen-Anoden (z. B. Anoden aus Nioboxid)
- Anoden der nächsten Generation für neue Anwendungen (z. B. Lithium-Metall-Anoden, Hard-Carbon für Natrium-Ionen-Kathoden)

Kathoden

- Geringere Kosten für Li-Ionen-Batterien (z. B. LFP) → Extrem günstige Kathoden (z. B. manganreiche, Lithium-Schwefel- (Li-S), Natrium-Ionen-Kathoden)
- Höhere Energiedichte für Li-Ionen-Kathoden (z. B. NCA, NMC, eLNO, NFA, LMNO) → Lokalisierte Partikeloptimierung, Mischung von Kathoden (z. B. kolloidale Kathoden)
- Leistungsstarke Li-Ionen-Kathoden (z. B. Nano-Phosphat, dünnere Kathoden, kleinere Partikel)
- Kathoden mit hoher Energie- und Leistungsdichte (z. B. Lithium-Schwefel-, multivalente Kathoden, neuartige Kathodenwerkstoffe und -strukturen)

Andere Zellwerkstoffe

Elektrolyt-Werkstoffe

- Flüssigelektrolyte für höhere Spannung → Flüssigelektrolyte für neue Lösungen (z. B. Natrium-Ionen-, Lithium-Schwefel-, Metall-Luft-Batterien)
- Hybrid- und Halbfestkörperbatterien mit hoher Ionenleitfähigkeit (z. B. Gelpolymer, PEO)
- Massenfertigung von Festelektrolyten mit guter Leitfähigkeit (z. B. Sulfide und Oxide)

Separatoren

- Kostengünstigere Separatoren mit geringerer Dicke, Oxidationsbeständigkeit, Wärmeableitung → Verbesserte Separatorenfunktion (z. B. Phasenwechsel, Feuerbekämpfung)
- Separatorenwerkstoffe mit besserer Ionenleitfähigkeit und Stromdichte (z. B. PVDF, Aluminiumoxid)

Stromabnehmer

- Extrem dünne Kupfer- und Aluminiumfolien für Li-Ionen-Batterien (z. B. 6 Mikron) → Neue Stromabnehmerstrukturen (z. B. Gitter, Funktionsintegration mit Anode und Kathode)
- Behandlung der Oberfläche des Stromabnehmers (Plasma, Laser) → Hybride Stromabnehmer (z. B. Metalllegierungen, metallbeschichtete Polymere

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

- Ersatz für NMP-Lösungsmittel (z. B. N-Acetyl-P und Wasser) → Neue Bindemitteleigenschaften (z. B. hybrid, selbstheilend)
- Weniger Nassverfahren und weniger Lösungsmittel → Trockenverfahren in der Herstellung (ohne Lösungsmittel) → Bindemittelfreie Elektroden und Elektrolyte

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Zellwerkstoffe

- Weniger CO_2 in Fertigungsverfahren (z. B. Elektroden, Trockenverfahren) → Geringerer energetischer Fußabdruck → Herstellungssysteme mit Netto-Null-Emissionen
- Sicherere und nachhaltigere Ersatzstoffe für Zellwerkstoffe → Einsatz häufiger vorkommender/weniger kritischer Werkstoffe → Auf Ökobilanz ausgerichtete Wertschöpfungsketten
- Weniger Zellwerkstoffverschwendung/höhere Ausbeute → Wiederaufbereitung & Wiederverwendung von Zellwerkstoffen (z. B. Regenerierung der Elektrode/Wiederaufarbeitung defekter Werkstoffe)
- Recycling von Werkstoffen für Prüfzellen → Rückgewinnung von Zellwerkstoffen mit hoher Effizienz für Massenmarkt → Kreislaufwirtschaft für alle Zellwerkstoffe

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Primäre Technologiebereiche

Elektroden
- Anoden
- Kathoden

Elektroden

In diesem Abschnitt werden **Anoden** auf Lithium-Ionen-Basis beschrieben, und zwar einerseits für Anwendungen mit hohem Energiebedarf und andererseits für solche mit hohem Leistungsbedarf. Mittelfristig wird erwartet, dass Anoden mit neuen Werkstoffen und übergangsweise leistungsstarke Anoden aus Metallen Marktreife erreichen werden.
Der höchste Kostenfaktor in einer Batteriezelle sind die **Kathoden**, die bereits in vielen Forschungs- und Entwicklungsprojekten thematisiert wurden. In diesem Abschnitt werden Innovationen für kostengünstige und leistungsstarke Hochenergie-Lithium-Ionen-Kathoden sowie Kathodenwerkstoffe der nächsten Generation, die über Lithium-Ionen hinausgehen, beschrieben.

Andere Zellwerkstoffe
- Elektrolyt-Werkstoffe
- Separatoren
- Stromabnehmer

Andere Zellwerkstoffe

Für den Transport der Lithium-Ionen zu und von den Elektroden werden **Elektrolyte** benötigt. Flüssigelektrolyte werden kontinuierlich optimiert, um in Kombination mit verbesserten Lithium-Ionen-Lösungen eingesetzt werden zu können. Der entscheidende Fortschritt liegt in den Fest- und Halbfestelektrolyten, die in Kombination mit Lithium-Metall-Anoden sowohl die Energiedichte als auch die Sicherheit verbessern. Allerdings sind sie in ihrer Herstellung komplex.

Separatoren sollten ausgezeichnet isolieren und keine elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Da Separatoren immer dünner werden und höhere Stromdichten bewältigen können, sind neue Membranwerkstoffe und Beschichtungen erforderlich.

Stromabnehmer werden in der Regel aus Aluminium- oder Kupferfolie hergestellt. Die Hersteller von Zellen verlangen nach dünneren Folien, die Spielraum für neue Fertigungsverfahren und die Funktionsintegration zwischen Elektrode und Stromabnehmer bieten.

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive verbessern die Leitfähigkeit und die Klebeeigenschaften von Aktivmaterialien. Der Einsatz von Lösungsmittel, Bindemittel und Additiven wird voraussichtlich abnehmen, wodurch die Kosten verringert und die Umweltleistung der Batterien verbessert wird.

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Zellwerkstoffe

Die **Ökobilanz** umfasst die Kohlendioxidintensität, die Umweltauswirkungen, den Ressourcenverbrauch und die Recycelbarkeit von Batteriezellen und Lieferketten für Werkstoffe. Nur wenn all diese Elemente optimiert werden, können Elektrofahrzeuge eine wirklich nachhaltige Lösung darstellen.

Entwicklung von Elektroden

Although there is scope for further development of graphite, silicon is expected to be increasingly incorporated to enhance cell energy density. There are several promising new anode materials for the highest power applications.

Elektroden
- Anoden
- Kathoden

Andere Zellwerkstoffe
- Elektrolyt-werkstoffe
- Separatoren
- Stromabnehmer

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Zellwerkstoffe

1. Verbesserte Energiedichte für Li-Ionen-Anoden (z. B. Grafit, Si-Komposite) → Maximale Energiedichte für Li-Ionen-Anoden (z. B. 100 % Silizium)
2. Verbesserte Leistungsdichte für Li-Ionen-Anoden (z. B. LTO) → Maximale Leistungsdichte für Li-Ionen-Anoden (z. B. Anoden aus Nioboxid)
3. Anoden der nächsten Generation für neue Anwendungen (z. B. Lithium-Metall-Anoden, Hard-Carbon für Natrium-Ionen-Kathoden)

1 Optimierung der Energiedichte von Zellen

Bei kostengünstigen Zellen mit hoher Leistungsdichte wird Grafit aufgrund seiner Stabilität und geringen Kosten wohl dominierender Anodenwerkstoff bleiben. Derzeit geht der Trend dahin, mehr synthetischen Grafit mit natürlichem Grafit zu mischen, um die Ökobilanz und die Stabilität zu verbessern. Weitere Innovationen in der Fertigung sind die Reduzierung der Partikelgröße und die gleichmäßige Verteilung der Partikel auf der Kupferfolie, um die Kapazität der Zelle zu verbessern.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Energiedichte ist die Verwendung von Silizium neben Grafit. 3–5%ige Siliziumanoden sind bereits üblich, 30%ige Siliziumanoden werden voraussichtlich in den nächsten fünf Jahren auf den Markt kommen.

Auf lange Sicht könnten Anoden aus 100 % Silizium auf den Markt gebracht werden, um die Energiedichte bestehender Lithium-Ionen-Zellen maximal zu steigern. Die ursprüngliche Herausforderung bei der Verwendung von Silizium besteht darin, dass es sich beim Laden bis auf das Dreifache ausdehnen kann, wodurch die Batteriezelle aufquillt und die Kapazität nachlässt. Die Industrie testet zahlreiche Methoden, um genau dies zu verhindern. Diese reichen von dem Einsatz von „Graphenschalen“ bis hin zur Umhüllung der Siliziumpartikel.

Dadurch können die Ausdehnung verringert und die Ökobilanz verbessert werden, allerdings steigen die Kosten. Dieser Ansatz kann daher bei Anwendungen geeignet sein, bei denen eine hohe Energiedichte im Vordergrund steht.

2 Steigerung der Leistungsdichte

Trotz der Dominanz von Grafit und dem Vormarsch der siliziumbasierten Anoden kommen bei Hochleistungsanwendungen immer noch unterschiedliche Anodenwerkstoffe zum Einsatz, darunter Lithiumtitanoxid (LTO), das üblicherweise in Bussen, im Motorsport und in einigen hochleistungsfähigen Hybridfahrzeugen eingesetzt wird. Die Vorteile von LTO liegen in der schnellen Lade- und Entladekapazität, dem verbesserten Temperaturverhalten und der gesteigerten Sicherheit.

Zu den anderen vielversprechenden Anodenwerkstoffen für Hochleistungsanwendungen gehören mittelfristig Niob-Anoden, die höhere Spannungen und Leistungsdichten bieten, allerdings die Kosten dabei nicht in die Höhe schießen lassen. Sie befinden sich derzeit in der letzten Entwicklungsphase, und viele Unternehmen stehen kurz vor der Markteinführung.

3 Anodenwerkstoffe der nächsten Generation

Anoden der nächsten Generation beruhen entweder auf neuartigen Konzepten oder es handelt sich um Anoden, die entwickelt wurden, um in Kombination mit neuen Kathodenwerkstoffen und Elektrolyten eingesetzt zu werden. Es wird ca. sieben bis zehn Jahre dauern, bis diese Anoden auf dem Markt zum Einsatz kommen.

Eine neuartige Anode besteht aus Lithium-Metall und sorgt für einen Leistungssprung in Bezug auf die Kapazität und die Konstruktion der Zelle. Es stellen sich große Herausforderungen: die kostengünstige Herstellung von Lithium-Metall und eine verringerte Bildung von Dendriten, um eine ausreichende Batterielebensdauer sicherzustellen.

Weitere Lösungsansätze sind Anodenwerkstoffe, durch die neue Zelllösungen möglich sind. Beispielsweise bedarf es für Natrium-Ionen-Kathoden neuer Anodentechnologien, z. B. Hard-Carbon oder Antimon, um in der Automobilindustrie wettbewerbsfähig zu sein.

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | é

Elektroden

Durch neue Zellkonstruktionen k°nnen Hochleistungskathoden hergestellt werden, gleichzeitig sorgen nderungen in der Zusammensetzung von LFP-Kathoden und neue Werkstoffe f¿r Kostensenkungen.

Elektroden
- Anoden
- Kathoden

1. Geringere Kosten für Li-Ionen-Batterien (z. B. LFP) → Extrem günstige Kathoden (z. B. manganreiche, Lithium-Schwefel- (Li-S), Natrium-Ionen-Kathoden)
2. Höhere Energiedichte für Li-Ionen-Kathoden (z. B. NCA, NMC, eLNO, NFA, LMNO) → Lokalisierte Partikeloptimierung, Mischung von Kathoden (z. B. kolloidale Kathoden)

Leistungsstarke Li-Ionen-Kathoden (z. B. Nano-Phosphat, dünnere Kathoden, kleinere Partikel)

Kathoden mit hoher Energie- und Leistungsdichte (z. B. Lithium-Schwefel-, multivalente Kathoden, neuartige Kathodenwerkstoffe und -strukturen)

Andere Zellwerkstoffe
- Elektrolyt-werkstoffe
- Separatoren
- Stromabnehmer

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Zellwerkstoffe

1 Kostengünstige Kathoden

Bei manchen Automobilanwendungen für den Massenmarkt gilt die Senkung der Kosten für Kathoden durch den Verzicht auf hochreines Nickel und Kobalt als eine aussichtsreiche Lösung. LFP-Kathoden und ähnliche Technologien werden demnächst eingesetzt. In den kommenden zwei bis drei Jahren werden zudem einige Hersteller von Zellen Mangan zu LFP-Kathoden hinzufügen, wodurch die Energiedichte gesteigert wird, ohne die Kosten zu erhöhen.

Es ist zu erwarten, dass in Europa und anderen Märkten neben LFP-/LFMP auch andere sehr kostengünstige Kathodenwerkstoffe auf den Markt kommen. Dazu gehört manganhaltiges NMC: Hier wird Kobalt weggelassen und der Nickelgehalt erheblich verringert.

Auf mittelfristige Sicht werden wahrscheinlich andere kostengünstige Kathodenwerkstoffe zum Einsatz kommen, z. B. Lithium-Schwefel- oder Natrium-Ionen-Kathoden. Natrium-Ionen-Kathoden sind eine vielversprechende kostengünstige Alternative mit hoher Ladekapazität zu geringeren Kosten. Dies liegt daran, dass Natrium günstiger ist als Lithium und Aluminium-Stromabnehmer anstelle von Kupfer in der Anode verwendet werden können.

Die Kostensenkung erfordert jedoch einen Kompromiss bei der Leistung. Momentan sind Natrium-Ionen-Kathoden dreimal so schwer wie die vorhandenen Lithium-Ionen-Batterien und weisen eine schlechte Ökobilanz auf. Für die stationäre Energiespeicherung stellen Natrium-Ionen aber schon heute eine konkurrenzfähige Alternative zu Blei-Säure-Batterien dar. Natrium-Ionen-Kathoden werden voraussichtlich erst in kleineren Fahrzeugen für den Verkehr in Städten mit begrenzter Reichweite und dem Erfordernis höherer Ladeleistungen eingesetzt.

2 Hochenergie-Kathoden

NMC und NCA sind die vorherrschenden Lithium-Ionen-Kathodenwerkstoffe mit hoher Energiedichte, die in der Automobilindustrie zur Anwendung kommen. Mit beiden Lösungen soll die Energiedichte erhöht werden, indem Mischungen mit höherem Nickelgehalt verwendet werden.

Bei NMC geht der Trend hin zu NMC811 oder gar NMC9.5.5. Entsprechend entwickeln sich NCA von einem Cobaltgehalt von 7 % hin zu einem Kobaltgehalt von 3 %. Panasonic strebt zudem bis 2025 kobaltfreie Kathoden an. Außerdem werden weitere Kathoden mit hoher Energiedichte entwickelt, um in den nächsten Jahren zur Marktreife zu gelangen. Johnson Matthey hat beispielsweise die Umsetzung seiner Pläne zur Lieferung von eLNO-Kathoden beschleunigt und Nissan arbeitet an einer Nickel-Eisen-Aluminium-Kathode.

Für eine dauerhafte Optimierung von Lithium-Ionen-Kathoden mit hoher Energiedichte sind innovative Strukturen und Fertigungsmethoden erforderlich, um die Leistungsfähigkeit des Werkstoffs zu erhöhen. Eine lokalisierte Partikeloptimierung und die Mischung verschiedener Kathodenwerkstoffe könnten die Energiedichte deutlich verbessern.

Elektroden

Zahlreiche Unternehmen entwickeln Kathodenwerkstoffe mit hoher Energiedichte, passen Mischungen an und bewerten neue Werkstoffe. Lithium-Schwefel sorgt für einen Leistungssprung in Bezug auf die Energiedichte und dürfte auf lange Sicht vermehrt zum Einsatz kommen.

Elektroden
- Anoden
- Kathoden

Andere Zellwerkstoffe
- Elektrolyt-werkstoffe
- Separatoren
- Stromabnehmer

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Zellwerkstoffe

- Geringere Kosten für Li-Ionen-Batterien (z. B. LFP) → Extrem günstige Kathoden (z. B. manganreiche, Lithium-Schwefel- (Li-S), Natrium-Ionen-Kathoden)
- Höhere Energiedichte für Li-Ionen-Kathoden (z. B. NCA, NMC, eLNO, NFA, LMNO)
- 3 Leistungsstarke Li-Ionen-Kathoden (z. B. Nano-Phosphat, dünnere Kathoden, kleinere Partikel)
- 4 Kathoden mit hoher Energie- und Leistungsdichte (z. B. Lithium-Schwefel-, multivalente Kathoden, neuartige Kathodenwerkstoffe und -strukturen)

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

3 Kathoden mit hoher Leistungsdichte

Bei Lithium-Ionen-Kathoden mit hoher Leistungsdichte kommen die gleichen Werkstoffe zum Einsatz wie bei Kathoden mit hoher Energiedichte, allerdings steht hier die Konstruktion der Zelle im Vordergrund. Höhere Leistungsdichten können durch ein geringeres Gewicht der Beschichtung, geringere Flächenkapazitäten, kleinere aktive Partikel und höhere Kathodenporositäten erreicht werden. Kathoden mit hoher Leistungsdichte sind außerdem im Vergleich zu Kathoden mit hoher Energiedichte tendenziell stark kalandriert.

Verbesserte LFP-Typen, sogenannte Nano-Phosphate, wurden so entwickelt, dass sie bis zu 35 °C erreichen und gleichzeitig eine bessere thermische Stabilität und eine längere Batterielebensdauer bewirken. Solche Lösungen sind im Bus- und Motorsportbereich gefragt, wo hohe C-Raten entscheidend sind.

4 Kathoden der nächsten Generation

Damit sowohl höhere Leistungs- als auch Energiedichten erreicht werden können, bedarf es neuer Kathodenwerkstoffe. Lithium-Schwefel-Batterien ermöglichen Kostensenkungen und einen Leistungssprung in Bezug auf die Energiedichte. Sie werden zunächst in kleinen Luft- und Raumfahrtanwendungen wie Drohnen zum Einsatz kommen, bevor sie sich in Automobilanwendungen etablieren. Frühe Einsatzgebiete für Lithium-Schwefel im Automobilbereich könnten leistungsstarke Personenkraftwagen, Doppeldeckerbusse und Schwerlastfahrzeuge sein, bei denen es auf ein geringes Gewicht und eine hohe Energiedichte ankommt.

Weitere aussichtsreiche Kathoden der nächsten Generation sind multivalente Kathoden (z. B. Magnesium- und Calzium-Ionen-Kathoden) sowie Kathoden auf der Grundlage von Schwefel und Fluorphosphat. Diese Werkstoffe können die Energiedichte, die Ökobilanz sowie die Leistungsdichte deutlich verbessern. Es ist zwar ungewiss, ob diese Lösungen sich auf dem Automobilmarkt etablieren werden, aber sie bieten ausreichend Potenzial für fortlaufende Forschungs- und Entwicklungsprojekte in der Werkstoffkunde und Pilotfertigung.

Andere Zellwerkstoffe

Herkömmliche Elektrolyte werden für Lithium-Ionen-Lösungen kontinuierlich weiterentwickelt. Für andere Zellkonzepte werden spezielle Elektrolyte neu konzipiert. Fest- und Halbfestelektrolyte sorgen für einen Leistungssprung in Bezug auf Energiedichte und Sicherheit, sind jedoch komplex in der Herstellung.

Elektroden
- Anoden
- Kathoden

1 Flüssigelektrolyte

Stetige Verbesserungen der chemischen Zusammensetzung haben dazu geführt, dass Flüssigelektrolyte für optimierte Kathoden und Anoden entwickelt wurden. Im Vordergrund der Forschung standen Elektrolyte, die höhere Spannungen tolerieren und ein schnelleres Laden von Elektroden mit hoher Energiedichte ermöglichen. Der Schwerpunkt der jüngsten Innovationen liegt auf der Mischung von Lithiumsalzen, Lösungsmitteln und Additiven, wodurch die Ionenleitfähigkeit verbessert wird und die Festelektrolyt-Interphase auf den Elektroden dünner ausfallen kann.

Ein höherer Nickelgehalt in NMC- und NCA-Kathoden und ein höherer Siliziumgehalt in der Anode können bewirken, dass herkömmliche Elektrolytlösungen schneller degradieren. Fluorierte Flüssigelektrolyte, die höheren Spannungen standhalten können und eine längere Lebensdauer aufweisen, die von Unternehmen wie Solvay angeboten werden, stellen eine mögliche Lösung dar. Aufgrund ihrer höheren Kosten werden fluorierte Elektrolyte wahrscheinlich in Anwendungen eingesetzt, bei denen höhere Kosten für Zellen kein Problem darstellen. Für neue Elektrodenwerkstoffe für Natrium-Ionen-, Lithium-Schwefel-, multivalente sowie Metall-Luft-Batterien sind auf ihre jeweiligen Eigenschaften abgestimmte Elektrolyte erforderlich.

Andere Zellwerkstoffe
- Elektrolyt-werkstoffe
- Separatoren
- Stromabnehmer

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Zellwerkstoffe

1. Flüssigelektrolyte für höhere Spannung → Flüssigelektrolyte für neue Lösungen (z. B. Natrium-Ionen-, Lithium-Schwefel-, Metall-Luft-Batterien)
2. Hybrid- und Halbfestkörperbatterien mit hoher Ionenleitfähigkeit (z. B. Gelpolymer, PEO)
3. Massenfertigung von Festelektrolyten mit guter Leitfähigkeit (z. B. Sulfide und Oxide)

2 Hybride Festelektrolyte

Hybride Festelektrolyte bestehen sowohl aus festen als auch aus flüssigen Werkstoffen und bieten im Vergleich zu Flüssigelektrolyten einen praktischen Kompromiss zwischen sicheren Batterien und einer Verbesserung der Leistung der Zelle. Üblicherweise werden polymere und anorganische Elektrolyte verwendet oder Flüssigelektrolyte in einer festen, porösen Struktur umschlossen.

Durch hybride Festkörperbatterien kann der Einsatz von Bindemitteln und anderen inaktiven Werkstoffen verringert werden und andere kostenintensive Fertigungsschritte wie Trocknen, Lösungsmittelrückgewinnung, Kalandrieren und Befüllung mit Elektrolyten können wegfallen bzw. deutlich verkürzt werden.

3 Festelektrolyte

Im Vergleich zu Flüssigelektrolyten bieten Festelektrolyte mehr Sicherheit, eine bessere Energiedichte und eine höhere Ladekapazität. Dadurch wird ein Separator überflüssig und die Wahrscheinlichkeit, dass sich Dendriten bilden, verringert sich – eine Hauptursache für thermisches Durchgehen.

Die beiden wichtigsten Arten von Festelektrolyten sind Sulfide und Oxide, die jeweils spezifische Stärken und Schwächen aufweisen: Oxide sind umweltfreundlicher und bieten mehr Stabilität bei höheren Spannungen, allerdings müssen sie auf hoher Temperatur gesintert oder in anderen komplexen Herstellungsprozessen gefertigt werden. Sulfide besitzen eine größere Ionenleitfähigkeit, bei der chemischen Verarbeitung entstehen mehr gefährliche Stoffe. Für beide Arten sind jedoch erhebliche Prozessoptimierungen erforderlich, bevor sie für Anwendungen mit hoher Leistungs- und Energiedichte geeignet sind.

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Andere Zellwerkstoffe

Für ein modernes Thermomanagement werden Separatoren mit verbesserten Funktionen benötigt. Da sie immer dünner werden und höhere Stromdichten bewältigen können, sind neue Membranwerkstoffe und Beschichtungen erforderlich.

Elektroden
- Anoden
- Kathoden

Andere Zellwerkstoffe
- Elektrolyt-werkstoffe
- Separatoren
- Stromabnehmer

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Zellwerkstoffe

1 Verbesserte Funktionen für bestehende Separatoren

Separatoren für Lithium-Ionen-Batterien werden üblicherweise aus Polyethylen (PE) hergestellt. Allerdings sieht man häufig dreischichtige Separatoren, die in der Mitte eine PE-Schicht haben, die außen von Polypropylen (PP) umschlossen wird. Da die Amperestunden der Batteriezellen steigen, werden thermisch robustere Separatoren benötigt, um die Wahrscheinlichkeit einer internen Propagation gering zu halten. Bei der Kommerzialisierung von Zellen mit hoher Leistungsdichte spielt die Aufrechterhaltung der Kapazität bei höheren Stromdichten eine wichtige Rolle.

Auf mittlere bis lange Sicht werden voraussichtlich folgende Bereiche optimiert: Separatoren mit modernstem Thermomanagement (Phasenwechselwerkstoffe) oder feuerfesten Werkstoffen, Separatoren, bei denen Störungen durch eine verbesserte Sensorik vermieden werden oder die sich selbst heilen können, um ein thermisches Durchgehen zu verhindern.

1 Kostengünstigere Separatoren mit geringerer Dicke und Oxidationsbeständigkeit, Wärmeableitung → Verbesserte Separatorenfunktionen (z. B. Phasenwechsel, Feuerbekämpfung)

2 Separatorenwerkstoffe mit besserer Ionenleitfähigkeit und Stromdichte (z. B. PVDF, Aluminiumoxid

2 Neue Werkstoffe für fortschrittliche Separatoren

Sowohl für die Beschichtung von Separatoren als auch für die Membran werden neuartige Werkstoffe entwickelt. Ein vielversprechender Werkstoff für Separatoren ist Polyvinylidenfluorid (PVDF), das im Vergleich zu Polyethylen und Polypropylen einen Leistungssprung bietet. PVDF-Separatoren haben tendenziell ein besseres thermisches Verhalten und zeigen minimale Schrumpfung bei höheren Temperaturen. Sie weisen zudem eine höhere Porosität auf, denn sie lassen Ionen durch, ohne dass der Elektrolyt die Membran zersetzt.

Bedingt durch Lade- und Entladevorgänge mit hoher Leistung wird es immer üblicher, Separatoren mit Keramikwerkstoffen zu beschichten. Hierfür wird hochreines Aluminiumoxid bevorzugt, da es hohen Temperaturen standhält.

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Andere Zellwerkstoffe

Die Hersteller von Zellen verlangen nach dünneren Folien, die Spielraum für neue Fertigungsverfahren und die Funktionsintegration zwischen Elektrode und Stromabnehmer bieten.

Elektroden
- Anoden
- Kathoden

Andere Zellwerkstoffe
- Elektrolyt-werkstoffe
- Separatoren
- Stromabnehmer

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Zellwerkstoffe

1 Optimierung bestehender Stromabnehmer

Die Hersteller von Batteriezellen verlangen nach dünneren Kupfer- und Aluminiumfolien, um Gewicht und Kosten zu reduzieren. Kostengünstige Folien, die für Anwendungen für den Massenmarkt geeignet sind, sind 6–10 µm dick.

Für Anwendungen mit hoher Leistungsdichte wäre eine Verringerung der Dicke auf unter 6 µm wünschenswert, allerdings dürfte dies aufgrund konventioneller Walz- und Glühprozesse oder der Elektrotauchlackierung nur bedingt möglich sein. Aus diesem Grund müssen verbesserte Glühprozesse bzw. neue Stromabnehmerkonzepte (z. B. Nanodrahtfolien) entwickelt werden, um Folien mit einer Dicke unter 6 µm herzustellen.

Auf lange Sicht könnten Kathoden und Anoden über Gitterstrukturen funktional in Stromabnehmer integriert werden, wobei der Kathodenwerkstoff in die Folie eingebettet ist und nicht auf diese aufgetragen wird.

2 Neue Verfahren und derzeitige Stromabnehmerkonzepte

Die Haftung von Kathoden- und Anodenschlämmen auf den Folien kann durch verschiedene Techniken der Oberflächenbehandlung (z. B. Veränderung der Rauheit und Oberflächen-spannung der Folien) verbessert werden. Behandlungsmethoden wären beispielsweise die Plasmabehandlung, UV-Bestrahlung oder Laserstrukturierung, um die mechanische und thermodynamische Haftung zu verbessern. Dies könnte dazu führen, dass Bindemittel bei der Aufschlämmung reduziert werden, wodurch mehr aktives Material entsteht.

Zudem befinden sich hybride Stromabnehmer aus mehreren Werkstoffen in fortgeschrittenen Entwicklungsstadien und stellen eine Alternative zur Oberflächenbehandlung dar. Die Verwendung von maßgeschneiderten Metalllegierungen zur Verbesserung der Leitfähigkeit und Zugfestigkeit hat demnach erkennbares Innovationspotenzial. Bei weiteren Methoden kommen z. B. „Sandwich"-Werkstoffe zum Einsatz, wobei Polymere oder Graphen in Kupfer oder Aluminium eingeschlossen werden.

1 Extrem dünne Kupfer- und Aluminiumfolien für Li-Ionen-Batterien (z. B. 6 Mikron) → Neue Stromabnehmerstrukturen (z. B. Gitter, Funktionsintegration mit Anode und Kathode)

2 Behandlung der Oberfläche des Stromabnehmers (Plasma, Laser) → Hybride Stromabnehmer (z. B. Metalllegierungen, metallbeschichtete Polymere) →

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

Eine reduzierte Abhängigkeit von „Nassverfahren“ in der Fertigung steigert nicht nur die Leistung und senkt die Kosten, sondern erhöht auch das Potenzial für mehr Sicherheit und weniger Umweltauswirkungen.

Elektroden
- Anoden
- Kathoden

Andere Zellwerkstoffe
- Elektrolyt-werkstoffe
- Separatoren
- Stromabnehmer

1 Ersatz schädlicher Lösungsmittel

Durch den Verzicht auf das Lösungsmittel N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP) können Herstellungskosten gesenkt und die Sicherheit aufgrund de Toxizität und Entflammbarkeit verbessert werden. Mögliche Ersatzmittel wären N-Acetyl-P und Wasser.

Erweiterte Funktionen von Bindemitteln

Bindemittel werden zwar als inaktive Werkstoffe eingestuft, es könnten jedoch auch Werkstoffe verwendet werden, die die Eigenschaften von Elektrodenschlämmen verbessern. Selbstheilende Polymere oder Bindemittel, die die Ausdehnung von Anodenmaterialien wie Silizium tolerieren, stellen attraktive Eigenschaften dar.

2 Verringerung und gänzlicher Verzicht auf den Einsatz von Lösungs- und Bindemitteln

Lithium-Ionen-Batterien werden seit den 1990er Jahren mithilfe von „Nassverfahren“ hergestellt: Nassschlämme werden chargenweise gemischt und auf Stromabnehmerfolien aufgetragen. Erste Schritte zur Verbesserung des Anteils an aktiven Werkstoffen, die die Energie- und Leistungsdichte erhöhen, bestünden darin, die Lösungsmittelmenge zu reduzieren und Bindemittel und Additive nur dann zu verwenden, wenn dies absolut notwendig ist.

Auf lange Sicht bietet sich jedoch die Möglichkeit, die Herstellungsverfahren für Batteriezellen vollständig umzustellen. Viele Forschungseinrichtungen untersuchen rein „trockene“ Herstellungsverfahren, bei denen keine Lösungs- und Bindemittel zum Einsatz kommen. Dadurch bestünde kein Bedarf mehr an schädlichen chemischen Stoffen, die in der Herstellung teuer sind, und die Sicherheit in Bezug auf die Montage von Zellen würde verbessert. Innovationspotenzial liegt in der Pulverbeschichtung von Folien mit Anoden- und Kathodenwerkstoffen oder in der Verwendung von flexiblen Elektrodenfolien.

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

1. Ersatz für NMP-Lösungsmittel (z. B. N-Acetyl-P und Wasser) → Neue Bindemitteleigenschaften (z. B. hybrid, selbstheilend)
2. Weniger Nassverfahren und weniger Lösungsmittel → Trockenverfahren in der Herstellung (ohne Lösungsmittel) → Bindemittelfreie Elektroden und Elektrolyte

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Zellwerkstoffe

2020 | 2025 | 2030 | 2030 | 2040 | ...

Ökobilanz

Für eine ethische, sichere und nachhaltigen Lieferkette für Batterien sind Verbesserungen in allen Aspekten der Werkstoffnutzung und der Herstellung erforderlich.

Elektroden
- Anoden
- Kathoden

Andere Zellwerkstoffe
- Elektrolyt-werkstoffe
- Separatoren
- Stromabnehmer

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

1 Auswirkungen der Herstellung von Zellen und Werkstoffen auf Emissionen und Ökobilanz

Die doppelte Belastung durch Null-Netto-Emissionen und die Gesetzgebung für Fahrzeuge in Bezug auf die Ökobilanz hat den Druck auf die Herstellung von Zellen und ihre Wertschöpfungskette erhöht. Der Schwerpunkt liegt kurzfristig auf der Verringerung der CO_2-Intensität der Herstellung von Zellen und Kathoden, indem energieeffiziente Fertigungsverfahren oder CO_2-arme Energiequellen zum Einsatz kommen.

Auf lange Sicht werden die gesamten Umweltauswirkungen der Lieferkette von Zellen und chemischen Stoffen genau untersucht. Dabei werden die Energieintensität der Anoden-, Kathoden-, Elektrolyt- und Separatorenherstellung sowie Umweltauswirkungen wie flüchtige organische Verbindungen und der Wasserverbrauch berücksichtigt. Dies könnte die Kommerzialisierung neuer energie- und ressourceneffizienter Lösungen zur Herstellung von chemischen Stoffen für Batterien ankurbeln.

2 Sicherere und nachhaltigere Batteriewerkstoffe

Die bei der Batterieherstellung eingesetzten Werkstoffe und chemischen Stoffe sind nicht nur unter strategischen Gesichtspunkten kritisch, sondern können auch eine Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen und ethische Bedenken aufwerfen.

Es wird erwartet, dass es bei Cobalt und Nickel in den nächsten Jahren zu einer Versorgungsknappheit kommen wird. Raffinerien gehen davon aus, dass die Nachfrage nach hochreinem Nickel, Kobalt und Lithium das Angebot in den nächsten drei bis fünf Jahren überholen wird. Wenn häufiger vorkommende Werkstoffe wie Mangan, Eisen, Aluminium und Natrium verwendet werden, könnte das Risiko einer übermäßigen Abhängigkeit von kritischen Werkstoffen verringert werden.

Bei bestehenden Herstellungsverfahren für Zellen werden viele gefährliche und krebserzeugende chemische Stoffe verwendet. Wenn ihr Einsatz verringert wird, senkt dies nicht nur die Kosten der Verarbeitung und Herstellung, sonst ist am Ende auch der Lebensdauer zuträglich. Beim Recycling von Batterien werden beispielsweise flüchtige, brennbare Verbindungen aus dem Elektrolytlösungsmittel freigesetzt und Fluorwasserstoff (HF) aus dem Elektrolyten erzeugt.

Zu guter Letzt bestehen ethische Bedenken in Bezug auf Batteriewerkstoffe: Der Großteil des weltweiten Kobalts wird in der Demokratischen Republik Kongo abgebaut, wo Kinderarbeit noch immer weit verbreitet ist. Lithiumvorkommen in Südamerika befinden sich in Gebieten, in denen Wasserknappheit herrscht. Das Wissen um diese Bedenken und deren Vermeidung ist entscheidend, um eine sicherere und nachhaltigere Batterielieferkette zu schaffen.

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Zellwerkstoffe

1. Weniger CO_2 in Fertigungsverfahren (z. B. Elektroden, Trockenverfahren) → Geringerer energetischer Fußabdruck → Herstellungssysteme mit Netto-Null-Emissionen
2. Sicherere und nachhaltigere Ersatzstoffe für Zellwerkstoffe → Einsatz häufiger vorkommender/weniger kritischer Werkstoffe → Auf Ökobilanz ausgerichtete Wertschöpfungsketten

Weniger Zellwerkstoffverschwendung/höhere Ausbeute → Wiederaufbereitung & Wiederverwendung von Zellwerkstoffen (z. B. Regenerierung der Elektrode/Wiederaufarbeitung defekter Werkstoffe)

Recycling von Werkstoffen für Prüfzellen → Rückgewinnung von Zellwerkstoffen mit hoher Effizienz für Massenmarkt → Kreislaufwirtschaft für alle Zellwerkstoffe

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Ökobilanz

Da immer mehr hergestellt wird und der gesetzliche Druck in Bezug auf das Recycling zunimmt, gewinnt die Steigerung der Ausbeute, die effiziente Verwendung der Werkstoffe und letztlich die Schaffung einer vollständigen Kreislaufwirtschaft immer mehr an Bedeutung.

Elektroden
- Anoden
- Kathoden

Andere Zellwerkstoffe
- Elektrolyt-werkstoffe
- Separatoren
- Stromabnehmer

Lösungsmittel, Bindemittel und Additive

3 Maximale Effizienz der Zellwerkstoffe

Die Erhöhung der Ausbeute von Gigafabriken hat zwar oberste Priorität, aber es müssen auch die Reduzierung fehlerhafter Zellen und die Verbesserung des Abfallmanagements von Anlagen angegangen werden. Auf lange Sicht bietet es sich an, Recyclinganlagen vor Ort zu bauen, in denen fehlerhafte Zellen aufgenommen und als Ausgangsmaterial verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit, die derzeit erforscht wird, ist die Wiederaufbereitung bestehender Batteriezellen, um den Wert der Ressource zu maximieren. Das Argonne National Lab erforscht die Wiederaufbereitung von Elektrodenwerkstoffen, um die Leistung auch bei der Weiterverwendung dieser Werkstoffe zu erhalten.

4 Recycling und Kreislaufwirtschaft

Mit der zunehmenden Elektrifizierung von Fahrzeugen braucht es Lösungen für das Recycling von Batteriezellen und Werkstoffen für Massenanwendungen. In der Gesetzgebung der EU wird vorgeschrieben, dass Batteriezellen, die in der EU hergestellt oder in die EU eingeführt werden, einen zunehmenden Anteil an recyceltem Nickel, Kobalt und Lithium enthalten. Dies ist der erste Schritt hin zur Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft.

Die Herausforderung steigt mit der zunehmenden Verbreitung von verschiedenen Zelllösungen für unterschiedliche Anwendungen. Derzeit gibt es bei Massenanwendungen entweder zellagnostische Verwertungswege mit schlechten Verwertungsraten oder spezialisierte Verwertungswege mit hohen Verwertungsraten, die mit höheren Kosten verbunden sind.

Verglichen mit dem erwarteten Bedarf in den nächsten fünf bis sieben Jahren werden die bestehenden hydrometallurgischen und pyrometallurgischen Verfahren bisher kaum angewendet. Wenn diese Verfahren hochskaliert werden, müssen dabei auch die Umweltauswirkungen auf ein Mindestmaß reduziert (keine Verwendung von schädlichen chemischen Stoffen oder energieintensiven Verfahren) und hohe Verwertungsraten sowohl für kritische als auch nichtkritische Werkstoffe erzielt werden. Die Herausforderung liegt darin, dies auf eine wirtschaftlich sinnvolle Weise zu tun.

Die ideale Lösung wären zellagnostische Recyclingsysteme für Massenanwendungen, in denen alle Zellarten verwertet werden können und eine Reihe von hochreinen chemischen Stoffen in Batteriequalität erzeugt werden, die in die Herstellung von Zellen oder andere Industriebereiche zurückgeführt werden können – eine vollständige Kreislaufwirtschaft mit einem gewissen Maß an Ressourcenunabhängigkeit bei wichtigen kritischen Werkstoffen.

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Zellwerkstoffe

- Weniger CO_2 in Fertigungsverfahren (z. B. Elektroden, Trockenverfahren) → Geringerer energetischer Fußabdruck → Herstellungssysteme mit Netto-Null-Emissionen
- Sicherere und nachhaltigere Ersatzstoffe für Zellwerkstoffe → Einsatz häufiger vorkommender/weniger kritischer Werkstoffe → Auf Ökobilanz ausgerichtete Wertschöpfungsketten
- 3 Weniger Zellwerkstoffverschwendung/höhere Ausbeute → Wiederaufbereitung & Wiederverwendung von Zellwerkstoffen (z. B. Regenerierung der Elektrode/Wiederaufarbeitung defekter Werkstoffe)
- 4 Recycling von Werkstoffen für Prüfzellen → Rückgewinnung von Zellwerkstoffen mit hoher Effizienz für Massenmarkt → Kreislaufwirtschaft für alle Zellwerkstoffe

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Fahrplan 2020

Elektrische Energiespeicher

Fahrplan für Module und Packs

Technologiekennzahlen für die Jahre 2020–2035 finden Sie auf Seite 2.

automotive council UK

ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

Dieser Fahrplan stellt eine Momentaufnahme der weltweiten Prognosen für Antriebstechnologien in der Automobilindustrie für den Massenmarkt dar. Anwendungsspezifische Technologien können je nach Region unterschiedlich sein.

Dunkler Balken: Die Technologie ist auf dem Massenmarkt etabliert. In diesem Zeitrahmen werden bahnbrechende Innovationen erwartet.

Übergang: Ein Übergang bedeutet kein Rückzug aus dem Markt, sondern eine Neuausrichtung des FuE-Schwerpunkts.

Balken mit gestrichelter Linie: Marktreife: Die Technologie hat Marktreife erreicht. Sie verbleibt voraussichtlich im Massenmarkt, bis sie verdrängt wird.

Zellformate und -entwicklung

- Kombinierte Zellformate für die Massenfertigung
- Neue Zellformate und -eigenschaften (z. B. „Tabless“, In-situ-Instrumentation, Wärmefluss und verbessertes Verbinden)

Stromverteilungssystem

(einschließlich BMS-Hardware und -Software)

- Architekturen mit 400 V Systemspannung → Allgemeine Einführung von Architekturen mit 800 V Systemspannung → Neuartige Architekturen mit 1200 V Systemspannung
- BMS-Upgrade mit historischen Daten → BMS geeignet für physik-basierte SoH- und SoC-Verfolgung der Zelle → KI-fähiges BMS mit selbstaktualisierenden Algorithmen, In-situ-Daten
- Telemetriefähige BMS-Architekturen. Offline-Updates für das Fahrzeug und Live-Überwachung
- Schalter/Stecker der nächsten Generation (z. B. Festkörper)
- Günstigere & leichtere Sammelschienen → Sammelschienen aus mehreren Werkstoffen mit genauen Abmessungen und besserer Leitfähigkeit

Thermisch

(d. h. Kühlung, Heizung und Wärmeleitmaterialien einschließlich der Wärmeausbreitung)

- Aktives Thermomanagement (integriert, kostengünstige Systeme) → Tauchkühlung für den Massenmarkt
- Kühlplatten aus mehreren Werkstoffen → Neue thermisch abweisende Werkstoffe für Zellen mit hoher Leistungsdichte und passive Kühlverfahren
- Verfahren zur Reduzierung des Energieverbrauchs in kalten Klimazonen → Speicherung thermischer Energie zur Aufrechterhaltung der Batterietemperatur in kalten Klimazonen
- Optimierung bestehender Wärmeleit-/Verbindungsmaterialien → Rationalisierung und Integration von Wärmeleitmaterialien
- Methoden zur Erkennung, Vermeidung und Unterdrückung der Feuerausbreitung/Sicherstellung des Abschlusses

Mechanisch

(z. B. Strukturen)

- Leichte Batterieträger → Leichte Packstrukturen aus mehreren Werkstoffen (mit Polymeren)
- Zell-/Modulverbindungstechniken für den Massenmarkt → Neuartige elektrische Verbindungen

Integration und Fertigung von Packs

- Cell-to-Pack-Batterien (z. B. ohne Module) → Cell-to-Chassis-Batterien → Strukturelle Batterien (z. B. als Teil der Karosserie)
- In das Thermomanagement des Fahrzeugs integrierte Packs
- Inline-Prüfung und -Validierung in Echtzeit → Beschleunigte Test- & Validierungsverfahren für den Massenmarkt

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Module und Packs

- In Zellen und Module integrierter Gesundheitspass (z. B. RFID) → Widerstandsfähige Batteriemodule und -packs, weniger Ausfälle
- Weniger CO_2-Emissionen bei der Modul-/Packmontage, energieeffiziente Herstellung → Herstellungssysteme mit Netto-Null-Emissionen
- Packkonstruktionen unter Berücksichtigung der Entsorgung und flexible Nutzung recycelter Werkstoffe → Auf Ökobilanz fokussierte Modul-/Packwertschöpfungsketten
- Entwicklung mit Blick auf Demontage → Techniken zur Rückgewinnung von Werkstoffen (z. B mechanische Demontage, Verarbeitung) → Kreislaufwirtschaft für Module und Packs

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Primäre Technologiebereiche

Zellformate und -entwicklung

Die **Zellformate und die Zellentwicklung** werden entweder zunehmend standardisiert, um Skaleneffekte zu ermöglichen, oder darauf ausgerichtet, unterschiedliche Fahrzeuganforderungen zu erfüllen.

Stromverteilungssystem

(einschließlich BMS-Hardware und -Software)

Stromverteilungssysteme ermöglichen eine intelligente und verlustarme Verteilung der Energie der Batteriezellen und -module. Dies kann durch bessere Batteriemanagementsysteme, Sammelschienen und Steckverbinder/Schalter erreicht werden.

Thermisch

(d. h. Kühlung, Heizung und Wärmeleitmaterialien einschließlich der Wärmeausbreitung)

Thermomanagementsysteme sind unerlässlich, um die Leistungsfähigkeit eines Batteriepacks zu erhalten. Durch bessere aktive Kühlsysteme oder verbesserte Werkstoffe für das Wärme-/Kältemanagement können Batteriezellen erhitzt und gekühlt werden.

Mechanisch
(z. B. Strukturen)

Zu den **mechanischen** Elementen gehören das Gehäuse und die Verbindungstechniken, die zum Erhalt von Modulen und Packs beitragen. Batteriegehäuse und Batteriestrukturen ermöglichen deutliche Gewichtseinsparungen, während neue Verbindungstechniken für stabile Zellkontakte sorgen.

Integration und Fertigung von Packs

Im Bereich **Integration und Fertigung von Packs** werden neue Wege zur Integration von Energiespeicherung und -management in das Fahrzeug erforscht.
Die Einbettung von Energiespeichern in die allgemeine Fahrzeugstruktur und kombinierte Thermomanagementsysteme sind zentrale Trends in diesem Bereich.

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Module und Packs

Die **Ökobilanz** umfasst die Kohlendioxidintensität, die Umweltauswirkungen, den Ressourcenverbrauch und die Recycelbarkeit von Batteriemodulen und -packs. Nur wenn all diese Elemente optimiert werden, können Elektrofahrzeuge eine wirklich nachhaltige Lösung darstellen.

Zellformate und -entwicklung

Die Branche hat sich zwar auf eine Reihe von Zellformaten für die Anwendung in der Massenfertigung eingestellt, aber neue Formate und die Integration zusätzlicher Funktionen tragen langfristig zu Leistungsverbesserungen bei.

Zellformate und -entwicklung

1. Kombinierte Zellformate für die Massenfertigung
2. Neue Zellformate und -eigenschaften (z. B. „Tabless“, In-situ-Instrumentation, Wärmefluss und verbessertes Verbinden)

Stromverteilungssystem (einschließlich BMS-Hardware und -Software)

Thermisch (d. h. Kühlung, Heizung und Wärmeleitmaterialien einschließlich der Wärmeausbreitung)

Mechanisch (z. B. Strukturen)

Integration und Fertigung von Packs

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Module und Packs

1 Kombination von Zellformaten

Mit der zunehmenden Verwendung von Lithium-Ionen-Zellen im Automobilbereich werden OEMs wahrscheinlich zu bestimmten Zellformaten hin tendieren, insbesondere bei Anwendungen für den Massenmarkt. Drei weitverbreitete Zellarten sind Pouch-, zylindrische und prismatische Zellen.

Pouch-Zellen bieten die höchste Energiedichte und sind aufgrund ihrer Außenfolie relativ leicht. Da sie fast ausschließlich in Elektrofahrzeugen verwendet werden, sind hohe Stückzahlen erforderlich, damit sie wirtschaftlich sind. Die hohe Energiedichte kann Sicherheitsbedenken aufwerfen, die in Kombination mit Problemen bei der gleichmäßigen Kühlung des Beutels noch verstärkt werden. Die Branche bewegt sich in Richtung der Größenrichtlinien des Verbands der Automobilindustrie (VDA), und zwar mit Laschen an beiden Enden der Zelle.

Zylindrische Zellen sind am weitesten entwickelt und aufgrund ihrer intensiven Verwendung in der Unterhaltungselektronik bereits gut auf dem Markt etabliert. Dadurch sind sie in Bezug auf Kosten konkurrenzfähig, wobei die Automobilindustrie eher zu 21700er-Zellen tendiert. Da sie rund sind, lassen sie sich nicht so gut in die Module integrieren. Sie können nicht so dicht gepackt werden, dafür können Kühlkanäle einfacher zwischen ihnen platziert werden.

Prismatische Zellen stellen einen Kompromiss zwischen zylindrischen und Pouch-Zellen dar. Die Packungsdichte ist aufgrund der Form der Zellen höher, aber die volumetrische und gravimetrische Energiedichte ist geringer als bei Pouch-Zellen. Ähnlich wie Pouch-Zellen sind sie speziell für den Einsatz in der Automobilindustrie konzipiert und müssen in großen Mengen hergestellt werden, um wirtschaftlich zu sein, wodurch sie recht teuer sind. In Bezug auf Pouch-Zellen übernehmen OEM zunehmend die BEV2- und PHEV2-Vorgaben des VDA.

2 Neue Zellformate und integrierte Funktionen

Im Zuge der Weiterentwicklung von Zellen könnten neue Zellformate entwickelt werden, um ihre Leistung zu verbessern. Die von Tesla angekündigte 4680-Batteriezelle mit der „Tabless“-Technologie bietet Verbesserungen bei der Fertigungseffizienz (indem die Fertigungsstraße nicht angehalten werden muss, um die Laschen anzubringen), der Energie- und Leistungsdichte sowie bei der Sicherheit. Weitere neuartige Konzepte wie Streifenzellen und neuartige aufgewickelte Batterien (Rolled-Ribbon Batteries) befinden sich in der Entwicklung, allerdings noch in einer frühen Phase.

Zellformate sind jedoch nur ein Aspekt der Optimierung. Verbesserte Optionen sind unter OEMs auch sehr gefragt. Die In-situ-Instrumentation und -Überwachung würde einen Leistungssprung in Richtung Gesundheitsmanagement und BMS-Entwicklung bedeuten. Mit optimierten Bauformen zur Verbesserung der thermischen Leistungsfähigkeit und zur Verringerung der Belastung der Zelle ließen sich auch die Sicherheit der Zelle erhöhen und die Belastung der Kühlsysteme verringern.

Stromverteilungssystem

Batteriemanagementsoftwares (BMS) werden immer ausgereifter und bieten mittels Selbstoptimierung, KI, Echtzeitüberwachung und Softwareupdates mehr Leistung, Schutz für die Gesundheit, Wartungsfreundlichkeit und ein besseres Batteriecycling.

Fahrplan 2020

Elektrische Energiespeicher | Fahrplan für Module und Packs

Zellformate und -entwicklung			
Stromverteilungssystem (einschließlich BMS-Hardware und -Software)	1 Architekturen mit 400 V Systemspannung	Allgemeine Einführung von Architekturen mit 800 V Systemspannung	Neuartige Architekturen mit 1200 V Systemspannung
	2 BMS-Upgrade mit historischen Daten	BMS geeignet für physik-basierte SoH- und SoC-Verfolgung der Zelle	KI-fähiges BMS mit selbstaktualisierenden Algorithmen, In-situ-Daten
	Telemetriefähige BMS-Architekturen. Offline-Updates für das Fahrzeug und Live-Überwachung		
	Next generat	Schalter/Stecker der nächsten Generation (z. B. Festkörper)	
	Günstigere & leichtere Sammelschienen	Sammelschienen aus mehreren Werkstoffen mit genauen Abmessungen und besserer Leitfähigkeit	
Thermisch (d. h. Kühlung, Heizung und Wärmeleitmaterialien einschließlich der Wärmeausbreitung)			
Mechanisch (z. B. Strukturen)			
Integration und Fertigung von Packs			
Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Module und Packs			

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

1 Fahrzeugarchitekturen mit höheren Spannungen

Architekturen mit 400 V Systemspannung haben sich bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen durchgesetzt und werden auch bei kosteneffizienten Anwendungen mit hoher Energiedichte eingesetzt. Die Einführung der Architektur mit 800 V Systemspannung im Pkw-Bereich deutet auf einen Paradigmenwechsel hin. Zu den Vorteilen einer höheren Spannung gehören dünnere, leichtere Kabel, kleinere, effizientere Motoren, ein geringeres Systemgewicht, schnelleres Laden und ein höherer Leistungsdurchsatz.

Eine Systemspannung von 800 V wird zunächst in Hochleistungsbereichen (z. B. im Elektro-Hummer von GM) zum Einsatz kommen, allerdings wird sie sich auch in Produkten für den Massenmarkt durchsetzen. Kia hat zum Beispiel angekündigt, dass für seine erste Elektroauto-Plattform Varianten mit 800 V Systemspannung eingeführt werden.

Die großflächige Einführung solcher und höherer Systemspannungen wird durch die Elektrifizierung von Lkw und von nicht für den Straßenverkehr bestimmten Fahrzeugen vorangetrieben, die derzeit mit einer Spannung von 700–800 V betrieben werden. Mit Blick auf das Schnellladen und das Potenzial für angebundene und Oberleitungsfahrzeuge könnten Spannungen von 1200 Volt bei diesen Anwendungen eingeführt werden.

2 Komplexität der BMS-Software

Durch eine Optimierung des BMS könnten bessere Informationen in Bezug auf den Lade- und Gesundheitszustand gesammelt und somit ein besseres Management der Batterielebensdauer und -leistung ermöglicht werden. Mithilfe genauer und realer Leistungsdaten, die in die Modelle der nächsten Generation einfließen, lassen sich kurzfristig Innovationen für BMS-Modelle realisieren.

Auf lange Sicht werden sich komplexere multiphysikalische Batteriemodelle durchsetzen, die sich selbst optimieren. Die Selbstparametrisierung und Aktualisierung von Batteriemodellen wäre mithilfe von KI möglich, und zwar auf der Grundlage der unmittelbaren Betriebsbedingungen (z. B. GPS, V2G, Schnellladetechnik).

Wenn Sensoren in die Zellen eingebettet werden, bietet sich die Möglichkeit eines verteilten BMS zur Überwachung und Steuerung einzelner Zellen. Der Gesundheitszustand eines Moduls wird oft von der schwächsten Zelle angegeben. Ein fortschrittliches BMS könnte eine Zelle isolieren oder bestimmten Zellen auf der Grundlage ihres Zustands Energie entziehen, wodurch ein gewisses Maß an Selbstheilung möglich und die Lebensdauer der Zellen verlängert würden.

Stromverteilungssystem

Es sind Fortschritte bei Steckverbindern, Schaltern und Sammelschienen erforderlich, insbesondere um die Vorteile des Übergangs zu Fahrzeugarchitekturen mit höheren Systemspannungen auszuschöpfen.

Zellformate und -entwicklung

Stromverteilungssystem

(einschließlich BMS-Hardware und -Software)

- Architekturen mit 400 V Systemspannung → Allgemeine Einführung von Architekturen mit 800 V Systemspannung → Neuartige Architekturen mit 1200 V Systemspannung
- BMS-Upgrade mit historischen Daten → BMS geeignet für physik-basierte SoH- und SoC-Verfolgung der Zelle → KI-fähiges BMS mit selbstaktualisierenden Algorithmen, In-situ-Daten
- 3 Telemetriefähige BMS-Architekturen. Offline-Updates für das Fahrzeug und Live-Überwachung
- 4 Schalter/Stecker der nächsten Generation (z. B. Festkörper)
- 5 Günstigere & leichtere Sammelschienen → Sammelschienen aus mehreren Werkstoffen mit genauen Abmessungen und besserer Leitfähigkeit

Thermisch

(d. h. Kühlung, Heizung und Wärmeleitmaterialien einschließlich der Wärmeausbreitung)

Mechanisch

(z. B. Strukturen)

Integration und Fertigung von Packs

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Module und Packs

3 Telemetriefähiges BMS

Telemetrie sorgt für Echtzeit-Überwachung und Live-Software-Updates ohne Ausfallzeiten des Fahrzeugs. Mithilfe der drahtlosen Datenübertragung können mit zunehmenden Systemkenntnissen sowohl wichtige Funktionen geändert als auch BMS-Parameter angepasst werden. Anhand von Betriebsdaten der Batterie können Störungen frühzeitig erkannt und eine vorbeugende Wartung durchgeführt werden.

Die Zwei-Wege-Kommunikation ermöglicht eine Analyse großer Datenmengen und verbessert die Batterielebensdauer und -leistung. Durch die Entwicklung neuer Algorithmen wird der Zustand der Batterie optimiert; zudem sind die Algorithmen bei der Planung des Batterie-Hardwarewechsels behilflich.

Ein zusätzlicher Vorteil von Batteriezustandsdaten besteht darin, dass gebrauchte Batterien dadurch eher wiederverwendet und akzeptiert werden. Fehlende Informationen über die Nutzungshistorie, den Status und den Ladezustand einer Batterie kosten Zeitund sind mit hohen Kosten in Bezug auf die Wiederverwendung der Batterie verbunden. Neue Anwendungen, die auf agnostischen Batterielieferketten beruhen, dürften mit solchen Daten an Bedeutung gewinnen.

4 Optimierte Schalter und Steckverbinder

Schalter und Steckverbinder sind elektrische Schaltgeräte, die zum Ein- und Ausschalten des Hochspannungskreises verwendet werden. Sie kommen üblicherweise in Elektrofahrzeug-anwendungen zum Einsatz, bei denen es auf eine hohe Strombelastbarkeit ankommt. Die Schalter öffnen und schließen sich schnell, um große Lasten bewältigen zu können. Sie können jedoch auch anfällig für Vibrationen und Ermüdungszustände sein. Zur Verbesserung der Qualität und Zuverlässigkeit der Schalter und zur Sicherstellung flexibler Spannungs-architekturen bedarf es neuer Schalterarten und -konzepte.

5 Kostengünstige und platzsparende Sammelschienen

Eine niederinduktive Verschienung hilft bei der Verteilung des Stroms von der Batterie eines Elektroautos zum elektrischen Antriebssystem. Durch eine geringere Vernickelung von Kupferschienen bietet sich ein kurzfristiges Innovationspotenzial. Auf diese Weise ließe sich die Menge des teuren Nickelpulvers, das auch als Kathodenwerkstoff verwendet wird, reduzieren. Durch den Einsatz von Aluminiumschienen können das Gewicht reduziert und die Kosten gesenkt werden. Allerdings ist Aluminium aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit und Ausdehnung im Vergleich zu Kupfer für Anwendungen mit höherer Leistung möglicherweise weniger geeignet. Hybride Kupfer- und Aluminiumschienen könnten einen Kompromiss zwischen Kosten und Leistung ermöglichen. Durch fortschrittlichere Methoden wie die Graphenbeschichtung könnte die Leitfähigkeit noch weiter optimiert werden.

Spezielle Batterieprofile in Kombination mit hohen Stromstärken machen fortschrittliche Werkstoffe und Formen für Sammelschienen erforderlich. Durch die Fertigung von Sammelschienen mit genauen Abmessungen kann die Komplexität reduziert werden, da sie einfacher verbunden werden können. Auf längere Sicht könnten wichtige Komponenten der Leistungselektronik in Sammelschienen integriert werden, darunter Elektrolytkondensatoren und oberflächenmontierte Bauteile (z. B. EMC/RFI-Filter zur Lärmdämpfung).

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Thermisch

Es braucht neue recycelbare Multifunktionswerkstoffe und aktive Kühlstrategien, um hohe Leistungen bewältigen zu können.

Fahrplan 2020

Elektrische Energiespeicher

Fahrplan für Module und Packs

Zellformate und -entwicklung

Stromverteilungssystem

(einschließlich BMS-Hardware und -Software)

Thermisch

(d. h. Kühlung, Heizung und Wärmeleitmaterialien einschließlich der Wärmeausbreitung)

Mechanisch (z. B. Strukturen)

Integration und Fertigung von Packs

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Module und Packs

1 Aktives Thermomanagement (integriert, kostengünstige Systeme) → Tauchkühlung für den Massenmarkt

2 Kühlplatten aus mehreren Werkstoffen → Neue thermisch abweisende Werkstoffe für Zellen mit hoher Leistungsdichte und passive Kühlverfahren

Verfahren zur Reduzierung des Energieverbrauchs in kalten Klimazonen → Speicherung thermischer Energie zur Aufrechterhaltung der Batterietemperatur in kalten Klimazonen

Optimierung bestehender Wärmeleit-/Verbindungsmaterialien → Rationalisierung und Integration von Wärmeleitmaterialien

Methoden zur Erkennung, Vermeidung und Unterdrückung der Feuerausbreitung/Sicherstellung des Abschlusses

1 Strategien der aktiven Kühlung

Für Batteriepacks mit niedrigen C-Raten eignet sich die erzwungene Konvektion oder auch die passive Kühlung, für Anwendungen mit hoher Leistungsdichte oder Schnellladetechnik reichen diese Techniken jedoch nicht aus. Bei Batteriepacks mit hoher Energie- sowie Leistungsdichte geht der Trend eher in Richtung Wasser-/Glykol-Kühlsystemen mit Kühlplatten. Die stärksten thermischen Ereignisse finden in der Regel bei Schnellladevorgängen mit Werten über 150 kW statt, bei denen deutliche Mengen an Energie durch Wärmeabgabe verloren gehen. Mögliche Lösungen dafür wären die Vorkühlung der Batterie, zusätzliche Kühlrohre und Lüfter oder die Verringerung der Ladeleistung zur Reduzierung des Kühlbedarfs.

Auf lange Sicht könnten Tauchkühlkonzepte, die im Motorsport eingesetzt werden, in die Automobilindustrie Einzug halten. Bei der Tauchkühlung (oder auch Immersionskühlung) kommt eine dielektrische Kühlflüssigkeit zum Einsatz, die die Zellen und Sammelschienen direkt kühlt. Dadurch können Dicke und Gewicht der Sammelschienen reduziert und die Zelle gleichmäßig gekühlt werden. Aufgrund des Gewichts und der Komplexität des Kühlkreislaufs in Verbindung mit den Kosten für die dielektrische Wärmemanagementflüssigkeit eignet sich dieser Ansatz jedoch eher für leistungsstarke Fahrzeuge.

2 Einsatz der passiven Kühlung

Die passive Kühlung ist eine energieeffiziente Lösung beruhend auf Kühlkörpern, Wärmespreizern, Wärmerohren oder Wärmeleitmaterialien, um Batterien auf einer optimalen Temperatur zu halten. Verbesserte Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe können im Vergleich zu Aluminium- und Kupferkühlplatten eine höhere Wärmeleitfähigkeit bieten. Wenn Batteriepacks mit hoher C-Rate auf den Markt kommen, braucht es neue Kühlplattenwerkstoffe, die Wärme sofort ableiten können. Kühltechnologien aus der Satelliten- und Luftfahrtbranche könnten zwar bei Hochleistungsanwendungen zur Anwendung kommen, allerdings wären dann Verbesserungen in der Fertigung erforderlich, damit sie auch für die Automobilindustrie infrage kommen.

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Thermisch

Um die optimale Temperatur der Batterien aufrechtzuerhalten, werden neue Werkstoffe und Methoden benötigt, um die Batterien effizienter zu erhitzen und die Wärme effektiv zu verwalten und abzuleiten.

Zellformate und -entwicklung

Stromverteilungssystem

(einschließlich BMS-Hardware und -Software)

Thermisch

(d. h. Kühlung, Heizung und Wärmeleitmaterialien einschließlich der Wärmeausbreitung)

Mechanisch
(z. B. Strukturen)

Integration und Fertigung von Packs

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Module und Packs

3 Erhitzen der Batterie

Batterien, die in einer kalten Klimazone betrieben werden, degradieren deutlich und werden aufgrund der HLK-Systeme einer zusätzlichen starken Belastung ausgesetzt, insbesondere bei Anwendungen wie batteriebetriebenen Elektrobussen. Darüber hinaus kommt die Energie, die zum Erhitzen des Batteriepacks auf die optimale Temperatur benötigt wird, von der Batterie selbst, wodurch sich die Priorität ergibt, den Energieverbrauch von Thermomanagementsystemen zu reduzieren. Auf lange Sicht bieten Phasenwechselwerkstoffe die Möglichkeit, Wärme aus der Überlastung der Batterie oder anderer Teile des Fahrzeugs zu speichern und dann entweder zum Erhitzen der Batterie oder für das HLK-System zu nutzen.

4 Rationalisierung von thermischen, Klebe- und Verbindungsmaterialien

Batteriemodule und -packs enthalten viele thermische, klebende und dichtende Materialien zum Erhalt der Temperatur und der strukturellen Integrität. Multifunktionale Werkstoffe, die sowohl Klebe- als auch Thermomanagementeigenschaften bieten, werden wertvolle Dienste leisten, um die Zahl der Nassverfahren zu reduzieren, die erforderlich sind, um das Innenleben von Batteriepacks zu fertigen. Diese neuen Harze und Werkstoffe müssen recycelbar sein, um die Vorschriften in Bezug auf die Lebensdauer einhalten zu können.

- Aktives Thermomanagement (integriert, kostengünstige Systeme) → Tauchkühlung für den Massenmarkt
- Kühlplatten aus mehreren Werkstoffen → Neue thermisch abweisende Werkstoffe für Zellen mit hoher Leistungsdichte und passive Kühlverfahren
- 3 Verfahren zur Reduzierung des Energieverbrauchs in kalten Klimazonen → Speicherung thermischer Energie zur Aufrechterhaltung der Batterietemperatur in kalten Klimazonen
- 4 Optimierung bestehender Wärmeleit-/Verbindungsmaterialien → Rationalisierung und Integration von Wärmeleitmaterialien
- 5 Methoden zur Erkennung, Vermeidung und Unterdrückung der Feuerausbreitung/Sicherstellung des Abschlusses

5 Thermisches Durchgehen erkennen und verhindern

Ein besseres Verständnis der Brandgefahren von Lithium-Ionen- und anderen Batterien ist entscheidend, um die Sicherheit bei der Verwendung dieser Batterien im Fahrzeug oder bei deren Herstellung, Lagerung und Transport zu gewährleisten. Ein thermisches Durchgehen führt zu einem Druckanstieg, zu Gas- und Partikelemissionen, zu Brand oder im schlimmsten Fall zu Explosionen. Verbesserte Test- und Validierungsverfahren mit schneller Durchlaufzeit sorgen dafür, dass Strategien zur Prävention und Unterdrückung solcher Ereignisse entwickelt werden können. Die Erforschung neuer Werkstoffe und Konstruktionsmerkmale, mit denen ein thermisches Durchgehen verhindert oder verteilt werden kann, bietet zahlreiche Vorteile.

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Mechanisch

Durch den zunehmenden Einsatz von Polymeren und Verbundwerkstoffen und die strukturelle Integration kann das Gewicht des Batteriepacks verringert werden. Es muss noch mehr getan werden, um robustere Verbindungstechniken in Serie zu bringen.

Zellformate und -entwicklung

Stromverteilungssystem (einschließlich BMS-Hardware und -Software)

Thermisch (d. h. Kühlung, Heizung und Wärmeleitmaterialien einschließlich der Wärmeausbreitung)

Mechanisch (z. B. Strukturen)

Integration und Fertigung von Packs

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Module und Packs

1 Leichte Batterieträger

Die meisten Batteriegehäuse und internen Trägerstrukturen sind aus Metall gefertigt. Polymere und Verbundwerkstoffe bieten die Möglichkeit, Teile zusammenzuführen und Funktionen zu integrieren. Allerdings sind bei Polymeren höhere Stückzahlen erforderlich, um die Werkzeugkosten zu senken, während bei Verbundwerkstoffen Prozessoptimierungen erforderlich sind, um höhere Stückzahlen zu erreichen. Auf lange Sicht kann davon ausgegangen werden, dass Batterien auch strukturell in ein Fahrzeug integriert werden, zum Beispiel als primäres Strukturelement.

2 Robustere Zellverbindungstechniken

Aus Kostengründen werden immer mehr alternative und gemischte Werkstoffe im Batteriepack verwendet. Um jedoch Leistung und Langlebigkeit sicherzustellen, ist eine robuste Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe, insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten, unerlässlich. Parallel zur Entwicklung neuer Verbindungstechniken müssen Methoden zur Herstellungsvalidierung entwickelt werden, um eine Großserienfertigung zu ermöglichen. Durch Closed-Loop-Testing in Echtzeit im Produktionskreislauf könnten hohe Kosten für die Verschrottung und die Abhängigkeit von End-of-Line-Testing (EOL) zur Störungserkennung vermieden werden. Neue elektrische Verbindungstechniken, mit denen die Taktzeit, die Abhängigkeit von Präzisionswerkzeugen und die Anzahl der Fehlermöglichkeiten reduziert werden können, würden Prüfverfahren zur Qualitätssicherung von Batterien erheblich vereinfachen. Die bei neuen Verbindungstechniken verwendeten Werkstoffe müssen leicht demontierbar sein, um die Wiederverwertung zu vereinfachen und ein energieeffizientes Recycling am Ende der Lebensdauer zu ermöglichen.

1 Leichte Batterieträger → Leichte Packstrukturen aus mehreren Werkstoffen (mit Polymeren)

2 Zell-/Modulverbindungstechniken für den Massenmarkt → Neuartige elektrische Verbindungen

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Integration und Fertigung von Packs

Batteriepacks und ihr Thermomanagement werden zunehmend in die Gesamtfahrzeugstruktur und -systeme integriert.

Fahrplan 2020
Elektrische Energiespeicher

Fahrplan für Module und Packs

Zellformate und -entwicklung

Stromverteilungssystem

(einschließlich BMS-Hardware und -Software)

Thermisch

(d. h. Kühlung, Heizung und Wärmeleitmaterialien einschließlich der Wärmeausbreitung)

Mechanisch
(z. B. Strukturen)

Integration und Fertigung von Packs

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Module und Packs

1 Erhöhtes Packungsverhältnis

Die „Blade"-Batterie von BYD erreicht durch den Verzicht auf Module und den Wegfall einiger Gehäusestrukturen ein hohes Packungsverhältnis (Cell-to-Pack). CATL ist noch einen Schritt weiter gegangen und kündigte die Cell-to-Chassis-Technologie (CTC) an, wobei die Batterie in die Karosserie integriert wird. Auf lange Sicht könnten Energiespeicher in die gesamte Karosseriestruktur integriert werden, und zwar durch leitfähige Strukturen, die Energie durch regeneratives Bremsen speichern, oder durch Solarzellen, die auf dem Dach oder an den Türen und Klappen angebracht werden.

2 Kombinierte Thermomanagentsysteme

Thermomanagementsysteme für Batterien sind oftmals vom Motor und von der Leistungselektronik getrennt. Wenn elektrische Antriebseinheiten zur Gewichtseinsparung kombiniert werden, würde ein einziger Kühlkreislauf die Effizienz auf Fahrzeugebene steigern. Durch den Einsatz von Phasenwechselwerkstoffen könnte die Wärme von Halbleitern und Elektromotoren die Batterie in kälteren Klimazonen vorkonditionieren.

3 In-situ-Modul- und Packvalidierung

Mithilfe der Inline-Zellen- und Modulprüfung lassen sich Fertigungsfehler verringern und zeitaufwendiges End-of-Line-Testing vermeiden. Außerdem bietet die Inline-Prüfung die Möglichkeit, Bereiche zu prüfen und zu kontrollieren, die sonst nicht geprüft werden können, wenn die Batterie vollständig montiert ist. Die Maschinenwerkzeuge müssen optimiert werden, um den Zustand von Zellen und Modulen zu testen und höhere Geschwindigkeiten mit präzisen Daten zu erreichen.

1 Cell-to-Pack-Batterien (z. B. ohne Module) → Cell-to-Chassis-Batterien → Strukturelle Batterien (z. B. als Teil der Karosserie)

2 In das Thermomanagement des Fahrzeugs integrierte Packs

3 Inline-Prüfung und -Validierung in Echtzeit → Beschleunigte Test- & Validierungsverfahren für den Massenmarkt

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Ökobilanz

Damit sich langfristig nachhaltige Lösungen etablieren können, müssen die Rückverfolgbarkeit und Überwachung in der Herstellung verbessert und Energie aus CO_2-armen Quellen eingesetzt werden.

Fahrplan 2020
Elektrische Energiespeicher

Fahrplan für Module und Packs

Zellformate und -entwicklung

Stromverteilungssystem

(einschließlich BMS-Hardware und -Software)

Thermisch

(d. h. Kühlung, Heizung und Wärmeleitmaterialien einschließlich der Wärmeausbreitung)

Mechanisch
(z. B. Strukturen)

Integration und Fertigung von Packs

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Module und Packs

1 Rückverfolgbarkeit und Überwachung über die gesamte Lebensdauer

Mit der Radiofrequenz-Identifikation (RFID) lassen sich zuverlässige Daten sammeln, nicht nur zu den Gesundheitsdaten des BMS, sondern auch darüber hinaus. Es gibt zwar ein gewisses Maß an Überschneidungen mit dem BMS, allerdings liefern RFID-Daten zusätzliche Informationen über die Herstellung und den Standort. Sie bieten auch die Möglichkeit der Redundanz, da BMS-Daten nach dem Recycling eventuell fehlerhaft sein können.

2 CO_2-Intensität und Umweltauswirkungen

Der doppelte Druck, der sich aus dem Ziel von Null-Netto-Emissionen und den Ökobilanzvorschriften für Fahrzeuge ergibt, zwingt Hersteller von Packs und Modulen dazu, ihre Herstellungsverfahren zu dekarbonisieren. Sie verbrauchen im Vergleich zu Herstellern in der Lieferkette für Batteriezellen zwar weniger Energie, allerdings braucht es CO_2-arme Energiequellen für energieintensive Verfahren wie das Laserschweißen und andere Techniken zum Verbinden und Aushärten von Zellen. Die Montage von Packs und Modulen gehört zu den ersten Bereichen, in denen das Ziel der Netto-Null-Emissionen erreicht werden kann.

1 In Zellen und Module integrierter Gesundheitspass (z. B. RFID) → Widerstandsfähige Batteriemodule und -packs, weniger Ausfälle

2 Weniger CO_2-Emissionen bei der Modul-/Packmontage, energieeffiziente Herstellung → Herstellungssysteme mit Netto-Null-Emissionen

Packkonstruktionen unter Berücksichtigung der Entsorgung und flexible Nutzung recycelter Werkstoffe → Auf Ökobilanz fokussierte Modul-/Packwertschöpfungsketten

Entwicklung mit Blick auf Demontage → Techniken zur Rückgewinnung von Werkstoffen (z. B mechanische Demontage, Verarbeitung) → Kreislaufwirtschaft für Module und Packs

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Ökobilanz

Es sind neue Ansätze erforderlich, um zu erkennen, wann eine Batterie wiederverwendet werden kann. Gleichzeitig muss dafür gesorgt werden, dass sie so konzipiert wird, dass der Übergang möglichst einfach ist.

Fahrplan 2020
Elektrische Energiespeicher

Fahrplan für Module und Packs

Zellformate und -entwicklung

Stromverteilungssystem

(einschließlich BMS-Hardware und -Software)

Thermisch

(d. h. Kühlung, Heizung und Wärmeleitmaterialien einschließlich der Wärmeausbreitung)

Mechanisch
(z. B. Strukturen)

Integration und Fertigung von Packs

Ökobilanz und Ende der Lebensdauer der Module und Packs

3 Second-Life-Konzepte für Batteriepacks

Die Nachfrage nach Batteriespeichern für Privathaushalte, den Lastenausgleich und gewerbliche Gebäude in Kombination mit den noch in den Kinderschuhen steckenden Recyclingverfahren für Batterien sorgt dafür, dass die Wiederverwendung von Batterien aus Elektroautos zur attraktiven Option wird. Durch eine bessere Modellierung können OEMs zusätzliche Informationen über die Degradationsraten im Laufe der Zeit erhalten.

So werden bessere Informationen darüber zur Verfügung gestellt, wann eine Batterie, die in einem Elektroauto eingesetzt wurde, in einer anderen Anwendung erneut verwendet werden kann, was Einflüsse auf die Produktentwicklung hätte. Eine einfachere mechanische Gestaltung der Batteriepacks sorgt auch dafür, dass wiederverwendbare Module und Zellen einfacher entnommen werden können. Dadurch werden die Kosten für die Umrüstung reduziert und die Akzeptanz wird verbessert. Schließlich sind auch standardisierte, transparente und aussagekräftige BMS-Daten erforderlich, die Spannung, Strom und Batteriezustand genau wiedergeben und die Leistung im Zeitverlauf erfassen können.

Die größten Hürden für die Wiederverwendung von Batterien aus Elektroautos liegen also eher im kommerziellen als im technologischen Bereich. Zellen, die wiederverwendet werden sollen und zwischen sieben bis zehn Jahren alt sind, müssen mit neuen Zellen mithalten können, die günstiger sind und eine höhere Energiedichte bieten. Mit Blick auf die Entwicklung der Ökobilanzvorschriften kann es jedoch attraktiver sein, Zellen wiederzuverwenden, als ständig neue Zellen herzustellen.

4 Extraktion von Batteriezellen ermöglichen

Batterien müssen in jedem Fall recycelt werden, unabhängig davon, ob es gelingt, ältere Batterien aus Elektroautos so zu vermarkten, dass sie in anderen Anwendungen wiederverwendet werden. Batteriepacks sind in der Regel auf ihre Nutzungsphase ausgelegt. Dicht- und Klebstoffe sowie mechanische Strukturen sind auf maximale Reichweite, Leistung und Sicherheit ausgerichtet. Um Batterien effektiv zu recyceln, müssen Batteriepacks so konzipiert werden, dass die Komplexität abnimmt, nicht recycelbare Kleb- und Dichtstoffe vermieden werden und eine mechanische Demontage der Batteriepacks mithilfe einfacher automatisierter Werkzeuge (statt durch menschliche Arbeit) möglich wird.

Auf kurze Sicht werden die meisten Batteriegehäuse und Verschlüsse aus Aluminium oder Stahl bestehen, die sich leicht recyceln lassen. Zur Verringerung des Gewichts werden jedoch Strukturen aus Polymeren und gemischten Werkstoffen erforscht, um die Reichweite zu erhöhen oder die Batterie kleiner zu gestalten, insbesondere bei leichten Nutzfahrzeugen und Bussen, bei denen die Reichweite entscheidend ist. Dadurch wird es schwieriger, Pack- und Modulstrukturen zu erkennen, zu sortieren und zu demontieren. Da Kunststoffe und Metalle unterschiedliche und komplexe Verwertungswege beschreiten, bedeutet die Anpassung der Demontageverfahren an diese Unterschiede erhebliche zusätzliche Kosten.

In Zellen und Module integrierter Gesundheitspass (z. B. RFID) → Widerstandsfähige Batteriemodule und -packs, weniger Ausfälle

Weniger CO_2-Emissionen bei der Modul-/Packmontage, energieeffiziente Herstellung → Herstellungssysteme mit Netto-Null-Emissionen

3 Packkonstruktionen unter Berücksichtigung der Entsorgung und flexible Nutzung recycelter Werkstoffe → Auf Ökobilanz fokussierte Modul-/Packwertschöpfungsketten

4 Entwicklung mit Blick auf Demontage → Techniken zur Rückgewinnung von Werkstoffen (z. B mechanische Demontage, Verarbeitung) → Kreislaufwirtschaft für Module und Packs

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Glossar

Abkürzung	Erläuterung
Ah	Amperestunden. Die Stromstärke (Amperezahl), die eine Batterie eine Stunde lang liefern kann.
KI	Künstliche Intelligenz. Intelligente Maschinen und Algorithmen, die Aufgaben ausführen können, für die normalerweise menschliche Intelligenz erforderlich ist.
BMS	Batteriemanagementsystem. Es überwacht und regelt den Zustand der Batterie und misst u. a. Spannung, Temperatur, Stromstärke, Gesundheits- und Ladezustand und Entladungstiefe.
CATL	Contemporary Amperex Technology Co., Limited. Chinesisches Unternehmen, das Lithium-Ionen-Batterien entwickelt und herstellt.
EDU	Electric Drive Unit (elektrische Antriebseinheit). Integrierte Einheit aus Leistungselektronik, Getriebe und Elektromotor.
HF	Fluorwasserstoff
HGV	Heavy Goods Vehicle (Schwerlaster)
HLK	Heizung, Lüftung und Klimatisierung
Ökobilanz	Bewertung der Lebenszyklen. Hierbei werden die Umweltauswirkungen über alle Phasen des Lebenszyklus eines Produkts hinweg erfasst (z. B. von der Rohstoffgewinnung über die Verarbeitung, Herstellung und Nutzung bis hin zum Recycling bzw. zur Entsorgung am Ende der Lebensdauer).
LTO, LFP, LFMP, NMC, NCA, LMO, eLNO	Beispiele für verschiedene Lithium-Ionen-Kathoden- und Anodenwerkstoffe, die in Automobilanwendungen zum Einsatz kommen.
Li-S	Lithium-Schwefel-Batterien bieten eine höhere Energiedichte und sind kostengünstiger als Lithium-Ionen-Batterien.
NMP	N-Methyl-2-pyrrolidon ist ein teures Lösungsmittel, das für die Herstellung von Batteriezellen benötigt wird, aber nicht im Endgerät enthalten ist. Bei der Verwendung entstehen zudem entzündliche Dämpfe und es ist hochgiftig.
PE, PP, PVDF	Polyethylen, Polypropylen und Polyvinylidenfluorid sind thermoplastische Polymere mit nützlichen chemischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften.
QA	Qualitätssicherung.
SOC	Der Ladezustand ist das Pendant zur Tankanzeige bei einem Batteriepack. Der Ladezustand wird in der Regel in Prozentpunkten ausgedrückt (0 % = leer, 100 % = voll).
VDA	Der Verband der Automobilindustrie e.V. ist eine deutsche Interessenvertretung für die deutsche Automobilindustrie, die eine Reihe von Normen und Empfehlungen für Lithium-Ionen-Batteriesysteme veröffentlicht hat.
VOC	Flüchtige organische Verbindungen sind verschiedene chemische Stoffe, von denen einige langfristige Auswirkungen auf die Gesundheit haben können.

Ein besonderer Dank geht an Spell Creative und Mindraft für die Unterstützung bei der Gestaltung und Ausarbeitung dieses Berichts sowie an BMG Research für die Durchführung der Umfrage unter Branchenexperten für den Fahrplan im Auftrag des APC und für die Unterstützung.