Auswirkungen zukünftiger Batterietechnologien auf den Pkw-Markt

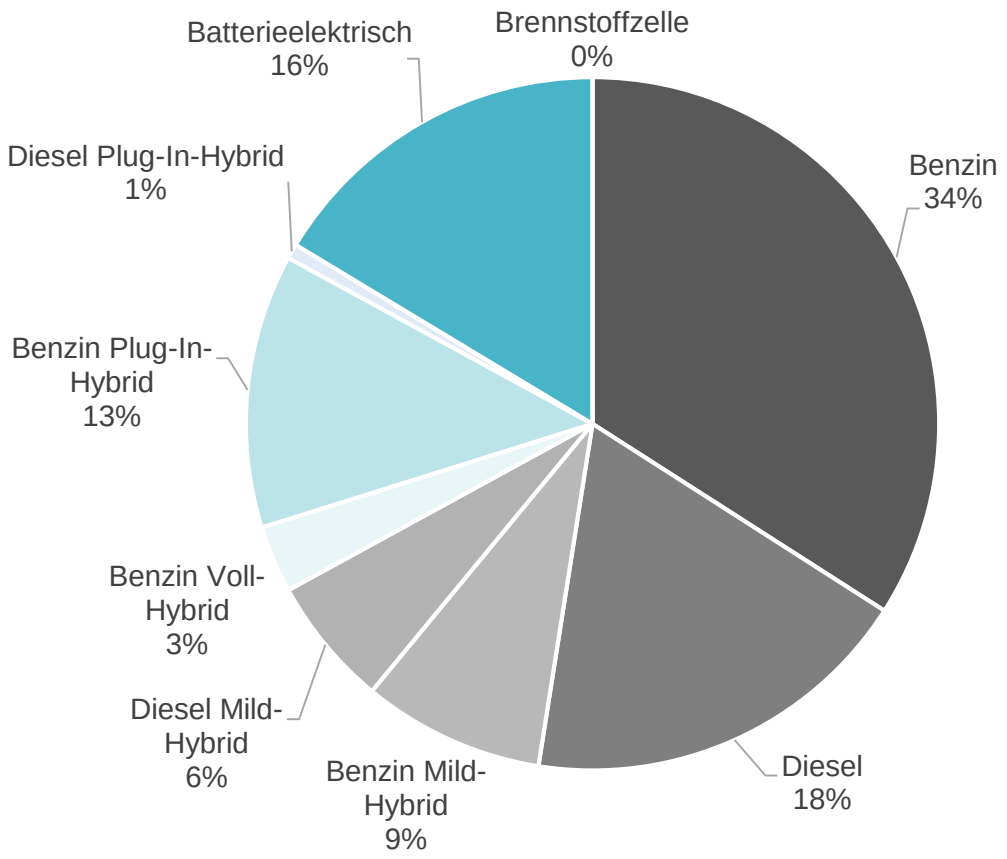
Samuel Hasselwander, WerkstoffPlus Auto, Stuttgart, 20.02.2024

Hintergrund

Aktuell

- Sehr diverser Fahrzeugmarkt
  - Benzin, Diesel, Erdgas, Voll- und Plug-In Hybride, Batterieelektrisch (BEV), Brennstoffzelle (FCEV)
- Verbrennungsmotor-dominiert
  - Bekannte Komponenten, Werkstoffe, Lieferketten

Anteil Antriebsarten bei Pkw-Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2022



Eigene Auswertung auf Basis von KBA [1,2] und ADAC [3] Daten. [1] Kraftfahrt-Bundesamt, Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Herstellern und Handelsnamen (FZ 4), Jahr 2021. [2] Kraftfahrt-Bundesamt, Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Marken und Modellreihen (FZ 10), Monatsergebnisse, Dezember 2022. [3] ADAC Fahrzeugdatenbank 2022

Hintergrund

Aktuell

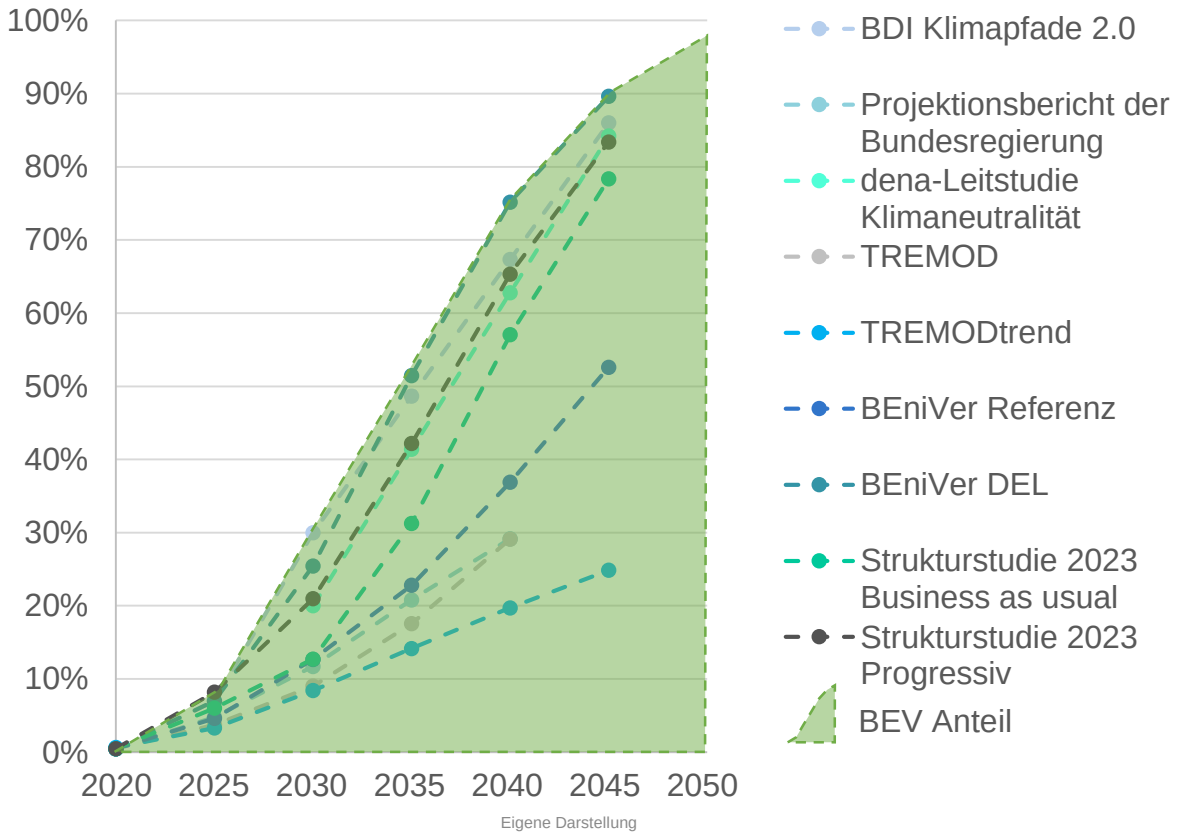
- Sehr diverser Fahrzeugmarkt
  - Benzin, Diesel, Erdgas, Voll- und Plug-In Hybride, Batterieelektrisch (BEV), Brennstoffzelle (FCEV)
- Verbrennungsmotor-dominiert
  - Bekannte Komponenten, Werkstoffe, Lieferketten

Zukünftig

- Aufgrund von strengeren Klimaschutz-Maßnahmen und Flottengrenzwerten:

  →**Starke Marktdurchdringung von batterie-elektrischen Fahrzeugen (BEVs) erwartet**

Anteil BEVs am deutschen Fahrzeugbestand nach verschiedenen Markt-Szenarien

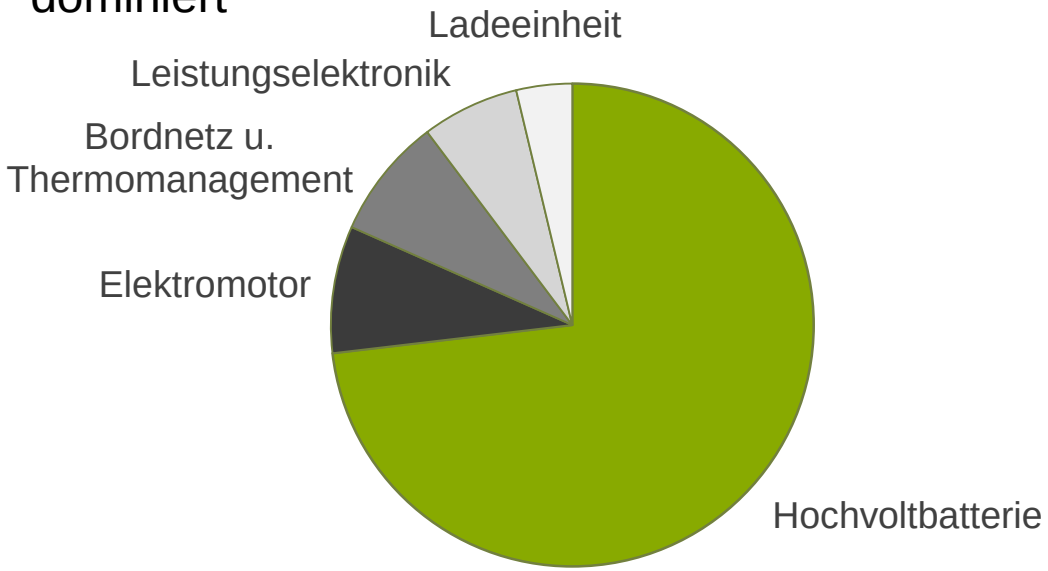


Eigene Darstellung

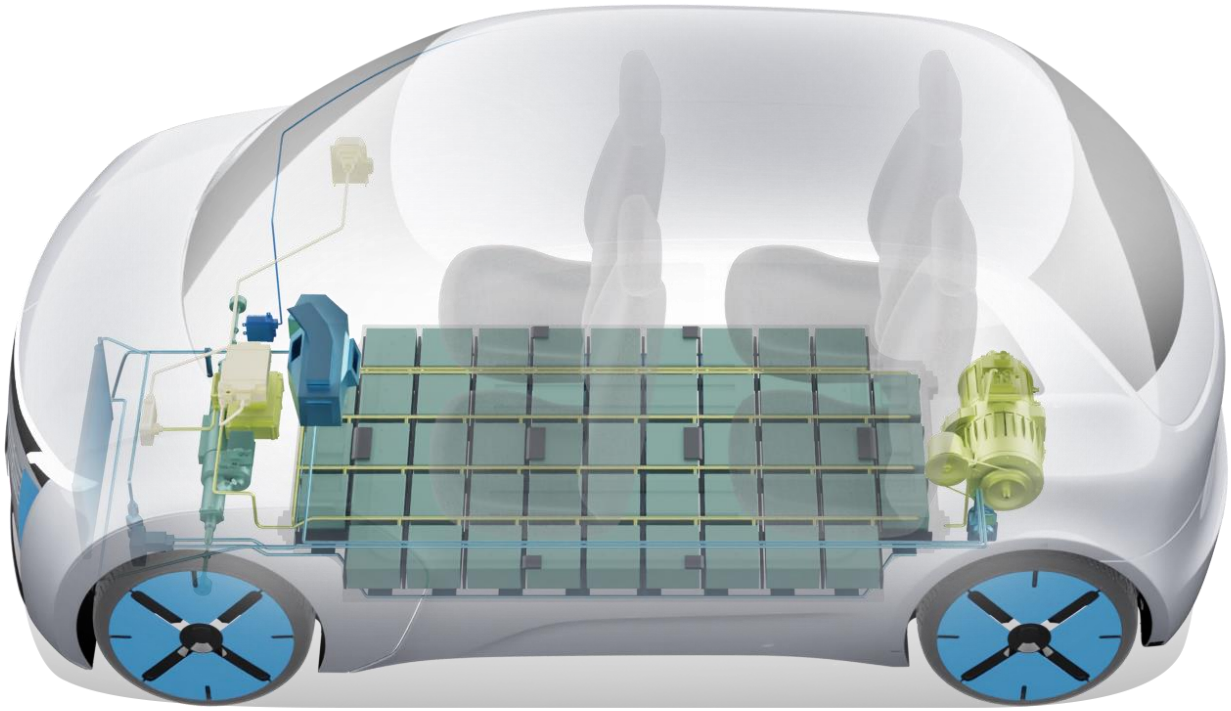
Hintergrund

Elektrischer Antriebsstrang

- Rein elektrischer Antriebsstrang deutlich simpler als verbrennungsmotorischer
- Wertschöpfungsanteil stark von der Batterie dominiert



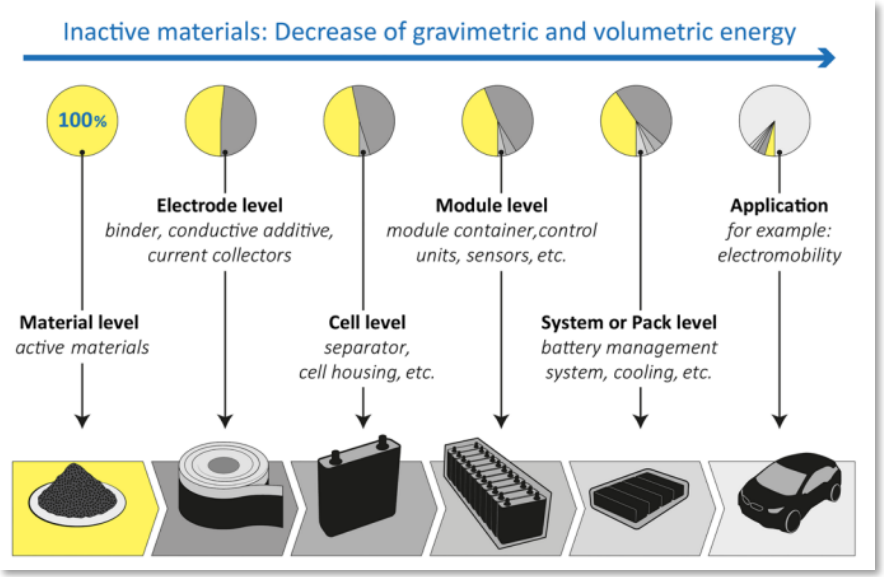
Angelehnt an e-mobil BW (Hrsg.) (2023): Strukturstudie BWe mobil 2023. Stuttgart. Veröffentlichung in Q3 2023.



Technologische Trends

Traktionsbatterie

- Entwicklung neuer Aktivmaterialien
- Vergrößerung einzelner Zellen (z.B. von 18650 auf 4680)
- Verzicht auf Module (Cell-to-Pack)
- Verbesserte Thermo- und Batterie-Managementsysteme sowie leichtere Gehäusematerialien
- Batteriepack als strukturelle Komponente

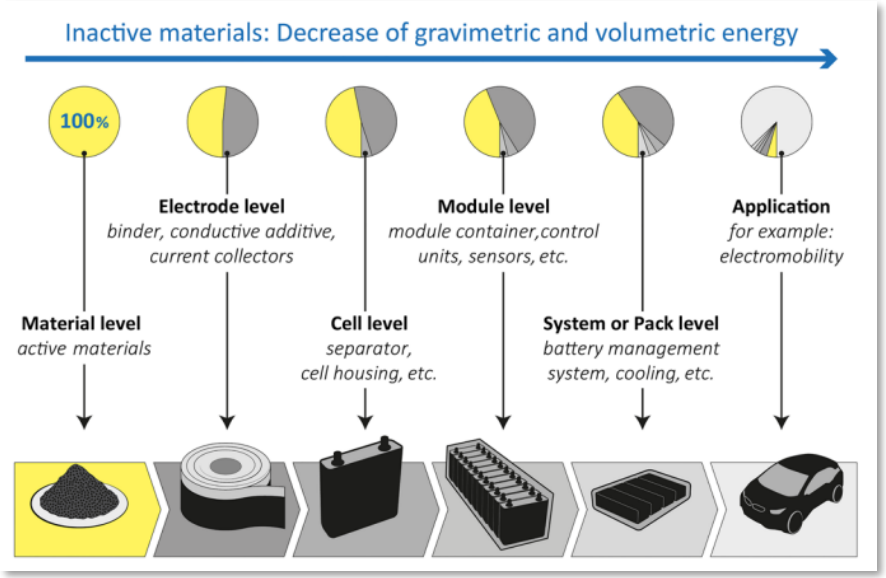


European Commission, Directorate-General for Environment (2018): Towards the battery of the future. Publications Office. Online verfügbar unter https://data.europa.eu/doi/10.2779/674936.

Technologische Trends

Traktionsbatterie

- Entwicklung neuer Aktivmaterialien
- Vergrößerung einzelner Zellen (z.B. von 18650 auf 4680)
- Verzicht auf Module (Cell-to-Pack)
- Verbesserte Thermo- und Batterie-Managementsysteme sowie leichtere Gehäusematerialien
- Batteriepack als strukturelle Komponente



European Commission, Directorate-General for Environment (2018): Towards the battery of the future. Publications Office. Online verfügbar unter https://data.europa.eu/doi/10.2779/674936.

Bis zu 30% Gewichtsersparnis des Batteriegehäuses möglich

Technologische Trends

Traktionsbatterie

- **Entwicklung neuer Aktivmaterialien**
- Vergrößerung einzelner Zellen (z.B. von 18650 auf 4680)
- Verzicht auf Module (Cell-to-Pack)
- Verbesserte Thermo- und Batterie-Managementsysteme sowie leichtere Gehäusematerialien
- Batteriepack als strukturelle Komponente

Bis zu 30% Gewichtsersparnis des Batteriegehäuses möglich

Aktuell typische Zellchemien für Li-Ionen Traktionsbatterien

Aktuelle Li-Ion Batteriezellen inkl. Marktanteil (2022)[1]

NMC Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (64%)

LFP Lithium-Eisen-Phosphat (29%)

NCA Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (7%)

LMO Lithium-Mangan-Oxid

LTO Lithium-Titan-Oxid

- Meist verbreitester Kathodentyp
- Versch. Mengenverhältnisse von Nickel, Mangan, Kobalt
- Hohe Energiedichte (Nennspannung von 3,6-3,7 V)

[1]Hölzle, Markus et al. (2023): Batterien für die Energiewende: Immer besser, günstiger, globaler, Vortrag bei der electrive.net Konferenz. 29.03.2023. https://www.electrive.net/2023/04/12/batterien-fuer-die-energiewende-immer-besser-guenstiger-globaler-markus-hoelzle-vom-zsw/. Zuletzt geprüft am 21.08.2023.

Aktuell typische Zellchemien für Li-Ionen Traktionsbatterien

Aktuelle Li-Ion Batteriezellen inkl. Marktanteil (2022)[1]

NMC Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (64%)

LFP Lithium-Eisen-Phosphat (29%)

NCA Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (7%)

LMO Lithium-Mangan-Oxid

LTO Lithium-Titan-Oxid

- Meist verbreitester Kathodentyp
- Versch. Mengenverhältnisse von Nickel, Mangan, Kobalt
- Hohe Energiedichte (Nennspannung von 3,6-3,7 V)

- Kostengünstige und unkritische Materialien
- Hohe Struktur- und Zyklenstabilität
- Hohe Eigensicherheit und Lebensdauer (3000 Zyklen)
- Vergleichsweise niedrige Energiedichte (3,3 V)

[1]Hölzle, Markus et al. (2023): Batterien für die Energiewende: Immer besser, günstiger, globaler, Vortrag bei der electrive.net Konferenz. 29.03.2023. https://www.electrive.net/2023/04/12/batterien-fuer-die-energiewende-immer-besser-guenstiger-globaler-markus-hoelzle-vom-zsw/. Zuletzt geprüft am 21.08.2023.

Aktuell typische Zellchemien für Li-Ionen Traktionsbatterien

Aktuelle Li-Ion Batteriezellen inkl. Marktanteil (2022)[1]

NMC Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (64%)

LFP Lithium-Eisen-Phosphat (29%)

NCA Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (7%)

LMO Lithium-Mangan-Oxid

LTO Lithium-Titan-Oxid

- Meist verbreitester Kathodentyp
- Versch. Mengenverhältnisse von Nickel, Mangan, Kobalt
- Hohe Energiedichte (Nennspannung von 3,6-3,7 V)

- Kostengünstige und unkritische Materialien
- Hohe Struktur- und Zyklenstabilität
- Hohe Eigensicherheit und Lebensdauer (3000 Zyklen)
- Vergleichsweise niedrige Energiedichte (3,3 V)

- Massenproduktion von Tesla zus. mit Panasonic
- Hohe Entladekapazität
- Hohe Energiedichte (Nennspannung von 3,6-3,7 V)

[1]Hölzle, Markus et al. (2023): Batterien für die Energiewende: Immer besser, günstiger, globaler, Vortrag bei der electrive.net Konferenz. 29.03.2023. https://www.electrive.net/2023/04/12/batterien-fuer-die-energiewende-immer-besser-guenstiger-globaler-markus-hoelzle-vom-zsw/. Zuletzt geprüft am 21.08.2023.

Aktuell typische Zellchemien für Li-Ionen Traktionsbatterien

Aktuelle Li-Ion Batteriezellen inkl. Marktanteil (2022)[1]

NMC Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (64%)

LFP Lithium-Eisen-Phosphat (29%)

NCA Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (7%)

LMO Lithium-Mangan-Oxid

LTO Lithium-Titan-Oxid

- Meist verbreitester Kathodentyp
- Versch. Mengenverhältnisse von Nickel, Mangan, Kobalt
- Hohe Energiedichte (Nennspannung von 3,6-3,7 V)

- Kostengünstige und unkritische Materialien
- Hohe Struktur- und Zyklenstabilität
- Hohe Eigensicherheit und Lebensdauer (3000 Zyklen)
- Vergleichsweise niedrige Energiedichte (3,3 V)

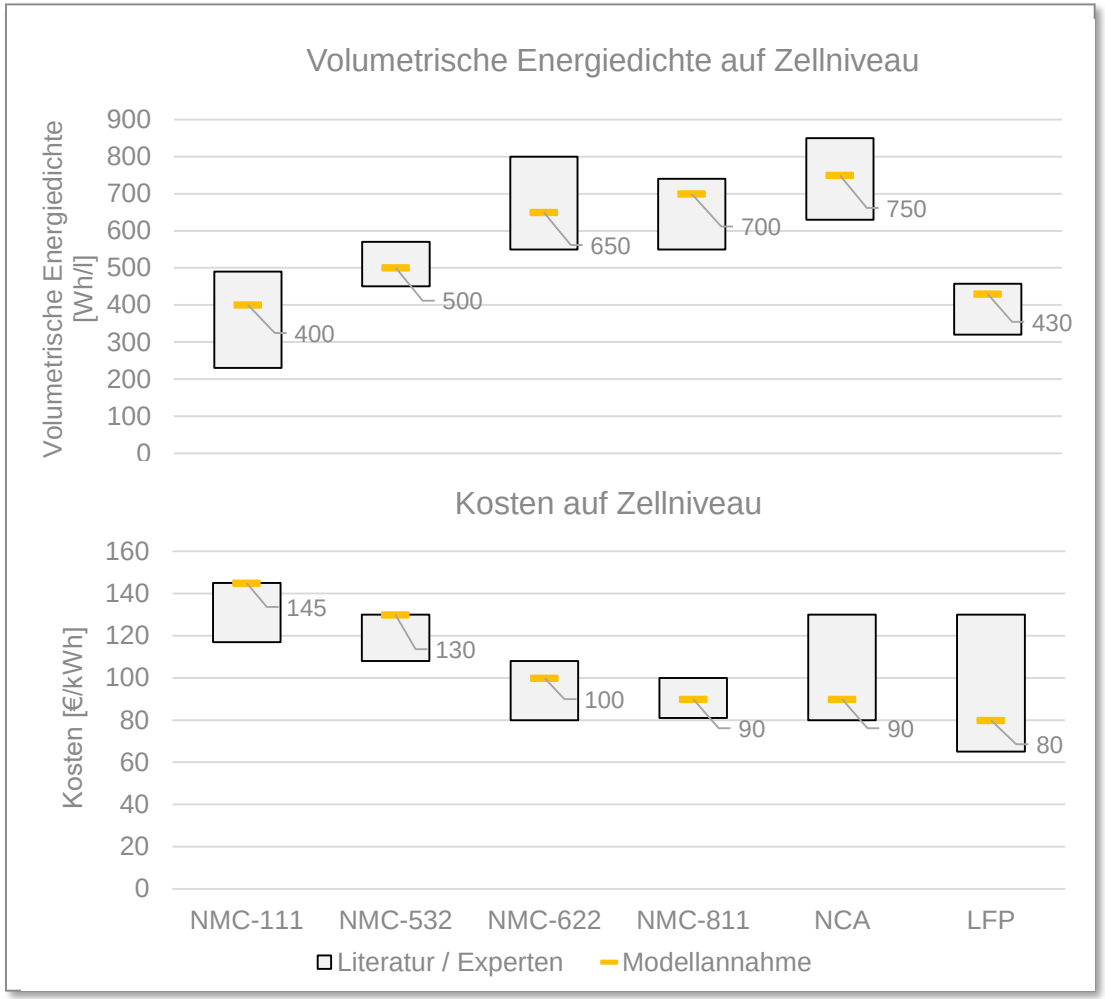
- Massenproduktion von Tesla zus. mit Panasonic
- Hohe Entladekapazität
- Hohe Energiedichte (Nennspannung von 3,6-3,7 V)

[1]Hölzle, Markus et al. (2023): Batterien für die Energiewende: Immer besser, günstiger, globaler, Vortrag bei der electrive.net Konferenz. 29.03.2023. https://www.electrive.net/2023/04/12/batterien-fuer-die-energiewende-immer-besser-guenstiger-globaler-markus-hoelzle-vom-zsw/. Zuletzt geprüft am 21.08.2023.

Entwicklung spezifischer Key Performance Indikatoren (KPIs) aktueller Zellchemien

Basierend auf:

- Wissenschaftlicher Literatur
- Konferenz-Beiträgen
- Datenblättern
- Tear-Down Analysen
- Experteninterviews



Hasselwander, S.; Meyer, M.; Österle, I.: Techno-Economic Analysis of Different Battery Cell Chemistries for the Passenger Vehicle Market. Batteries 2023, 9, 379. https://doi.org/10.3390/batteries9070379

Types of future battery chemistries

- Verbesserung der Energiedichte von LFP-Zellen durch Zugabe von Mangan → Erhöhung der Nennspannung auf bis zu 4,1 V

Mögliche zukünftige Zellchemien:

LMFP Lithium-Mangan-Eisen-Phosphat

So-Ion Natrium-Ionen-Batterie

SS Solid-State-Battery (Feststoffbatterie)

Types of future battery chemistries

Mögliche zukünftige Zellchemien:

LMFP Lithium-Mangan-Eisen-Phosphat

So-Ion Natrium-Ionen-Batterie

SS Solid-State-Battery (Feststoffbatterie)

- Verbesserung der Energiedichte von LFP-Zellen durch Zugabe von Mangan → Erhöhung der Nennspannung auf bis zu 4,1 V

- Kostengünstige Alternative zur Lithium-Ionen-Technologie
- Hohe Ladegeschwindigkeiten, strukturelle und thermische Stabilität
- Kaum kälteempfindlich → behält 90% Kapazität auch bei -20 °C
- Aber geringere Energiedichte im Vergleich zu LFP-Batterien
- Erste Fahrzeuge stehen kurz vor der Produktion (BYD Seagull)

Types of future battery chemistries

Mögliche zukünftige Zellchemien:

LMFP Lithium-Mangan-Eisen-Phosphat

So-Ion Natrium-Ionen-Batterie

SS Solid-State-Battery (Feststoffbatterie)

- Verbesserung der Energiedichte von LFP-Zellen durch Zugabe von Mangan → Erhöhung der Nennspannung auf bis zu 4,1 V

- Kostengünstige Alternative zur Lithium-Ionen-Technologie
- Hohe Ladegeschwindigkeiten, strukturelle und thermische Stabilität
- Kaum kälteempfindlich → behält 90% Kapazität auch bei -20 °C
- Aber geringere Energiedichte im Vergleich zu LFP-Batterien
- Erste Fahrzeuge stehen kurz vor der Produktion (BYD Seagull)

- Flüssiger organischer Elektrolyt ersetzt durch ionenleitenden Feststoff
- Aktuell entweder: Polymere, hybride und keramische Festelektrolyte
- Höhere Energiedichte in Kombination mit einer metallischen Lithiumanode
- Technologie noch in einem frühen Entwicklungsstadium, aber viele OEMs investieren in Start-ups wie: Factorial Energy, QuantumScape, Solid Power

Types of future battery chemistries

Mögliche zukünftige Zellchemien:

LMFP Lithium-Mangan-Eisen-Phosphat

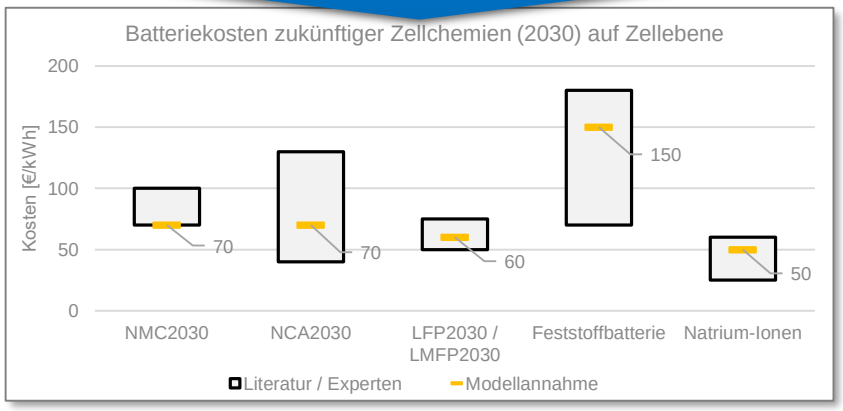
So-Ion Natrium-Ionen-Batterie

SS Solid-State-Battery (Feststoffbatterie)

- Verbesserung der Energiedichte von LFP-Zellen durch Zugabe von Mangan → Erhöhung der Nennspannung auf bis zu 4,1 V

- Kostengünstige Alternative zur Lithium-Ionen-Technologie
- Hohe Ladegeschwindigkeiten, strukturelle und thermische Stabilität
- Kaum kälteempfindlich → behält 90% Kapazität auch bei -20 °C
- Aber geringere Energiedichte im Vergleich zu LFP-Batterien
- Erste Fahrzeuge stehen kurz vor der Produktion (BYD Seagull)

Aufgrund des frühen Entwicklungsstatus hohe Abweichungen bei den Aussagen zu den KPIs



- Flüssiger organischer Elektrolyt ersetzt durch ionenleitenden Feststoff
- Aktuell entweder: Polymere, hybride und keramische Festelektrolyte
- Höhere Energiedichte in Kombination mit einer metallischen Lithiumanode
- Technologie noch in einem frühen Entwicklungsstadium, aber viele OEMs investieren in Start-ups wie: Factorial Energy, QuantumScape, Solid Power

Bottom-Up Modell zur Batteriebewertung

Segmente: Kleinfahrzeug, Mittelklasse, Oberklasse
Jahre: 2022, 2030

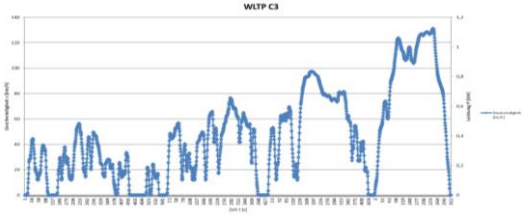
Batterietechnologie
- Gravimetrische Energiedichte
- Volumetrische Energiedichte
- CtP-Technologie
- Lebenszyklen

Integration über den vorhandenen Batteriebauraum

Aufbau der Fahrzeugmodelle
- Fahrzeuggewicht
- Batteriekapazität
- Stirnfläche
- Luftwiderstandsbeiwert
- etc.

Abbildung des WLTP-Fahrzyklus

Beschleunigung a
Geschwindigkeit v



Berechnung der Fahrwiderstände

$F_A = m * a * e_i$

$F_{LW} = \rho/2 * c_w * A * v^2$

$F_R = f_R * m * g$

Berücksichtigung der Antriebsstrangwirkungsgrade und der Rekuperation

Energieverbrauch [kWh/100km]

Reichweite [km]

Bottom-Up Modell zur Batteriebewertung

Segmente: Kleinfahrzeug, Mittelklasse, Oberklasse
Jahre: 2022, 2030

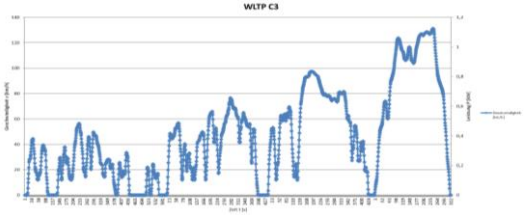
Batterietechnologie
- Gravimetrische Energiedichte
- Volumetrische Energiedichte
- CtP-Technologie
- Lebenszyklen

Integration über den vorhandenen Batteriebauraum

Aufbau der Fahrzeugmodelle
- Fahrzeuggewicht
- Batteriekapazität
- Stirnfläche
- Luftwiderstandsbeiwert
- etc.

Abbildung des WLTP-Fahrzyklus

Beschleunigung a
Geschwindigkeit v



Berechnung der Fahrwiderstände

$F_A = m * a * e_i$

$F_{LW} = \rho/2 * c_w * A * v^2$

$F_R = f_R * m * g$

Berücksichtigung der Antriebsstrangwirkungsgrade und der Rekuperation

Energieverbrauch [kWh/100km]

Reichweite [km]

Integrierte Kostenrechnung

- **Ziel:**
  Vergleich der Batterietechnologien in Bezug auf Verbrauch, Reichweite und Kosten für verschiedene Fahrzeugsegmente und Jahre

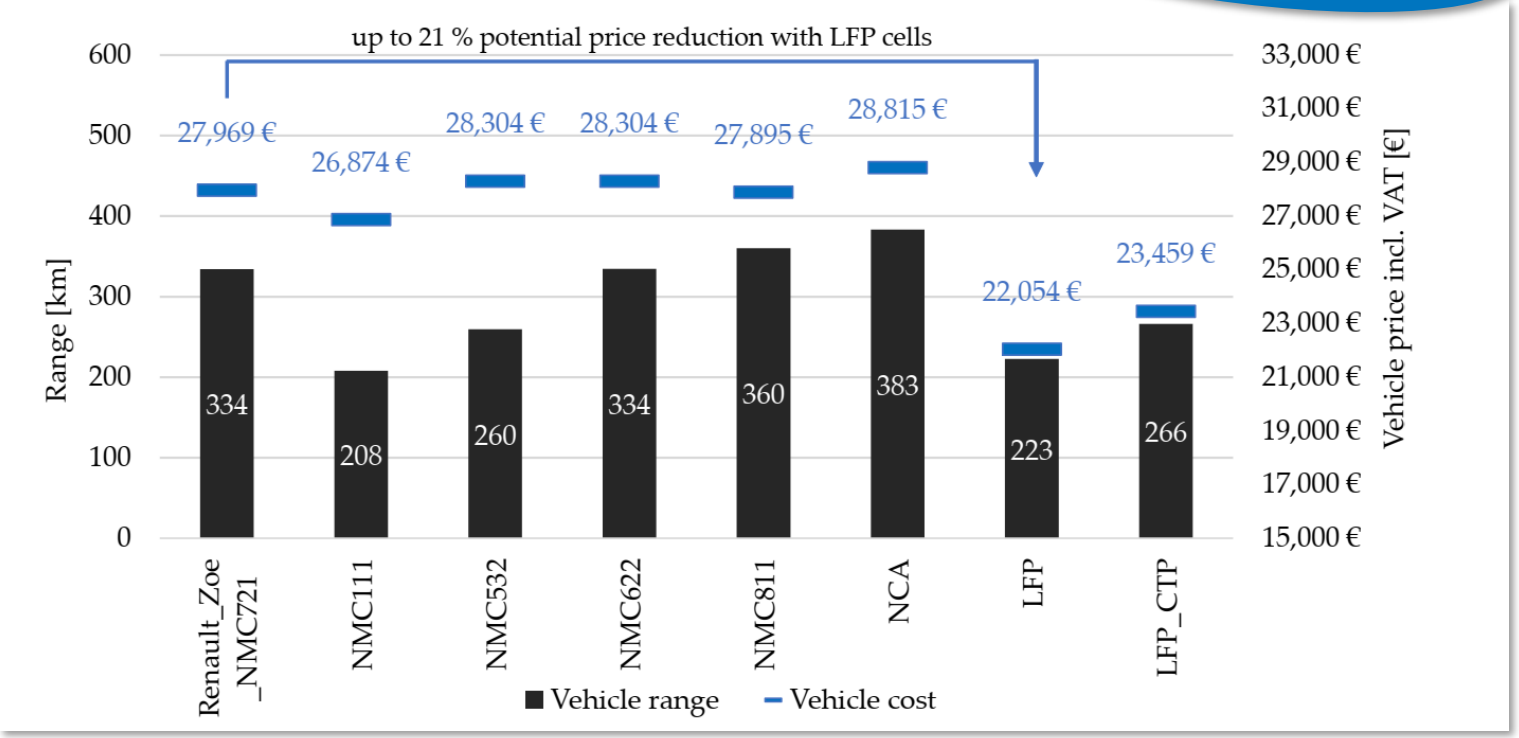
Ergebnisse für das Kleinwagensegment

Kleinwagen, aktuelle Zellchemien

Vergleich des Einflusses verschiedener aktueller Zellchemien auf den Preis und die Reichweite eines Fahrzeuges im Kleinwagensegment

- Bauraumannahme Batterie: 325 l
- Ca. **21 % Kosteneinsparung** mit LFP
- Ca. 33 % geringere Reichweite mit LFP im Vergleich zu Zellchemien mit hohem Nickelgehalt

→ Mit Cell-to-Pack-Technologie könnten LFP Kleinfahrzeuge Reichweiten von über 250 Kilometern erzielen



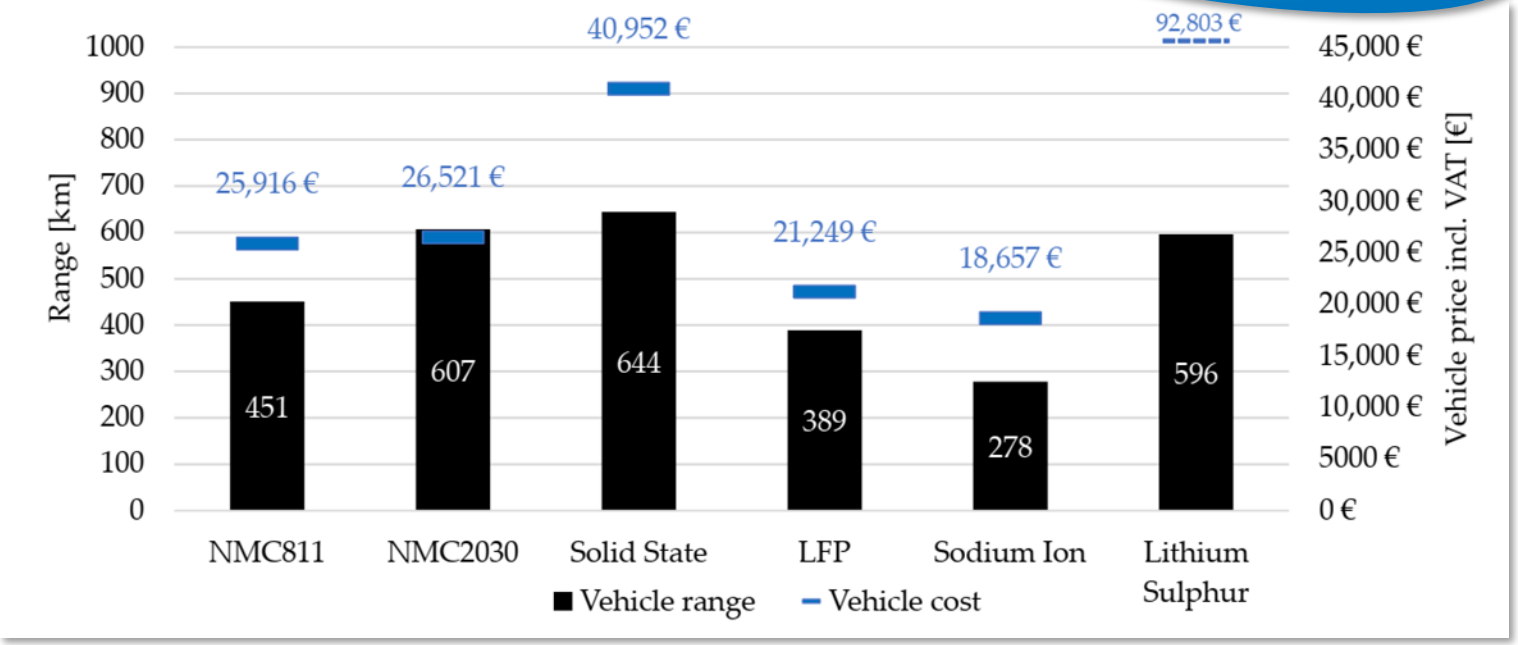
Hasselwander, S.; Meyer, M.; Österle, I.: Techno-Economic Analysis of Different Battery Cell Chemistries for the Passenger Vehicle Market. Batteries 2023, 9, 379. https://doi.org/10.3390/batteries9070379

Ergebnisse für das Kleinwagensegment

Kleinwagen, zukünftige Zellchemien

Vergleich des Einflusses möglicher **zukünftiger Zellchemien** auf den Preis und die Reichweite eines Fahrzeuges im Kleinwagensegment

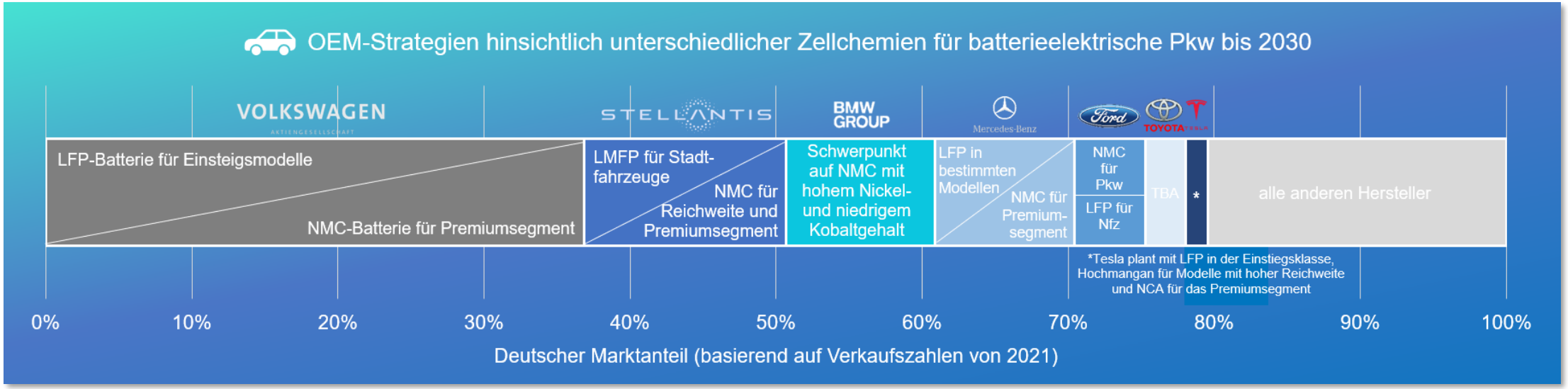
- Gleiches Batterievolumen (325 l)
- Geringerer Energieverbrauch erhöht die Reichweite unabhängig vom Batterietyp
- Fahrzeuge mit LFP- oder Natrium-Ionen-Batterie mit ausreichenden Reichweiten (Cell-to-Pack-Technologie)



Hasselwander, S.; Meyer, M.; Österle, I.: Techno-Economic Analysis of Different Battery Cell Chemistries for the Passenger Vehicle Market. Batteries 2023, 9, 379. https://doi.org/10.3390/batteries9070379

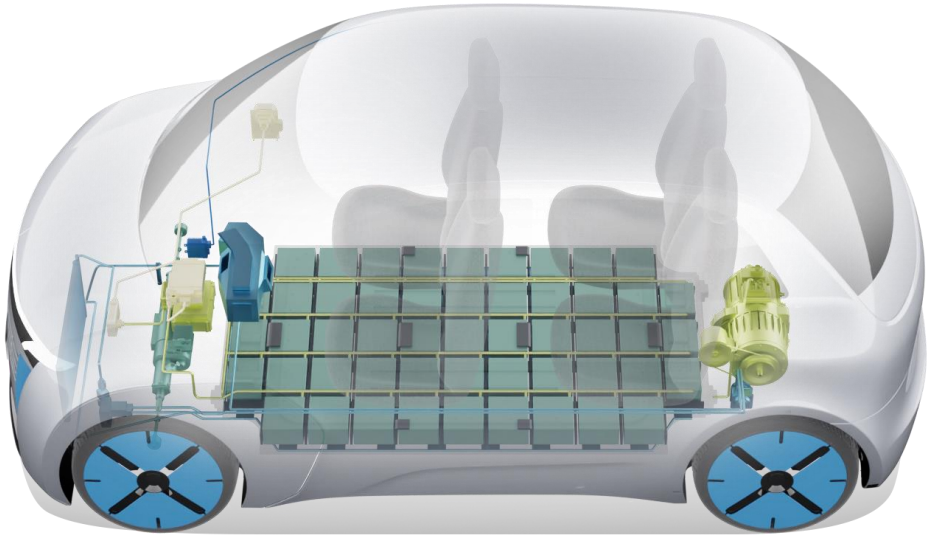
Fahrzeughersteller (OEMs) setzen auf eine Diversifizierung der Zellchemie

- LFP- bzw. LMFP-Batterien im Einstiegs- und Volumensegment
- NMC- bzw. NCA-Batterien im Premiumsegment



Zusammenfassend

- Die OEMs diversifizieren ihre Produktpallette hinsichtlich unterschiedlicher Zellchemien
- Insbesondere im Klein- und Kompakt-Fahrzeugsegment wird die Integration von LFP- und Na-Ionen-Batterien erwartet
- Durch Cell-to-Pack-Systeme kann die volumetrische Energiedichte um bis zu 20% erhöht werden
  - \+ Vor allem geeignet bei temperaturunempfindlichen und strukturell stabilen Zellchemien und -bauweisen wie LFP oder Na-Ion
  - – Schwierigkeiten bei Reparatur und Recycling durch Verklebungen



Ausblick

- Weiterentwicklung der Szenario-Analyse Software **VECTOR21**, zur Unterscheidung verschiedener Batterietechnologien
- Entwicklung von BEV-spezifischen Willingnes-to-Pay (WtP) Faktoren
- Analyse der wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen

Ausblick

- Ebenfalls Fokus auf weitere Elektrifizierungstechnologien im Transformationshub:

SCALE-UP
E-DRIVE

- Vermittlung von branchen-spezifischem Wissen u.a. durch [Transformations-Factsheets und Dashboards]

e-mobil BW (Hrsg.) (2023): Transformations-Factsheet "Technologische Trends E-Motor". https://doi.org/10.60563/5QDP-DC30

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Institut für Fahrzeugkonzepte

Samuel Hasselwander
samuel.hasselwander@dlr.de