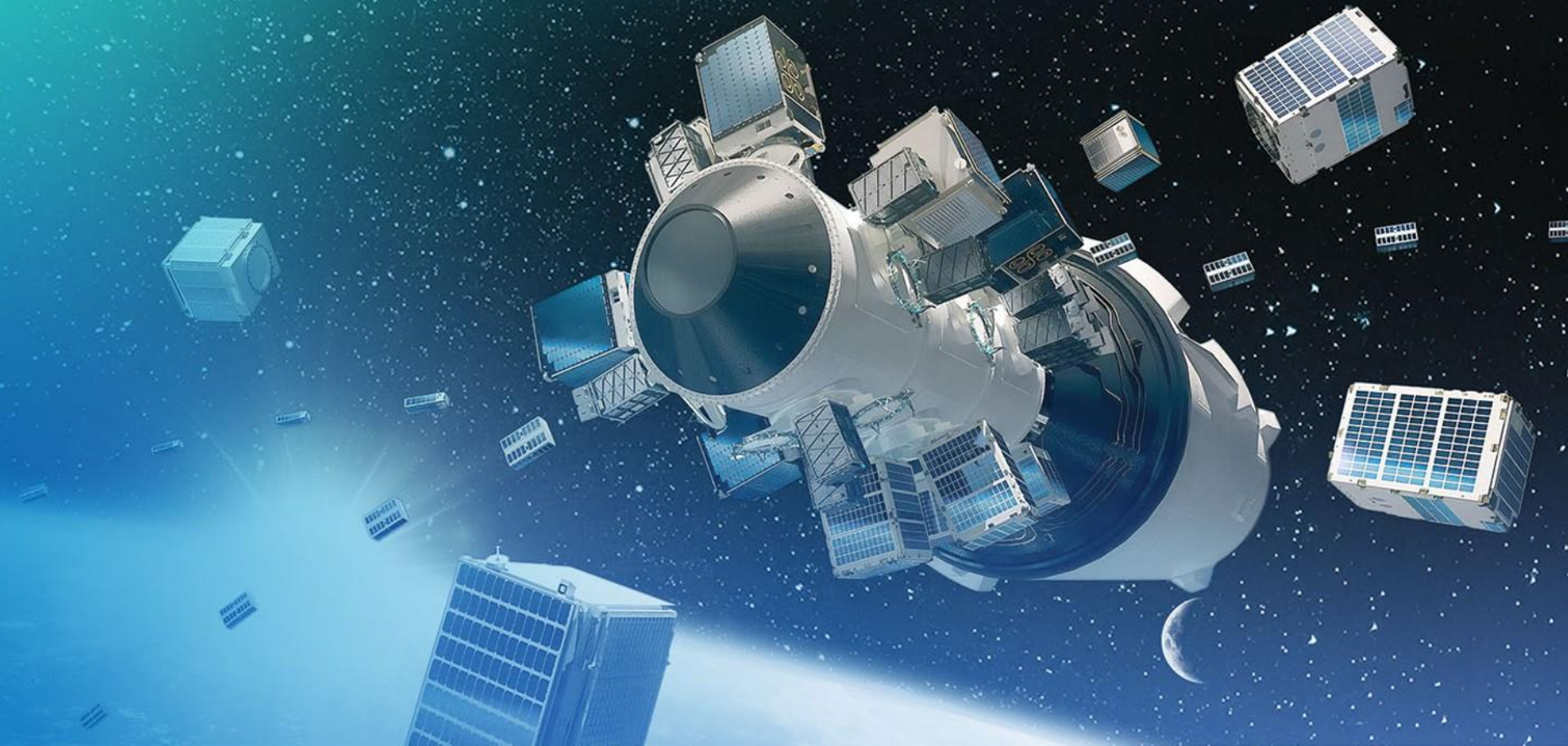




VECTOR21: Marktentwicklung Elektromobilität

Samuel Hasselwander, Forschungsprojekte des DLR zur Elektromobilität, Wessling bei München, 06. März 2026

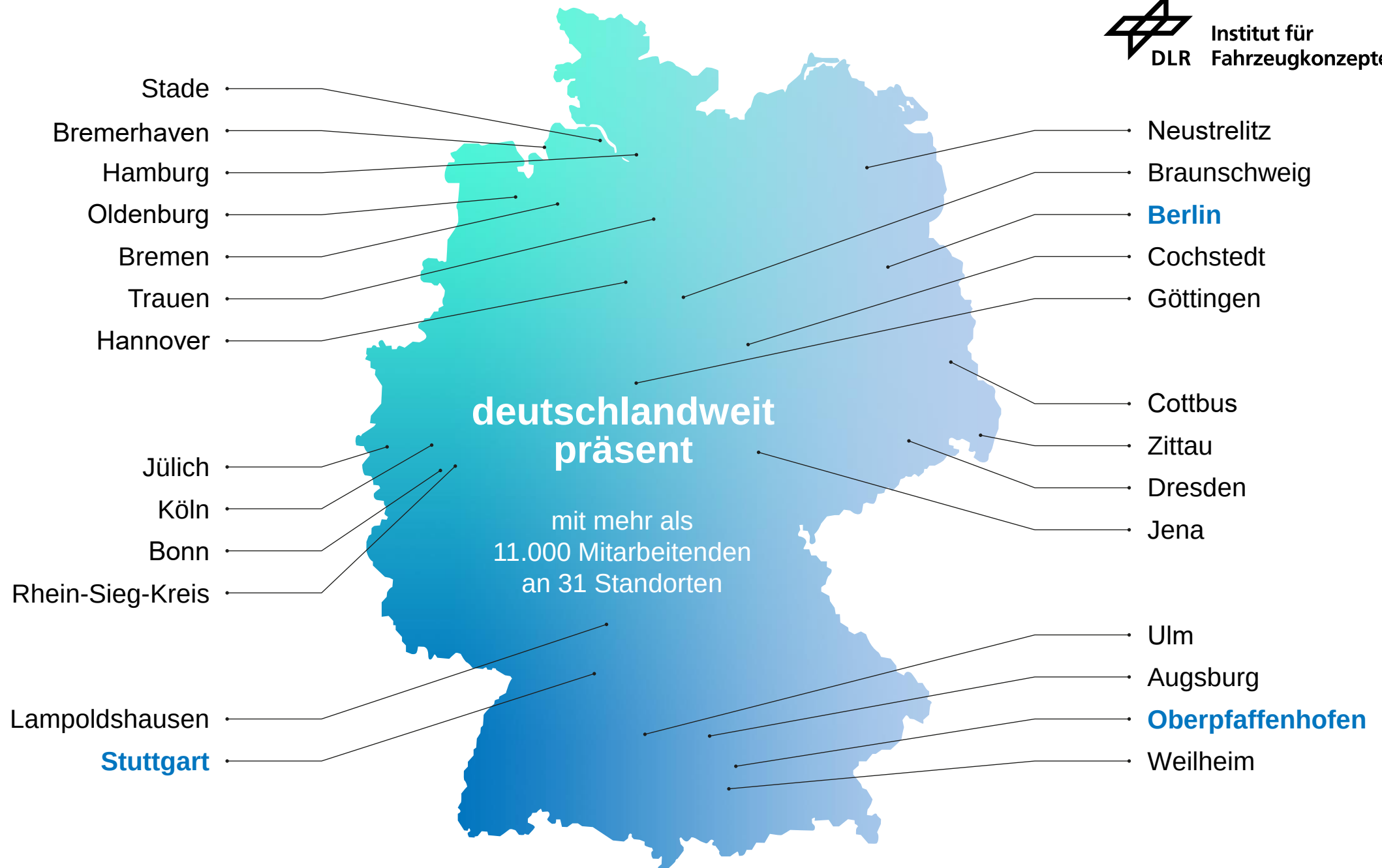
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)



Tätigkeitsfelder DLR

- Luftfahrt und Raumfahrt
- Energie und Verkehr
- Digitalisierung und Sicherheit
- Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten
- Projektträger zur Forschungsförderung





**Wir gestalten
die Mobilität der Zukunft –
nachhaltig, finanzierbar
und nutzerfreundlich**



Unsere Facts: Damit sorgen wir für Bewegung – seit 2002

160

multidisziplinär
Forschende

37%

Drittmittel

22 Mio.€

jährliches
Budget

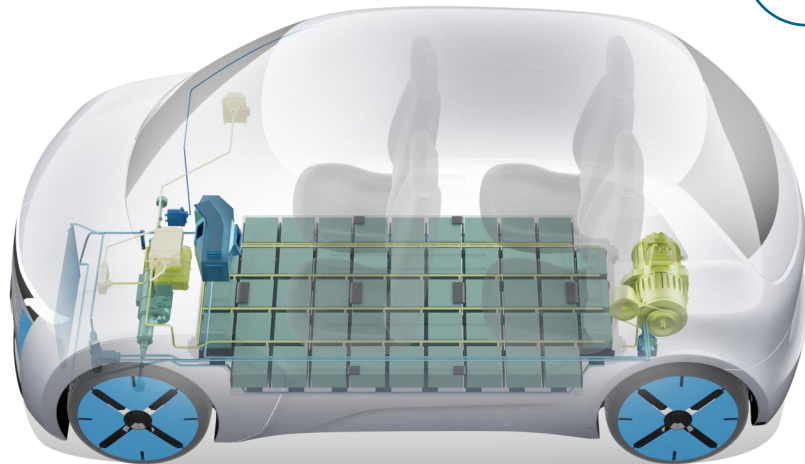
6

Innovationsfelder



Struktur

Hinweis: Teile der Folien sind in englischer Sprache.



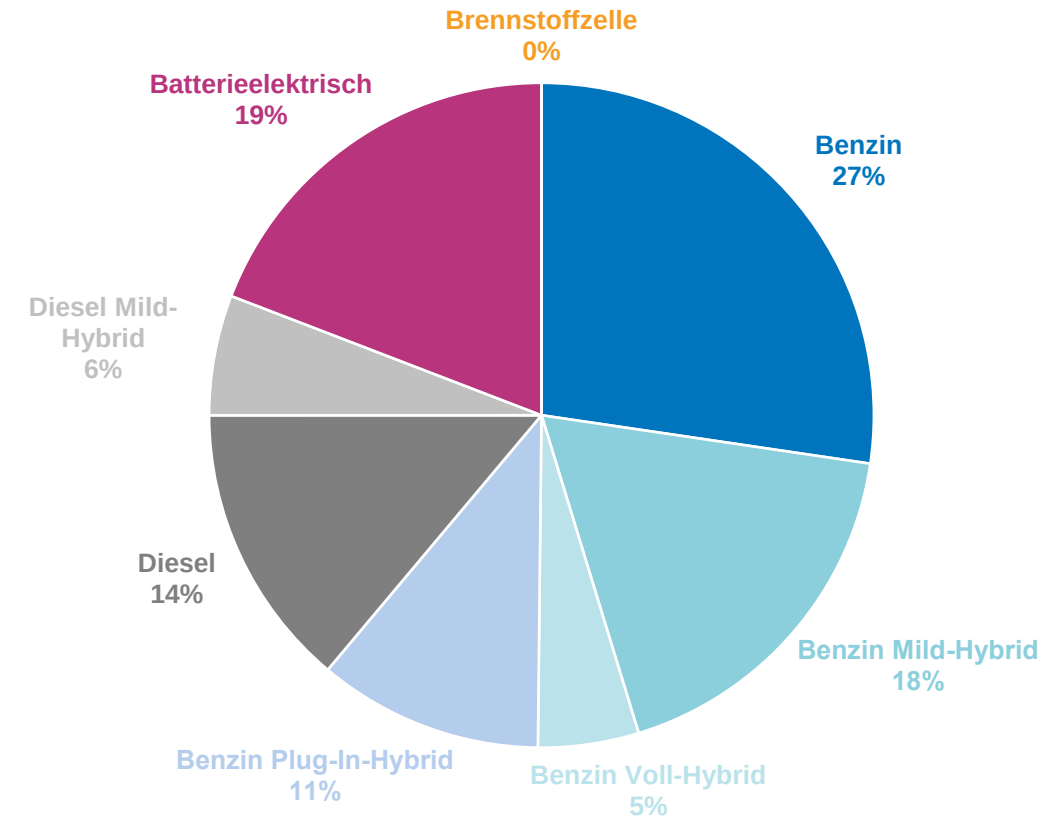
- Hintergrund und Forschungsfragen
- Technologien der Elektromobilität
- Fahrzeugtechnologieszenario-Modell
- Bidirektionales BEV-Szenario
- Zusammenfassung und Ausblick

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 von Pkw-Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2025



Eigene Darstellung auf Basis von KBA [1, 2] Daten.[1] Kraftfahrt-Bundesamt, Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach CO₂-Emissionen bzw. Kraftstoffverbrauch (FZ 8.4), Jahresergebnisse, Dezember 2025.[2] Kraftfahrt-Bundesamt, Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen mit alternativem Antrieb (FZ 28.1), Jahresergebnisse, Dezember 2025.

Hintergrund

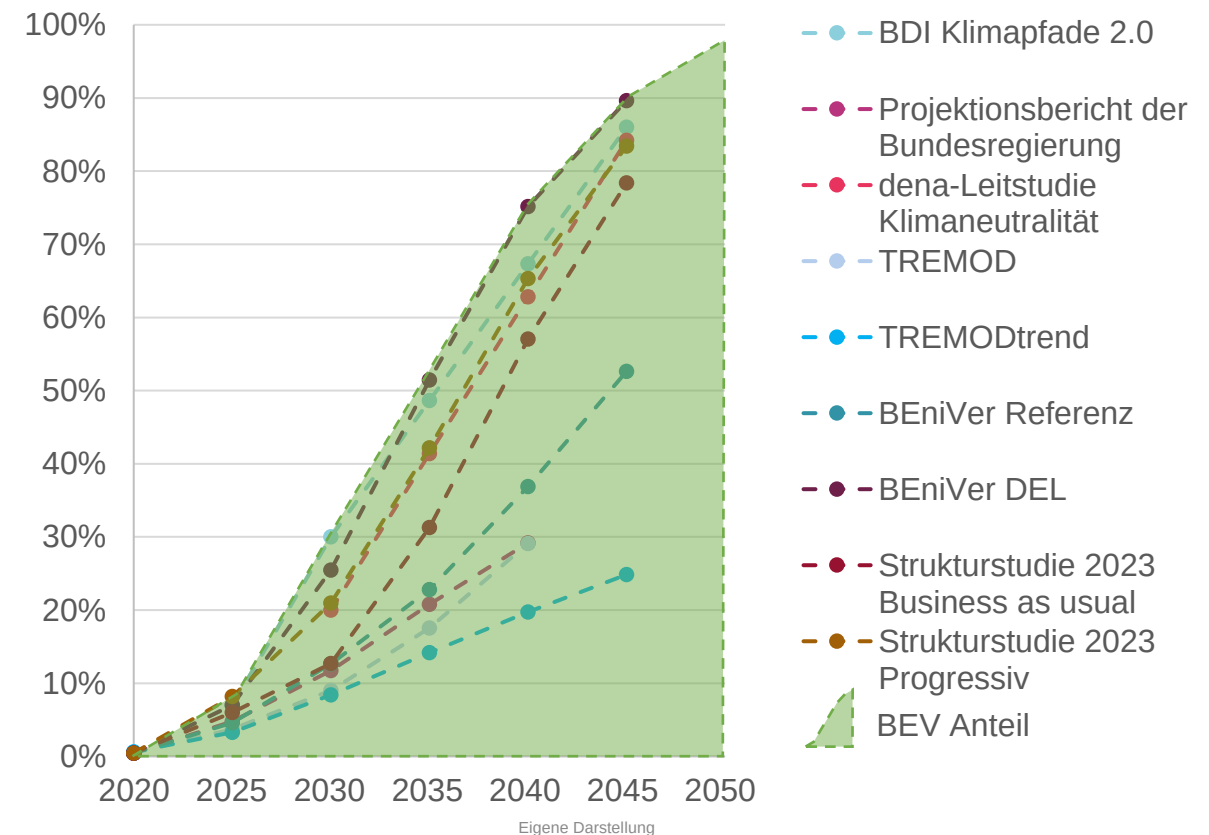
Aktuell

- 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 batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) erwartet**

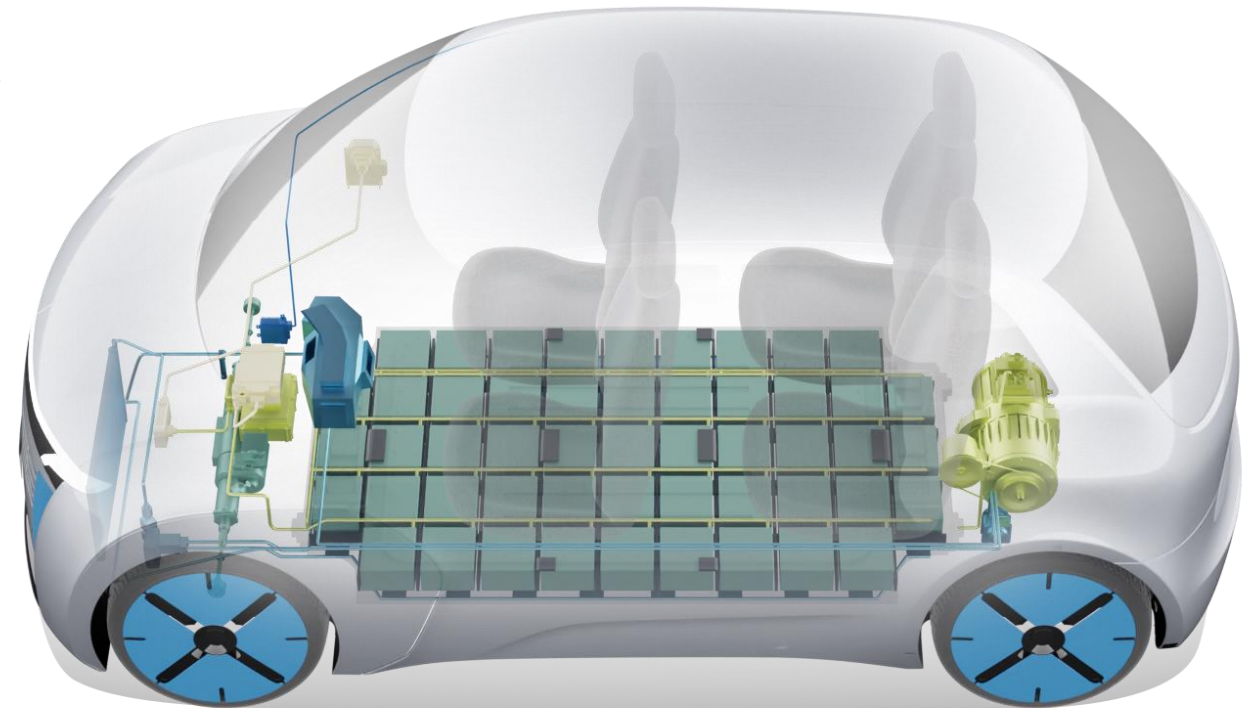
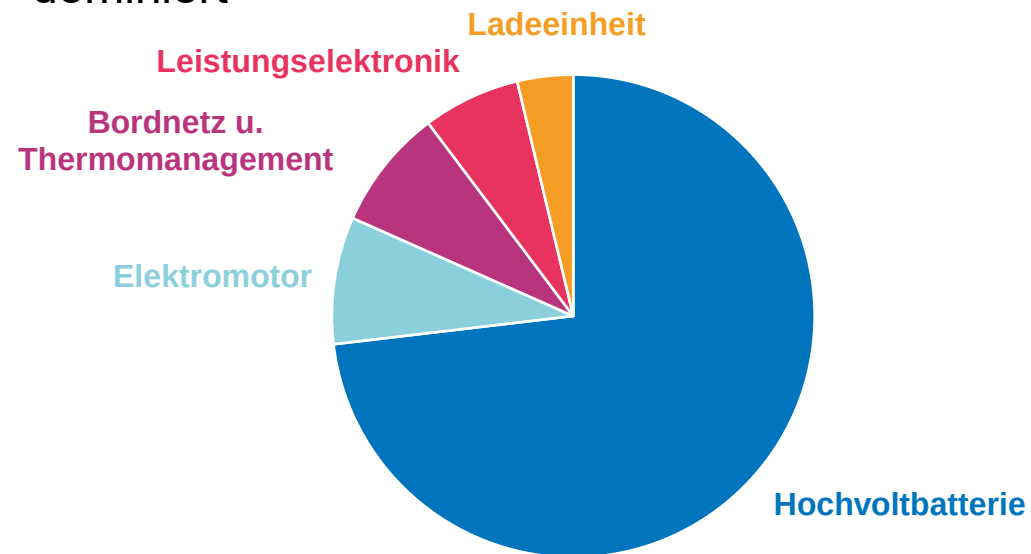
Anteil BEVs am deutschen Fahrzeugbestand nach verschiedenen Markt-Szenarien



Hintergrund

Elektrischer Antriebsstrang

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

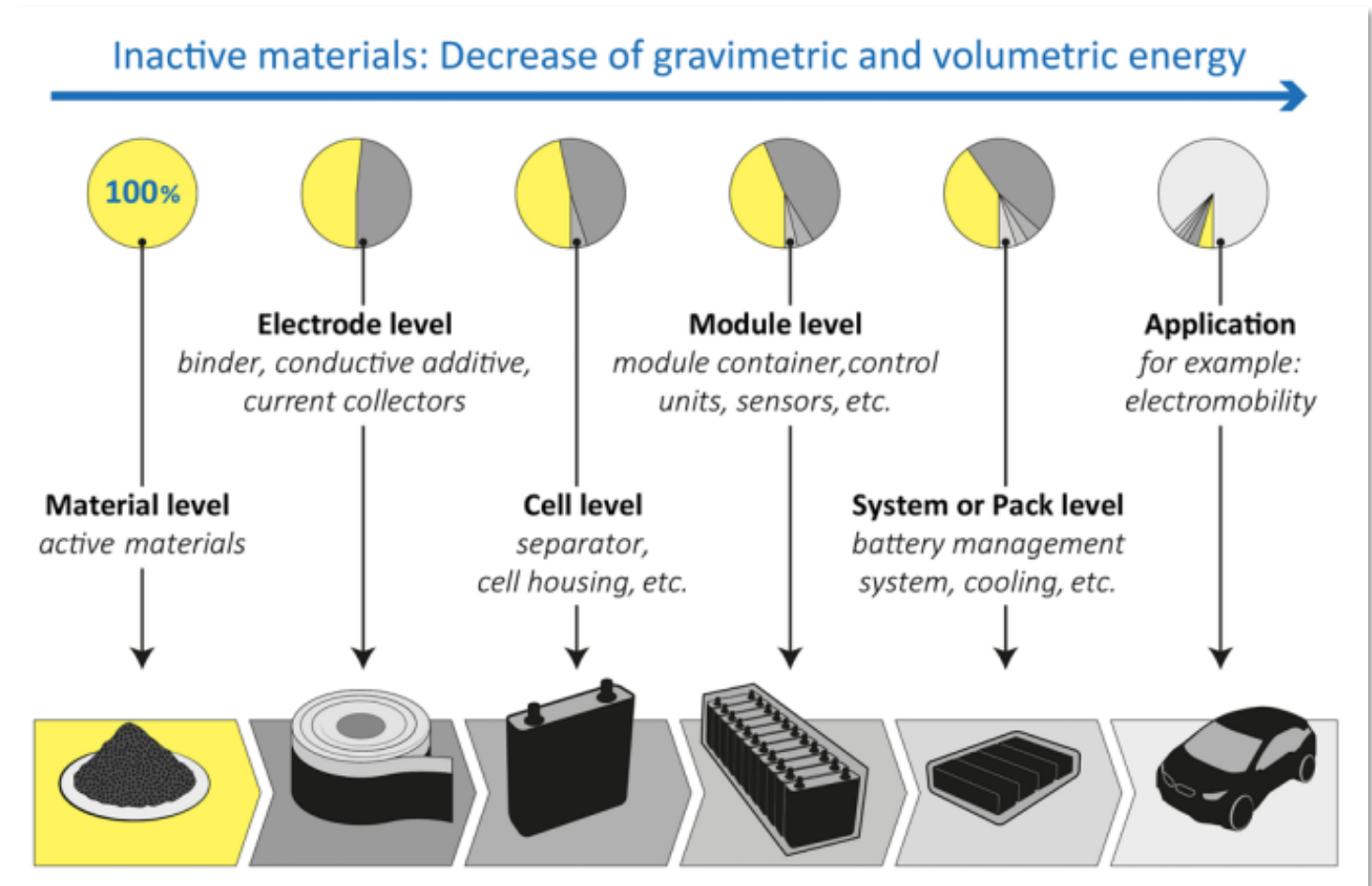


Angelehnt an e-mobil BW (2023): Strukturstudie BWe mobil 2023. Hg. v. e-mobil BW. Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobil_BW_Strukturstudie_BW_2023.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2023.

Hintergrund

Traktionsbatterie

- Die Energiedichte verringert sich mit jedem Produktionsschritt
- Inaktive Materialien „verdünnen“ die bereitgestellte Energie pro kg bzw. pro m³



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>.

Struktur



Nicht alle Batterien sind gleich

Zukünftig →

NMC

Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid

- Höchster aktueller Marktanteil von 64 %
- Hohe vol. Energiedichte (~600–740 Wh/l)
- Höhere Zellkosten (~80–100 €/kWh)
- Trend: hoher Nickel- und niedriger Kobaltanteil
- ~1000–1500 Lebenszyklen

LFP

Lithium-Eisenphosphat

- Günstige Alternative (~70–110 €/kWh)
- Geringere Energiedichte (~360–450 Wh/l)
- Stabile Chemie mit geringem Risiko zum thermischen Durchgehen
- Geringer wirtschaftlicher Anreiz für das Recycling
- ~2000–3500 Zyklen

So-Ion

Natrium-Ionen-Batterien

- Günstigere Alternative zu Lithium-Ionen
- Geringere volumetrische Energiedichte als LFP
- Hohe Ladegeschwindigkeiten & Stabilität → verlängerte Lebensdauer
- Geringe Kälteempfindlichkeit: behält bei -40 °C etwa 90 % Kapazität

SSB

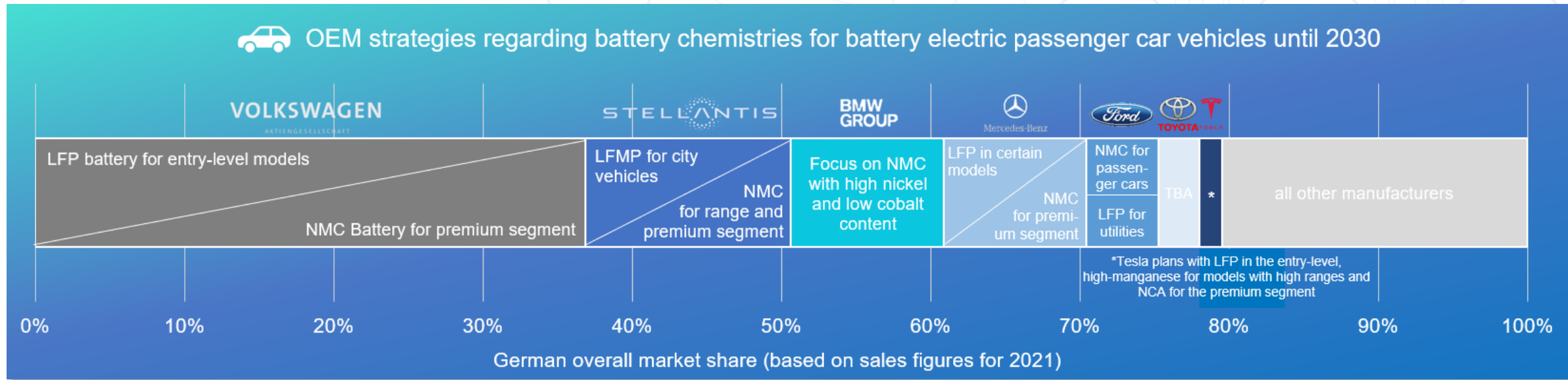
Festkörperbatterien

- Flüssiger Elektrolyt wird durch Feststoff ersetzt (Keramik, Polymer, usw.)
- Höhere Energiedichte durch Li-Metall-Anode
- Kein brennbarer Elektrolyt → geringeres Risiko zum thermischen Durchgehen
- Hersteller investieren erheblich in Start-ups, erste Straßentests laufen

Jede Chemie erfordert eine unterschiedliche Recycling-Infrastruktur und hat unterschiedliche Lebensdauern

Technologien für batterieelektrische Fahrzeuge: Neue Trends

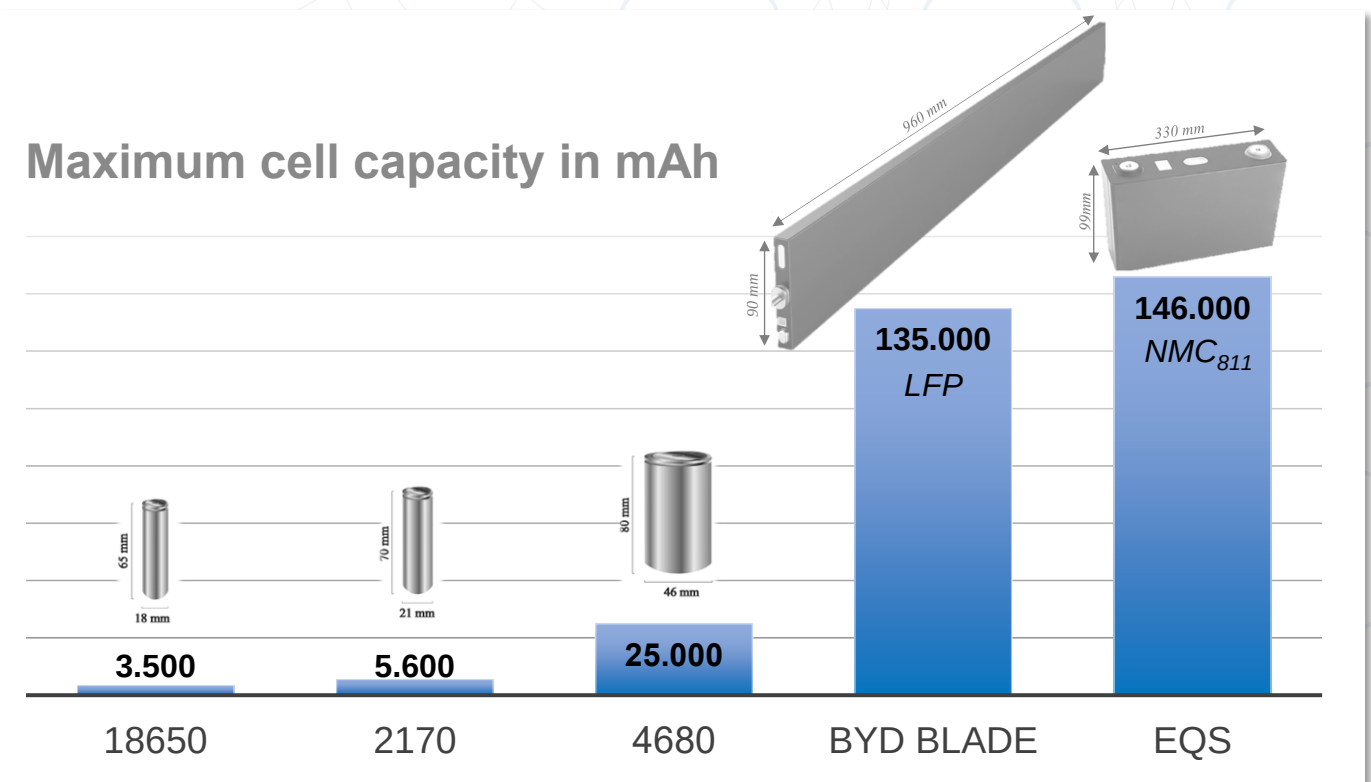
- Entwicklung neuer aktiver Materialien
 - LFP- und LMFP-Batterien für das Einstiegs- und Volumensegment
 - NMC-Batterien für das Segment mit hoher Reichweite und das Premiumsegment



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>

Technologien für batterieelektrische Fahrzeuge: Neue Trends

- Entwicklung neuer aktiver Materialien
- Skalierung einzelner Zellen
 - Tesla: von 18650 auf 4680
 - VW und Mercedes: prismatisch
 - BYD: lange prismatische Zelle
- Eliminierung von Modulen
→ “Cell-to-Pack”
- Batteriepack als strukturelles Bauteil
- Verbesserte Wärme- und Batteriemanagementsysteme
- Integrierte elektrische Antriebe mit oder ohne Permanentmagnete
- Siliziumkarbid- oder Galliumnitrid-Wechselrichter



Own illustration based on A2Mac1 (2023): Automotive Benchmarking: xEV Powertrain. Battery Cell Analysis.

Technologien für batterieelektrische Fahrzeuge: Bidirektionales Laden

- Fahrzeuge mit bidirektionalen Ladefunktionen stehen vor dem Markteintritt
 - Kompatible Infrastruktur ist nach wie vor hauptsächlich herstellerspezifisch
 - ISO 15118-20 ist verfügbar, aber weiterhin rechtliche und regulatorische Hürden

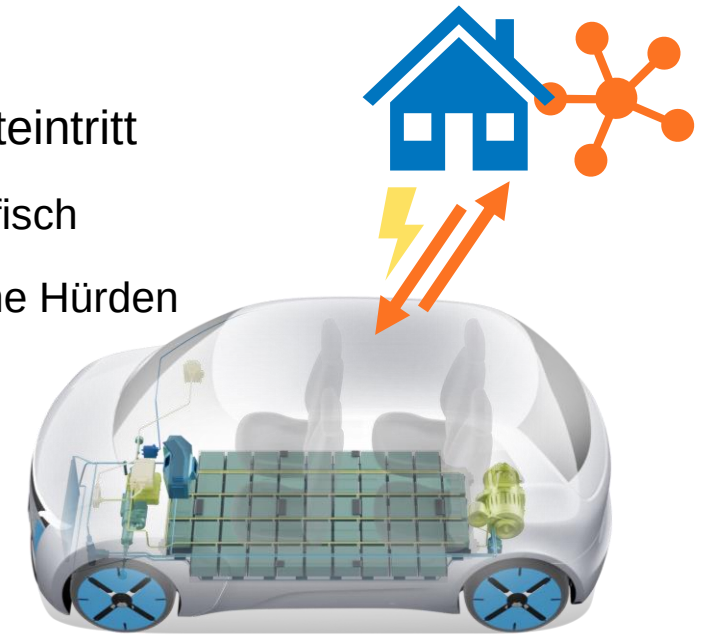
- Die Diskussion um AC- vs. DC-Wallboxen dauert an:

 Günstiger (bis zu 2.000 €), jedoch mit höheren Zertifizierungsanforderungen für den Fahrzeughersteller (vom Auto verkaufte Energie)

 Teurer (von 3.500 bis über 10.000 €), jedoch ohne zusätzliche Zertifizierungsanforderungen für den OEM

- Jährlichen Kosteneinsparungen variieren je nach Land und Wohnsituation

 Betriebskosteneinsparungen von bis zu 610 € pro Jahr sind möglich mit PV und einer Befreiung von Abgaben (FfE, 2024)



Struktur





Umwelteinflüsse

- Neutrale, wissenschaftliche Marktanalyse für politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger
- Detaillierte Bottom-up-Marktsimulation
- Definition externer Rahmenbedingungen

Ergebnisse:

- Markteinführung alternativer Antriebskonzepte für Pkw u. Lkw in Deutschland/Europa
- Wirtschaftliche Auswirkungen (Anzahl der Komponenten; Kostenentwicklung)
- Ökologische Auswirkungen

Angebot

Fahrzeuge

dynamische Entwicklung der verfügbaren Fahrzeuge/ Antriebstechnologien



Nutzenmaximierung

Diskrete Kaufentscheidung

Kundenagent wählt Fahrzeug, das seinen individuellen Nutzen maximiert

Optionen:

- lineare Nutzenfunktion
- nichtlineare Nutzenfunktion
- kostenbasierte Entscheidung

Nachfrage

Kundenagenten

mit verschiedenen

- sozioökonomischen Eigenschaften
- Verhaltensweisen
- Präferenzen



Ergebnisse

Wichtige Rahmenannahmen



Regulatorisch:

CO₂-Flottengrenzwerte gemäß der „Fit-for-55“-Verordnung und Strafen in Höhe von 95 € pro gCO₂/km bei Überschreitung



Energie:

Energiepreise basierend auf den Klimaneutralitätsszenarien von Ariadne



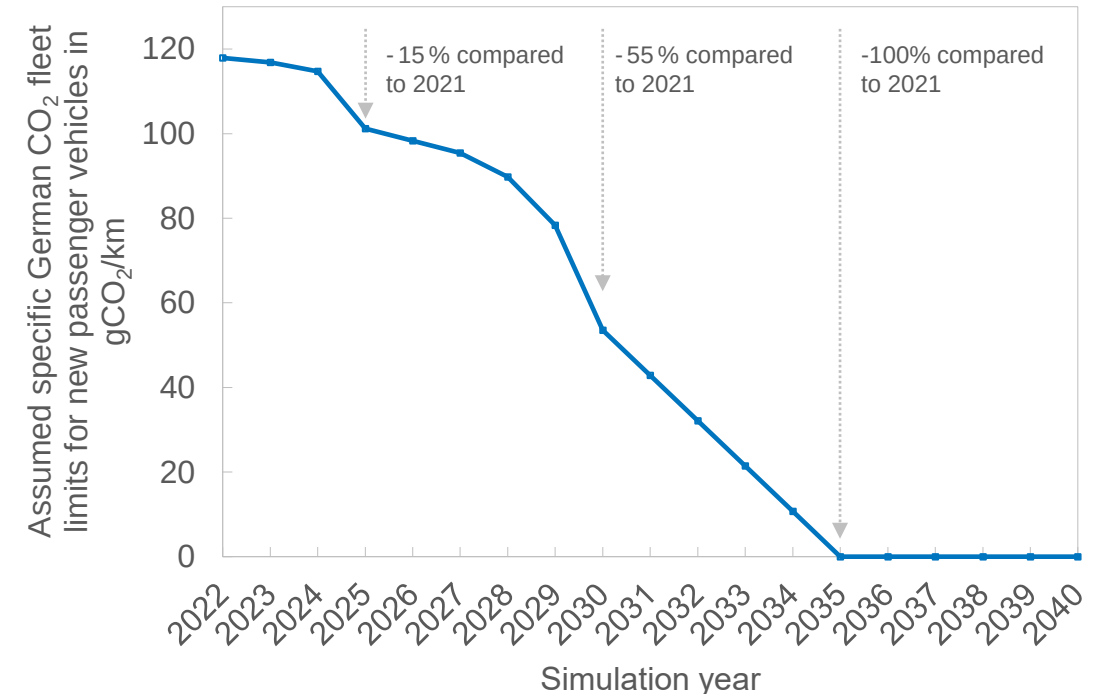
Infrastruktur:

Vergleich der Nutzeranforderungen der Agenten mit der definierten Verfügbarkeit der Infrastruktur pro Wohnsituation



Technologie:

Die Fahrzeugpreise werden bottom-up aus den marktabhängigen Komponentenkosten berechnet.



Council of the EU. First 'Fit for 55' proposal agreed: the EU strengthens targets for CO₂ emissions for new cars and vans. Accessed: Mar. 9, 2023. Available: <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2022/10/27/first-fit-for-55-proposal-agreed-the-eu-strengthens-targets-for-co2-emissions-for-new-cars-and-vans/>

Bottom-up-Fahrzeugberechnung

▪ Batteriesystem:

Umfassende Bottom-up-Kostenberechnung des Batteriesystems einschließlich aller relevanten Komponenten wie Zellen, Module, Gehäuse, BMS usw.

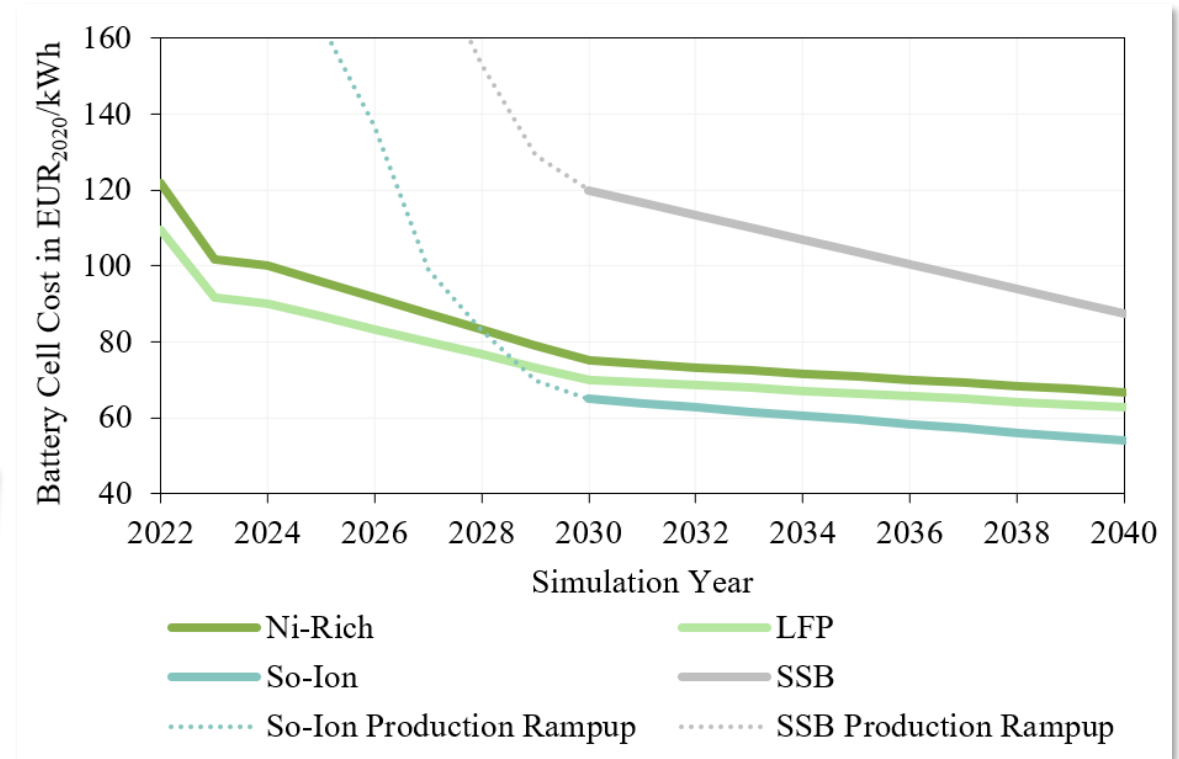
▪ Kosten für Batteriezellen:

Referenzwerte, abgeleitet aus eigener techno-ökonomischen Analyse auf der Grundlage von:

- Literaturrecherche
- Produktdatenblättern
- Experteninterviews
- Teardown-Berichten



Kostenentwicklung und Produktionsanlauf
auf Basis von BloombergNEF

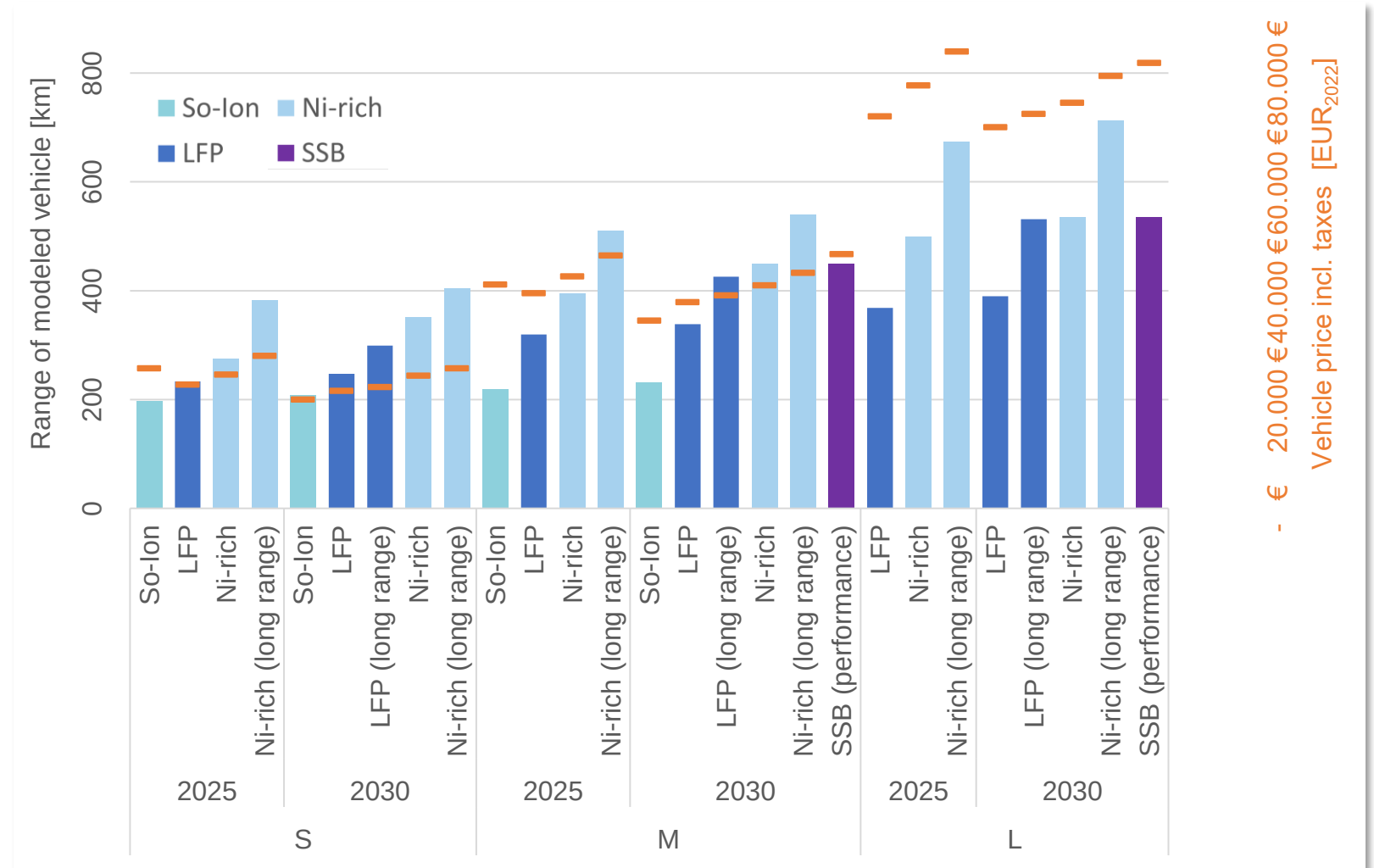


Hasselwander, S.; Meyer, M.; Österle, I. (2023): Techno-Economic Analysis of Different Battery Cell Chemistries for the Passenger Vehicle Market. Batteries 2023, 9, 379. <https://doi.org/10.3390/batteries9070379>

BloombergNEF (2022) Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh

Differenzierung der batterieelektrischen Fahrzeugmodelle

- Integration von mehr als 40 versch. BEV-Modellen, spezifiziert auf Grundlage unseres Bottom-up-Batteriemodells
- Gleicher Einbauraum pro Segment (klein, mittel, groß)
- Reichweite abgeleitet aus der physikalischen Batteriekapazität und dem Energieverbrauch gemäß WLTP-Fahrzyklus
- Einschließlich „Long Range“ Fahrzeugmodelle
- Alle BEV-Modelle mit zusätzlicher bidirektionaler Fahrzeugoption



Struktur



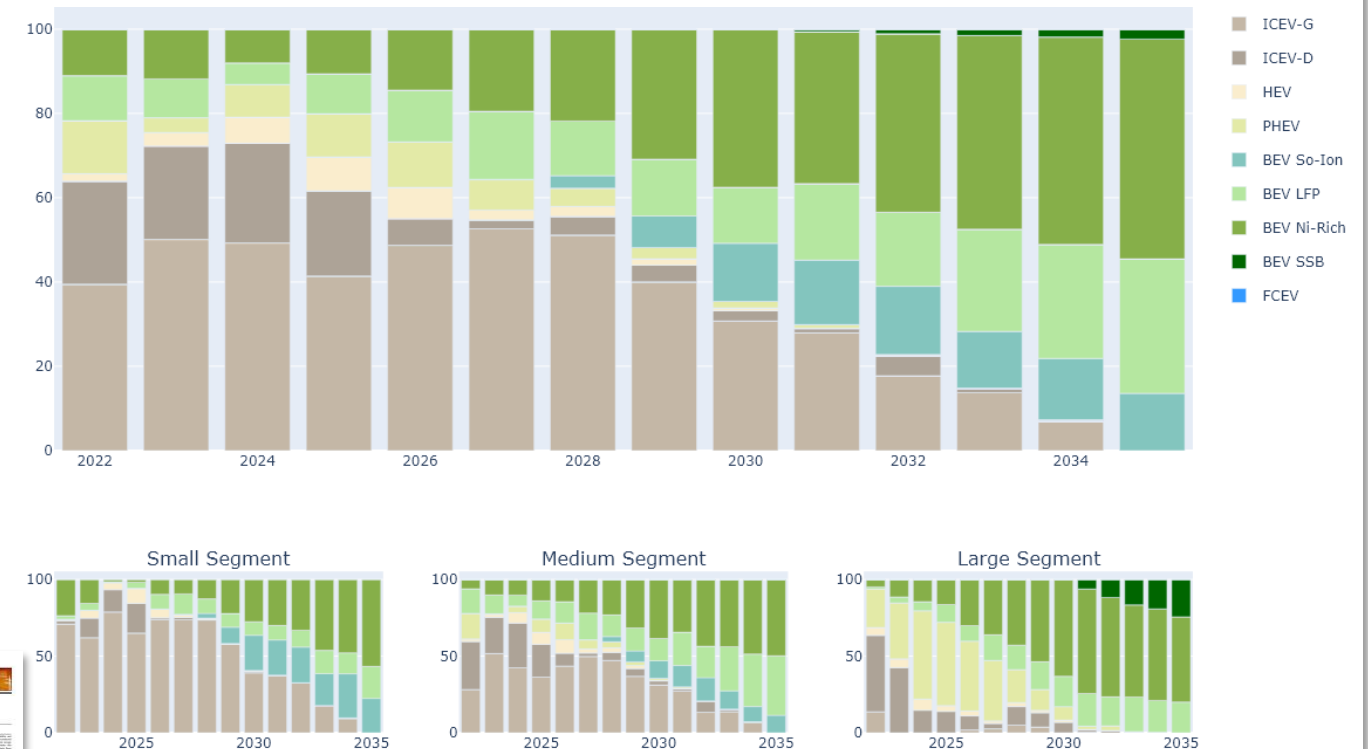
Marktpotenzial für zukünftige batterieelektrische Fahrzeuge

- Ni-reiche und LFP-Fahrzeugmodelle weisen relevantes Marktpotenzial auf
- LFP mit höherem kurzfristigen Marktpotenzial
- Streichung von Subventionen/Rabatten nach 2023 führt zu einem geringeren Marktpotenzial für BEVs
- So-Ion-Fahrzeuge verringern das Marktpotenzial von LFP nach Erreichen der Preisparität
- Kunden mit hohen Reichweitenanforderungen entscheiden sich zunächst für PHEVs und später für Ni-reiche Fahrzeugmodelle
- Hohe Batteriekosten beschränken SSBs auf das weniger preissensible Premiumsegment
- FCEVs zeigen bis 2035 kein signifikantes Marktpotenzial bis 2035



Market potential of new German passenger vehicles

VECTOR 21
VEHICLE TECHNOLOGY SCENARIO MODEL

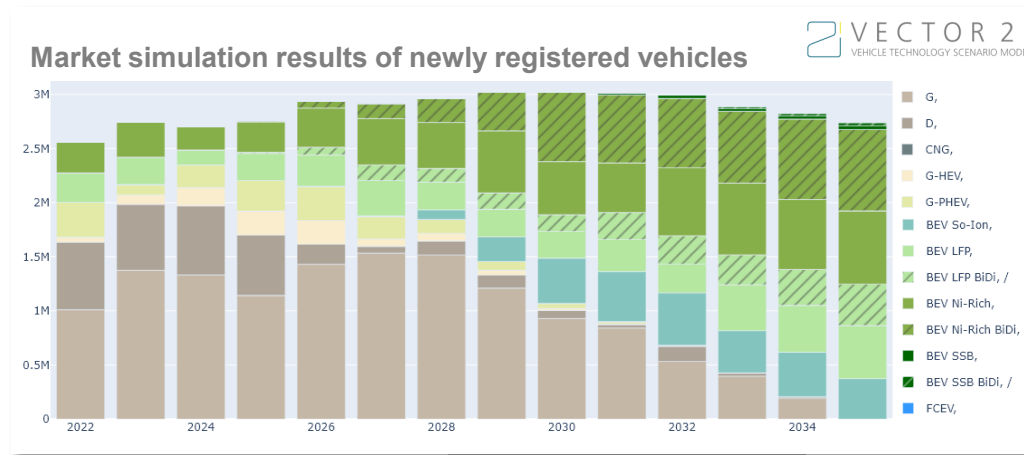
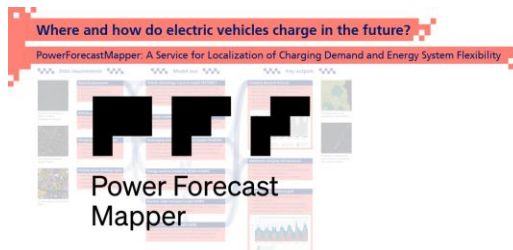


G = Gasoline, D = Diesel, CNG = Compressed Natural Gas, HEV = (Full) Hybrid Electric Vehicle, PHEV = Plug-In Hybrid Electric Vehicle, BEV = Battery Electric Vehicle, FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle, So-Ion = Sodium-Ion Battery, LFP = Lithium Ion Phosphate, Ni-Rich = Nickel-Rich Cell Chemistries, SSB = Solid-State-Batteries, BiDi = Bidirectional Charging

Updated simulated market potential based on the assumptions described: cost development in line with large-scale battery production, no limitations on the availability of battery cells, etc. // Based on: Hasselwander, Samuel und Senzeybek, Murat und Möring-Martínez, Gabriel (2025) Predictive modeling of vehicle-to-grid flexibility: A bottom-up approach demonstrated for a case-study in Germany. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 172 (111330). Elsevier. doi: [10.1016/j.ijepes.2025.111330](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111330). ISSN 0142-0615.

Marktpotenzial für bidirektionale BEVs

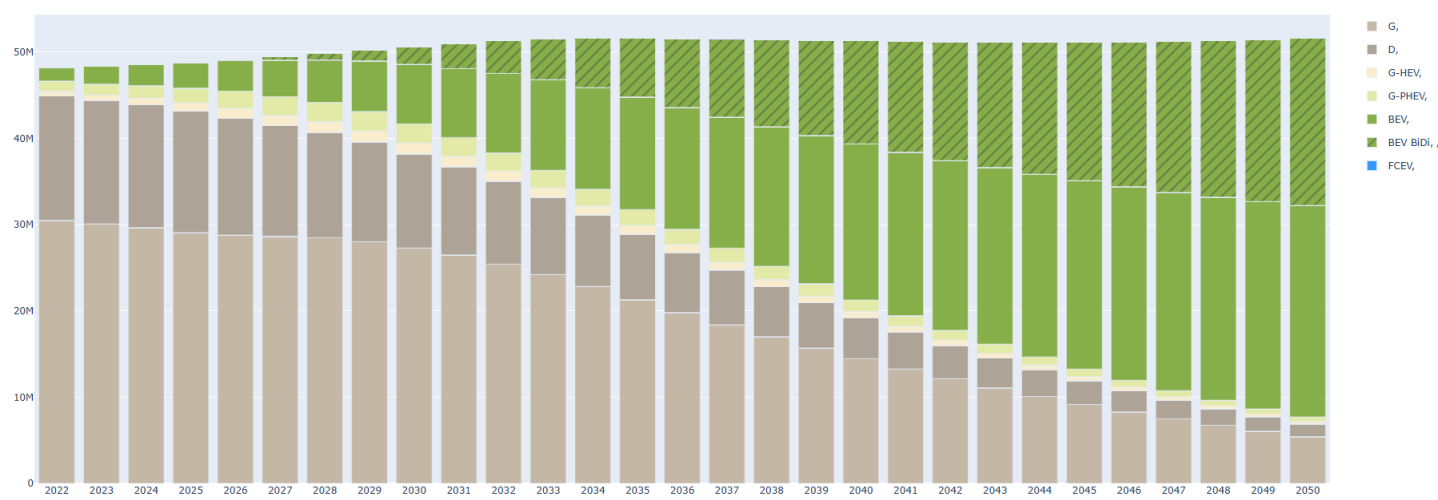
- Die Kaufentscheidung der Akteure umfasst auch bidirektionale BEVs
- Steigender BiDi-Marktanteil mit zunehmender Modellverfügbarkeit
- BiDi-Marktanteil im Jahr 2035: Bis zu 42 % aller neuen BEVs
- Resultierende Flotte bis 2045: Bis zu 16 Millionen Vehicle-to-Grid-fähige BEVs möglich
- Input für DLR-Service:



VECTOR21 BiDi scenario assumptions:

- + Assumed increased vehicle cost by 900 € for a wallbox with bidirectional charging
- + For bidirectional vehicles, operating cost savings of 150-270 € per year are assumed

Resulting German passenger vehicle fleet



G = Gasoline, D = Diesel, CNG = Compressed Natural Gas, HEV = (Full) Hybrid Electric Vehicle, PHEV = Plug-In Hybrid Electric Vehicle, BEV = Battery Electric Vehicle, FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle, So-Ion = Sodium-Ion Battery, LFP = Lithium Ion Phosphate, Ni-Rich = Nickel-Rich Cell Chemistries, SSB = Solid-State-Batteries, BiDi = Bidirectional Charging

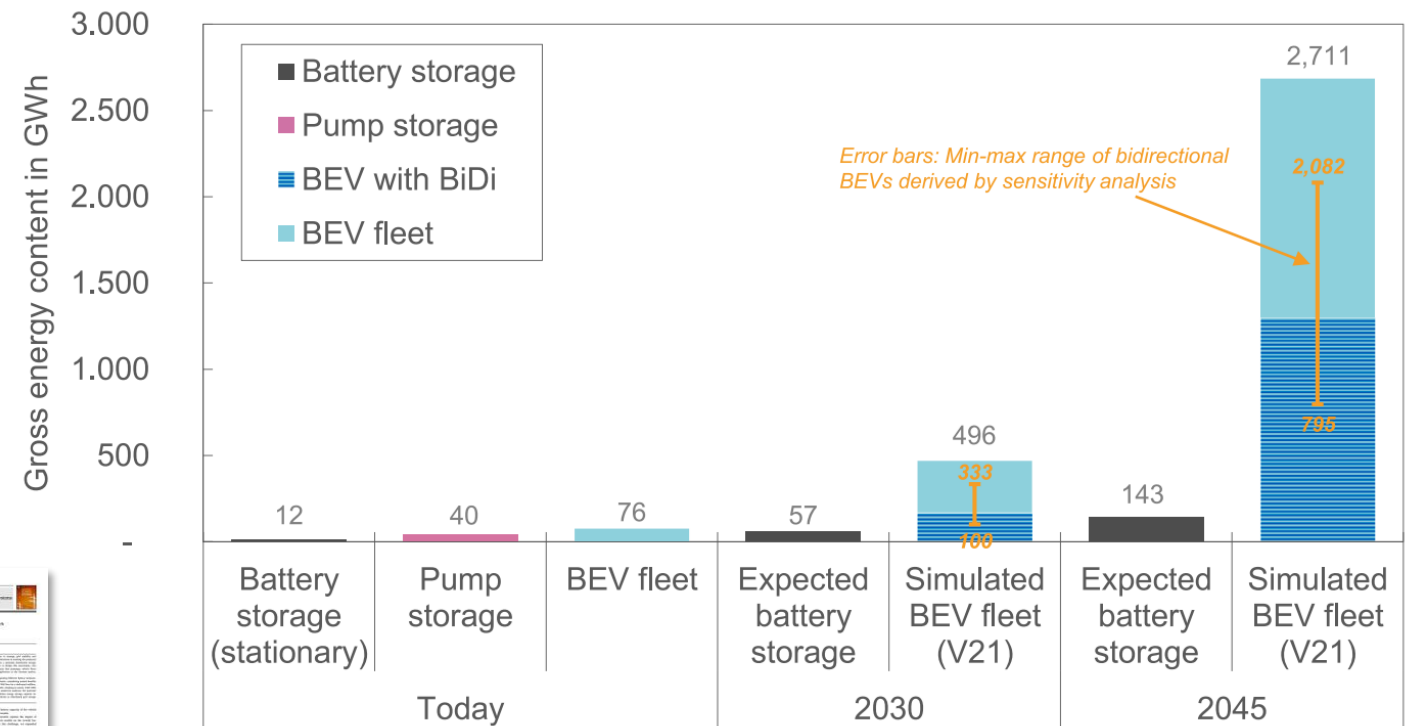
Updated simulated market potential based on the assumptions described: cost development in line with large-scale battery production, no limitations on the availability of battery cells, etc. // Based on: Hasselwander, Samuel und Senzeybek, Murat und Möring-Martínez, Gabriel (2025) Predictive modeling of vehicle-to-grid flexibility: A bottom-up approach demonstrated for a case-study in Germany. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 172 (111330). Elsevier. doi: [10.1016/j.ijepes.2025.111330](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111330). ISSN 0142-0615.

Bottom-up berechnetes Vehicle-to-Grid-Potenzial der deutschen Fahrzeugflotte

- Batteriekapazität aus Bottom-up-Modellierung der Käufe von über 40 Modellvarianten mit **VECTOR21**
- 2045: BEV BiDi-Batteriepotenzial **zwischen 800 und 2.100 GWh**
→ Mindestens 5x mehr als erwartete stationäre Batteriespeicher
- Allerdings: Der Fahrzeugbestand wird weiterhin hauptsächlich aus **konventionellen BEVs** bestehen

VECTOR21 BiDi sensitivity scenario assumptions:

- + Vehicle cost increasing ranging between 900 to 1800 € for a wallbox with bidirectional charging
- + Operating cost savings for bidirectional vehicles ranging between 75 to 610 € per year



Hasselwander, Samuel und Senzeybek, Murat und Möring-Martínez, Gabriel (2025) Predictive modeling of vehicle-to-grid flexibility: A bottom-up approach demonstrated for a case-study in Germany. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 172 (111330). Elsevier. doi: [10.1016/j.ijepes.2025.111330](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111330). ISSN 0142-0615.

Struktur



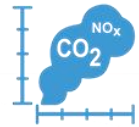
Zusammenfassung

- Fahrzeughersteller erweitern ihr Portfolio mit unterschiedlichen Zellchemien und optionaler Vehicle-to-Grid-Funktionalität
- Die Integration von LFP- und So-Ion-Batterien wird erwartet, insbesondere im Segment der Klein- und Kompaktfahrzeuge
- Bis 2035 könnten SSBs einen Marktanteil von bis zu 24% in der Oberklasse erreichen (bei Kosten von ca. 104 EUR/kWh)
- Der Anteil bidirektionaler Fahrzeuge an den Neuzulassungen liegt 2035 bei bis zu 42% (bei den gegebenen Betriebskosteneinsparungen von 150 bis 270 Euro/Jahr)
- Dies würde in über **16 Millionen Vehicle-to-Grid-fähigen BEVs** im Jahr 2045 resultieren
→ mit einer Gesamtbatteriekapazität von 1.100 GWh
- Marktdurchdringung von bidirektionalen Fahrzeugen hängt in hohem Maße von den angenommenen Wallbox-Kosten und den jährlichen Betriebskosteneinsparungen ab



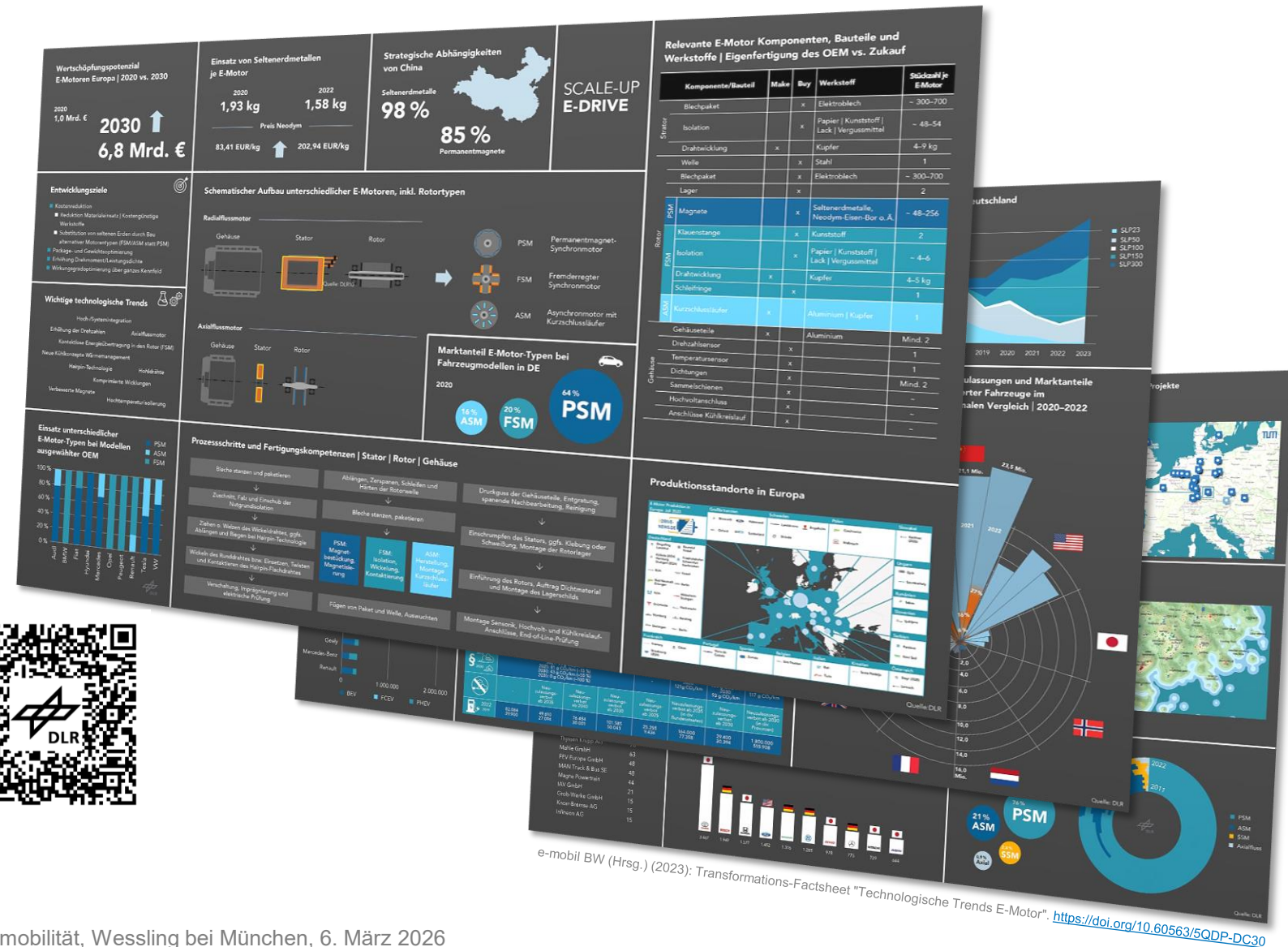
Ausblick

- Entwicklung von BEV-spezifischen Faktoren zur Zahlungsbereitschaft
- Dynamische Modellierung der Batteriealterung
- Analyse der wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen

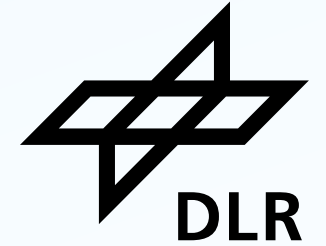


- # SCALE-UP E-DRIVE

- Vermittlung von branchenspezifischem Wissen u.a. durch Transformations-Factsheets und Dashboards



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



So erreichen Sie uns:



Samuel Hasselwander

samuel.hasselwander@dlr.de



Link zu den Folien:

