



STROM – Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Materialintensitäten der Elektromobilität

Arbeitspapier der STROMbegleitung
Zwischenergebnisse der Fahrzeugkonzept-Datenbank

Benjamin Frieske, Matthias Klötzke, Florian Mauser

*Dokument zur internen Verwendung für die STROM-Projekte,
„Schlüsseltechnologien der Elektromobilität“ des BMBF*

DLR Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR-FK)
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Februar 2013



| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | STROMbegleitung..... | 3 |
| 2 | Die Fahrzeugkonzept-Datenbank | 4 |
| 2.1 | ERFASSTE PARAMETER | 5 |
| 2.2 | BEISPIELHAFTE AUSWERTUNGEN | 6 |
| 2.2.1 | <i>Fahrzeug und Markt.....</i> | <i>6</i> |
| 2.2.2 | <i>Batterie.....</i> | <i>8</i> |
| 2.2.3 | <i>Elektrische Maschine</i> | <i>10</i> |
| 3 | Ausblick | 11 |

1 STROMbegleitung

Die „Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Materialintensitäten der Elektromobilität“ (im Folgenden „STROMbegleitung“ genannt) wird im Rahmen der im Jahr 2009 veröffentlichten BMBF-Förderbekanntmachung Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM) durchgeführt und dient der wissenschaftlichen Begleitung und Beforschung der im Rahmen dieser Bekanntmachung gestarteten F&E-Projekte. Das BMBF initiierte mit der Förderbekanntmachung STROM Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich Gesamtfahrzeugsysteme, Batterieentwicklung und -integration, Energiemanagement sowie der entsprechenden Werkstoff- und Materialforschung. STROM war, nach Fördervorhaben im Rahmen des Konjunkturpaketes II, die erste Maßnahme zur Umsetzung des „Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität“. Die Themen orientieren sich an Empfehlungen externer Experten und sind konsistent mit den Inhalten und Zielen der Arbeitsgruppen „Antriebstechnologie und Fahrzeugintegration“ und „Batterietechnologie“ der im Jahr 2010 ins Leben gerufenen „Nationalen Plattform Elektromobilität“ (NPE)¹.

Ziele der STROMbegleitung

Im Rahmen der STROMbegleitung werden unterschiedliche Ziele verfolgt, die zusammen ein umfassendes Bild über den Stand der Technik und die Potenziale vielversprechender technologischer Lösungen der Elektromobilität ermöglichen sollen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Identifikation und Analyse aktueller und zukünftiger Trends der Fahrzeugkonzept- und Technologieentwicklung sowie in der Einordnung der deutschen Aktivitäten in den internationalen Kontext. Im Detail orientiert sich die Begleitforschung an den folgenden Forschungsfragen:

- Welche generellen technologischen und marktlichen Trends zeichnen sich bei Schlüsseltechnologien der Elektromobilität sowie elektrifizierten Fahrzeugkonzepten ab?
- Was ist der State-of-the-art bei den Schlüsseltechnologien der Elektromobilität und welches zukünftige Entwicklungspotenzial besitzen diese?
- Wie tragen die im Rahmen der STROM-Ausschreibung geförderten Projekte zur Technologieentwicklung bei? Welche Herausforderungen, Grenzen und Hürden bestehen bei der Entwicklung spezieller technischer Lösungen?
- Welchen Stand hat die Technologieentwicklung im nationalen und internationalen Vergleich?
- Welche Förderschwerpunkte können in den verschiedenen Weltregionen identifiziert werden und welche Zielgruppen werden adressiert?
- Welche ökonomischen, ökologischen und technischen Auswirkungen haben die Schlüsseltechnologien auf das zukünftige Gesamtsystem Fahrzeug?
- Wie sehen die Materialintensitäten der Schlüsseltechnologien und Fahrzeugkonzepte aus?

Die wissenschaftlich fundierte Beantwortung der genannten Aspekte und Fragen wird es u.a. erlauben, das Förderprogramm STROM und die beforschten Schlüsseltechnologien in die internationalen Forschungsaktivitäten einzuordnen und Empfehlungen für die weitere Ausgestaltung staatlicher Förderprogramme und für andere politische Entscheidungen zu geben.

¹ Die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) hat zum Ziel, den Markteintritt innovativer Elektrofahrzeuge in systemischer, markt-orientierter und technologieoffener Form zu beschleunigen. Deutschland soll dabei bis zum Jahr 2020 Leitanbieter und Leitmarkt der Elektromobilität werden.

Aufgaben der Projektpartner zur STROMbegleitung

Das DLR Institut für Verkehrsforschung (DLR-VF, Berlin) bearbeitet ausgewählte Aspekte des Technologie-Monitorings und beteiligt sich am Arbeitspaket zu den Perspektiven der Elektromobilität (Roadmaps, Förderbindungen) in den USA. Das DLR Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR-FK, Stuttgart) ist hauptverantwortlich für die Durchführung des globalen Technologie-Monitorings und die Erstellung technologischer Trend- und Marktanalysen. Das Wuppertal Institut analysiert Förderprogramme, Perspektiven und Marktentwicklungen in den Regionen OECD-Amerika/USA, OECD-Asien/Japan, OECD-Europa/Europäische Union, China, Rest der Welt/Indien und erarbeitet zudem detaillierte Materialintensitätsanalysen zu Schlüsseltechnologien der Elektromobilität und zukünftigen Fahrzeugkonzepten.

2 Die Fahrzeugkonzept-Datenbank

Mit diesem Arbeitspapier wollen wir den STROM-Teilnehmern einige ausgewählte Zwischenergebnisse aus der Fahrzeugkonzept-Datenbank vorstellen und eine Vorstellung davon geben, welche Ergebnisse in Zukunft darstellbar sind und wie diese aussehen können.

Die Fahrzeugkonzept-Datenbank wird im Rahmen des Technologie-Monitorings vom DLR Institut für Fahrzeugkonzepte in Stuttgart entwickelt. Das Ziel besteht darin, alle elektrifizierten Antriebskonzepte der Jahre 2002-2012 zu erfassen und hinsichtlich detaillierter technischer Aspekte auszuwerten, um so Hinweise zu vergangenen und aktuellen Trends sowie dem Stand der Technik zu bekommen.

Der Fokus der Rechercharbeiten liegt dabei eng an den im Rahmen der einzelnen STROM-Projekte erforschten Technologien und umfasst so u.a. die elektrische Maschine, die Leistungselektronik, das Thermomanagement für E-Maschine und Leistungselektronik, Leichtbauweisen sowie Range-Extender-Konzepte. In Ergänzung zu diesen Technologiebereichen wird auch die Batterie als Schlüsseltechnologie der Elektromobilität im Detail erfasst. Weitere, allgemeine Angaben zu marktorientierten Aspekten und zum Fahrzeugkonzept an sich runden die Datenbank ab. Für jedes Fahrzeug sind so insgesamt über 200 Eingabemöglichkeiten definiert. Mild-Hybrid Electric Vehicles (HEV), Full-HEV, Plug-In-HEV, Range Extended Electric Vehicles (REEV) und Battery Electric Vehicles (BEV) werden in der Datenbank über verschiedene Weltregionen (z.B. Europa, USA, Asien) abgebildet. Ein Schwerpunkt der Analysen liegt dabei auch im Vergleich technischer Aspekte von Konzept- und Prototypfahrzeugen mit Serienfahrzeugen.

Der aktuelle Stand der Datenbank umfasst ca. 350 identifizierte Fahrzeuge, die in noch sehr unterschiedlichem Detaillierungsgrad abgebildet sind. Während bei einigen Fahrzeugen technische Details zu fast 100% abgebildet sind, erweist sich die Recherche bei anderen Fahrzeugen als schwierig, so dass nur 3-4% bislang erfasst werden konnten. Recherchen konzentrierten sich bislang v.a. auf die Bereiche „Fahrzeug und Markt“, „Elektrische Maschine“ und „Batterie“. Insgesamt sind zum jetzigen Zeitpunkt ca. 20% aller Eingabemöglichkeiten realisiert. Die Arbeiten im Rahmen des Technologie-Monitorings laufen kontinuierlich weiter bis September 2014. Updates zur Datenbank sollen Ihnen regelmäßig zur Verfügung gestellt werden.





2.1 Erfasste Parameter

Die erfassten Details zu den elektrifizierten Fahrzeugen lassen sich in verschiedene Bereiche und unterschiedliche Relevanz unterteilen. Beispielhaft sollen im Folgenden einige Parameter in den Bereichen „Fahrzeug und Markt“, „Elektrische Maschine“ und „Batterie“ aufgezeigt werden.

Im Bereich der allgemeinen Angaben zu **Fahrzeug und Markt** wurden 73 Eingabemöglichkeiten definiert, hiervon sind 20 Parameter priorisiert, z.B.:

- Hersteller (Bezeichnung)
- Fahrzeugmodell (Bezeichnung)
- Fahrzeugsegment (A-S)
- Zielmarkt (Weltregion)
- Zielkosten (Euro)
- Entwicklungsstatus des Fahrzeugs (z.B. Mock-Up, Konzept, Prototyp, Vorserie, Serie) Zeitpunkt der Vorstellung Konzeptfahrzeug (Jahr)
- Zeitpunkt der Einführung Serienfahrzeug (Jahr)
- Ort der Vorstellung/ Einführung (z.B. Automobilkonferenz)
- Grad der Elektrifizierung (Mild-, Voll-, Plug-In-HEV, REEV, BEV)
- Hybridarchitektur (z.B. parallel, seriell, kombiniert)
- Systemleistung/ elektrische Leistung (kW)
- V_{max} / V_{max} elektrisch (km/h)
- Reichweite/ Reichweite elektrisch (km)
- Beschleunigung 0-100km/h (s)
- Fahrzeugmasse (kg)
- Kraftstoffverbrauch (l/100km, NEFZ)
- CO₂ Emissionen (g/km)

Im Bereich „**Elektrische Maschine**“ sind je Fahrzeug 5 Motoren/ Generatoren erfassbar und somit insgesamt 183 Eingabemöglichkeiten realisiert, 18 Parameter je E-Maschine wurden priorisiert, z.B.:

- Bauart (z.B. Synchronmaschine, Asynchronmaschine)
- Einbauort (z.B. Getriebe, Radnabe)
- Erregungsart (z.B. fremderregt)
- Nennleistung (kW)
- Nenndrehmoment (Nm)
- Masse (kg)
- Thermomanagement (z.B. Flüssigkeits-/ Luftgekühlt)

Im Bereich „**Batterie**“ sind 2 Module erfassbar und somit insgesamt 95 Eingaben pro Fahrzeug möglich. 21 Parameter je Modul wurden priorisiert, z.B.:

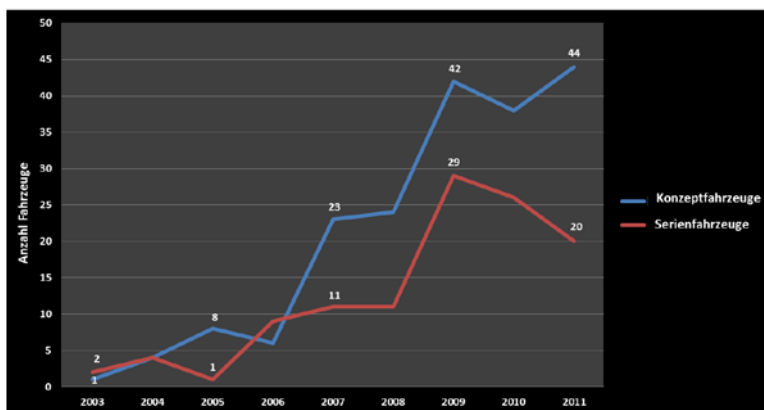
- Technologie (z.B. Lithium-Ionen, Nickel-Metall-Hydrid)
- Einbauort (z.B. Unterboden, Kofferraum)
- Spezifische Energie (Wh/kg)
- Spezifische Leistung (W/kg)
- Energiedichte (Wh/l)
- Kapazität (Ah)
- Spannung (V)
- Thermomanagement (z.B. Flüssigkeits-/ Luftgekühlt)

2.2 Beispielhafte Auswertungen

Die folgenden Abbildungen stellen Zwischenergebnisse im Februar 2013 dar. Sie sollen vor allem eine Vorstellung über mögliche zukünftige Auswertungen geben und die verschiedenen Dimensionen aufzeigen, anhand derer Trends und Stand der Technik dargestellt werden können. Der Fokus der textlichen Beschreibung liegt zunächst auf der reinen Darstellung, nicht auf einer Interpretation der Ergebnisse.

2.2.1 Fahrzeug und Markt

Vorgestellte Konzept- und Serienfahrzeuge 2003-2011

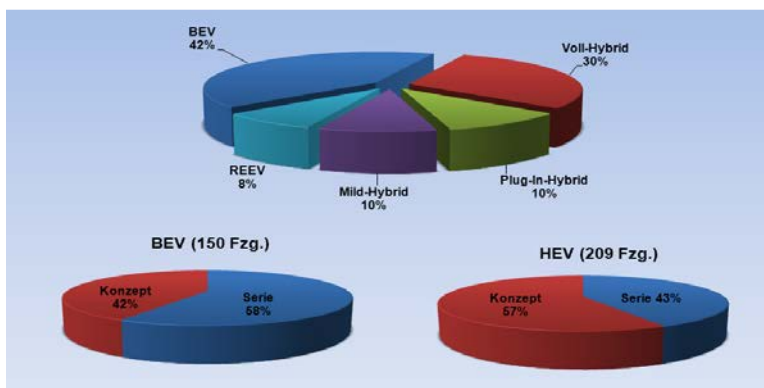


Zwischen den Jahren 2003 und 2011 nahm die Anzahl weltweit vorgestellter elektrifizierter Fahrzeugkonzepte insgesamt zu, wobei insbesondere ab dem Jahr 2006 Aktivitäten verstärkt zu beobachten sind. **Konzeptfahrzeuge** konnten dabei im genannten Zeitraum einen Anstieg von 2 auf 44 verzeichnen.

Mit einer zeitlichen Verzögerung von ca. 2 Jahren folgen HEV und BEV im **Serienstatus** diesem Trend bis zum Jahr 2009. Allerdings nahm

die Zahl dann kontinuierlich bis zum Jahr 2011 bis auf 20 Fahrzeuge ab, während der Trend bei Konzeptfahrzeugen nach einer Abnahme im Jahr 2010 wieder ansteigt.

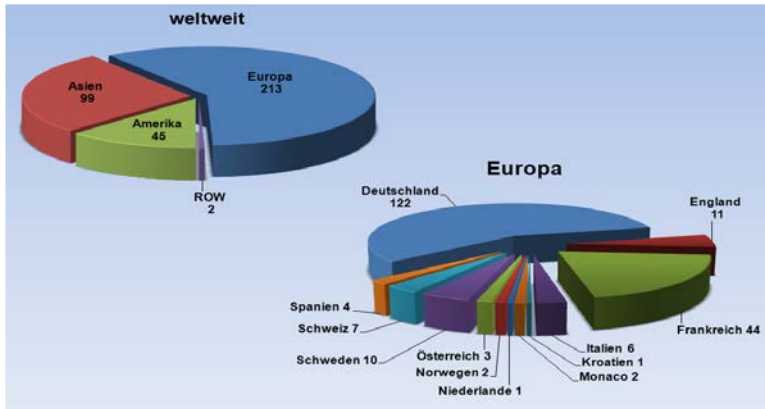
Gesamtanzahl elektrifizierter Fahrzeuge



Die Analyse aller erfassten elektrifizierten Fahrzeugkonzepte der letzten Jahre (2002-2012; 359) zeigt auf, dass insgesamt mehr Hybrid- (209, 58%) als batterieelektrische (150, 42%) Fahrzeuge entwickelt wurden. Bei den Hybridfahrzeugen hat der Voll-Hybrid mit 63 Fahrzeugen den größten Anteil (30%), gefolgt von Plug-In- und Mild-HEVs (je 10%) sowie REEVs (8%).

Weiterhin lässt sich beobachten, dass bei BEVs mehr Serien- als Konzeptfahrzeuge existieren, während bei den HEVs Fahrzeuge im Konzept- oder Prototypenstatus dominieren. Zu den Fahrzeugen im Serienstatus werden im Rahmen der Auswertung auch Kleinserien gezählt.

Gesamtanzahl elektrifizierter Fahrzeuge nach Weltregion

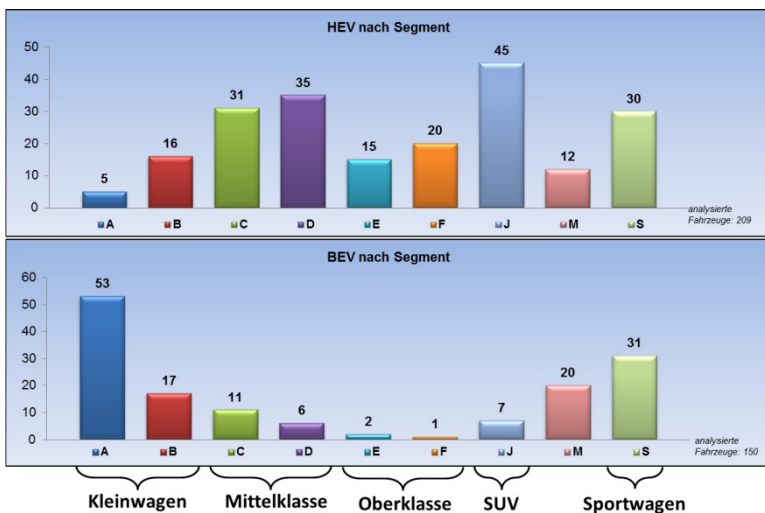


Europa dominiert im internationalen Vergleich bei der Anzahl an entwickelten Konzept- und Serienfahrzeugen. Über die Jahre 2002 bis 2012 wurden insgesamt 213 (60%) elektrifizierte Fahrzeuge in Europa entwickelt und vorgestellt bzw. in Serienstatus produziert. Asien folgt mit 99 elektrifizierten Fahrzeugen (27%), die USA mit 45 (13%).

Innerhalb der Weltregion Europa haben deutsche Hersteller mit 122 Fahrzeugen (57%) den mit Abstand größten Anteil, gefolgt von Frankreich (44 Fahrzeuge; 21%), England (11; 5%) und Schweden (10; 5%).

Innerhalb der Weltregion Europa haben deutsche Hersteller mit 122

Gesamtanzahl elektrifizierter Fahrzeuge nach Segment

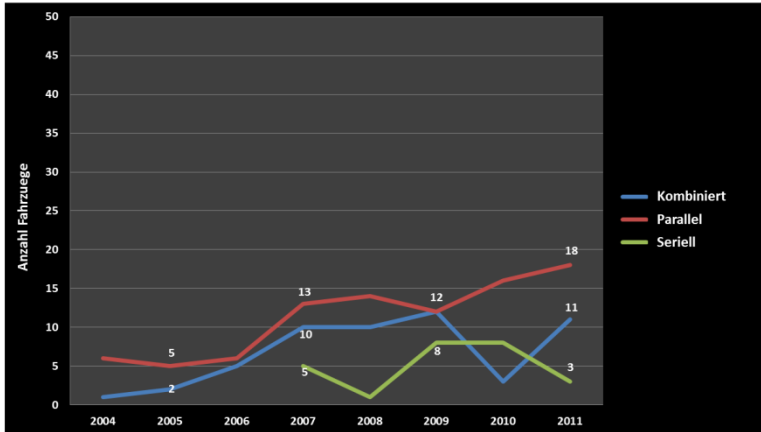


Die Analyse aller weltweit vorgestellten Konzept- und Serienfahrzeuge über die Jahre 2002-2012 ergibt eine eindeutige Fokussierung batterieelektrischer Fahrzeuge auf das Kleinwagensegment (70 Fahrzeuge, Segment A+B) sowie auf Sportwagen (31, Segment S). In der Oberklasse (Segmente E+F) sind insgesamt nur 3 Fahrzeuge vorgestellt worden, in der Mittelklasse (Segment C+D) 17.

Hybridelektrische Fahrzeuge sind verstärkt im Bereich Mittelklasse (66) sowie bei den SUVs (45, Segment J) anzufinden. Auch Oberklasse-Fahrzeuge (35) wurden über den betrachteten Zeitraum hybridisiert. Bei Sportwagen haben HEVs (30) eine ähnliche Relevanz wie BEVs (31).

Hybridelektrische Fahrzeuge sind verstärkt im Bereich Mittelklasse (66) sowie bei den SUVs (45, Segment J) anzufinden. Auch Oberklas-

HEV Antriebsarchitekturen 2004-2011



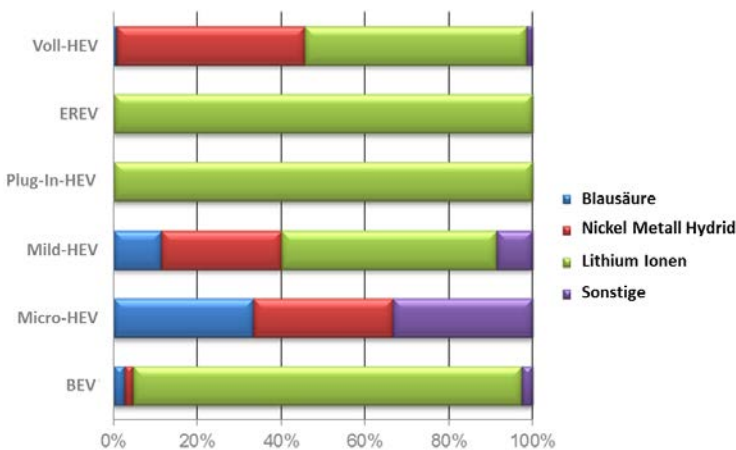
In den Jahren 2004 bis 2009 waren Hybridfahrzeuge mit **paralleler** und **kombinierter** Antriebsarchitektur jeweils ähnlich stark vertreten. Ab dem Jahr 2009 ist sowohl bei Konzept- als auch Serienfahrzeugen die parallele Architektur dominant, während die kombinierte insbesondere im Jahr 2010 an Relevanz verliert, sich aber ab dem Jahr 2011 wieder auf einem ähnlichen Niveau einpegelt.

Die grüne Linie steht für die **serielle** Antriebsarchitektur und spielt im

Vergleich bislang eine untergeordnete Rolle. Sie wird ausschließlich bei Range Extended Electric Vehicles (REEV) eingesetzt.

2.2.2 Batterie

Batterietechnologie und Elektrifizierungsgrad

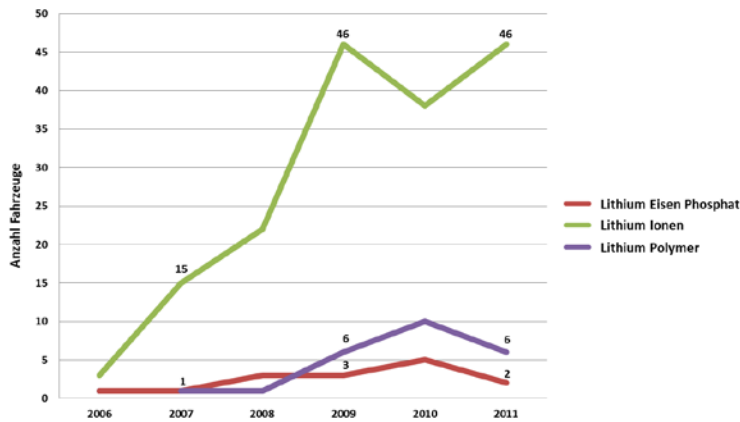


Lithium Ionen (Li-Ion) Batterien dominieren Range Extended Electric Vehicles und Plug-In-HEVs in Gänze. Auch bei batterieelektrischen Fahrzeugen ist der Fokus in der Batterietechnik klar zu erkennen: Fast 95% aller Konzept- und Serienfahrzeuge nutzt die Li-Ion Batterietechnik.

Voll-Hybride nutzen **Nickel Metall Hybrid (Ni-Mh)** und Li-Ion Batterien zu beinahe ausgeglichenen Anteilen von 50:50. Bei Mild-HEVs werden zusätzlich auch **Blausäure** sowie **sonstige Energiespeicher** eingesetzt,

wie z.B. Supercapacitors oder Schwungradspeicher. Bei Micro-HEVs ist der Einsatz von Li-Ion Batterien nicht erkennbar, dafür sind die Anteile von Blausäure und sonstigen Batterietechnologien im Vergleich höher.

Genutzte Batterietechnologie 2006-2011

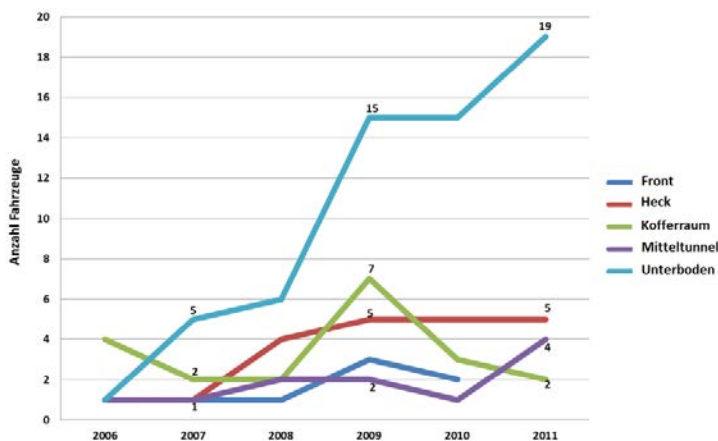


Über den Zeitraum der Jahre 2006 bis 2011 ist ein starker Anstieg im Einsatz von **Li-Ion Batterien** zu erkennen. Während im Jahr 2006 nur 3 Konzept- und Serienfahrzeuge Batterien des Typs nutzten, waren es im Jahr 2011 insgesamt 46 neu vorgestellte Fahrzeuge.

Der Einsatz von **Lithium Eisen Phosphat Batterien** blieb in einem Bereich von 1 bis 3 Fahrzeugen über die Jahre relativ gering, aber konstant. **Lithium Polymer Batterien** nahmen

ab dem Jahr 2008 zu und erreichten einen Spitzenwert von 10 Fahrzeugen im Jahr 2010.

Batterie-Einbauorte 2006-2011

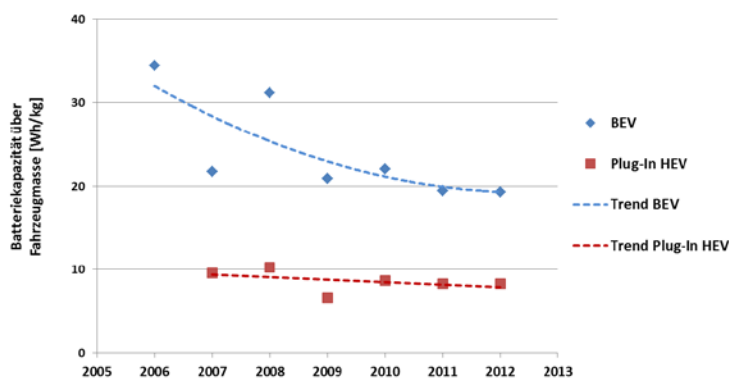


Betrachtet man den Einbauort der Batterie im elektrifizierten Fahrzeug, so ist der **Unterboden** die mit Abstand bevorzugte Stelle. Im Jahr 2011 folgt auf den Unterboden der Bereich des **Fahrzeugecks** mit 5 Fahrzeugen sowie der **Mittelunnel** mit 4 Nennungen, der vom Jahr 2010 an einen starken Anstieg verzeichnen kann.

Der **Kofferraum** als Einbauort verliert ab dem Jahr 2009 kontinuierlich an Bedeutung. Der **vordere Bereich des Fahrzeugs** spielt bis zum Jahr 2010

eine untergeordnete Rolle und wird im Jahr 2011 nicht mehr genutzt.

Batteriekapazität im Verhältnis zur Fahrzeugmasse 2006-2012

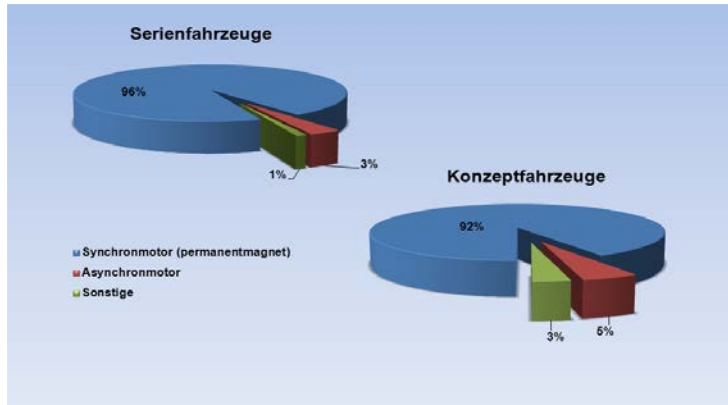


Im Zeitraum von 2006 bis 2012 konnte bei **BEVs** ein deutlicher Trend für die Batteriekapazität pro Fahrzeugmasse beobachtet werden. Trotz Schwankungen zwischen 2006 und 2009 nimmt die Batteriekapazität pro Fahrzeugmasse im Mittel klar ab und pendelt sich bei einem Wert von ca. 19 Wh/kg_{Fahrzeugmasse} ein, was in etwa 200 km Reichweite im NEFZ entspricht. Auch bei **Plug-In HEVs** ist ein Trend zu erkennen: Hier zeigt

sich ein annähernd konstanter Wert von ca. 9 Wh/kg_{Fahrzeugmasse} über die Jahre.

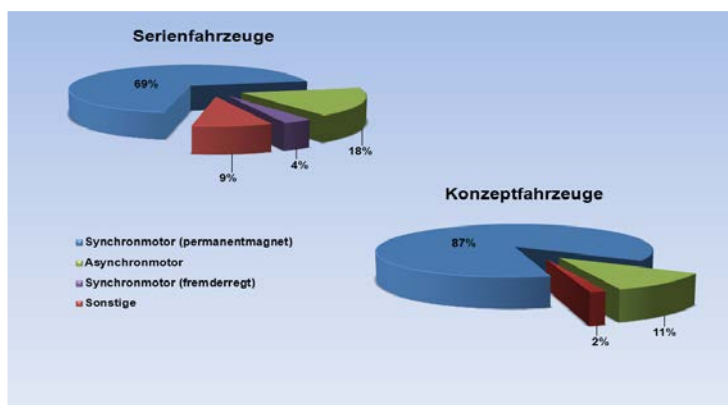
2.2.3 Elektrische Maschine

Verwendete Bauarten HEV



Bei den elektrischen Maschinen konnte für die untersuchten elektrifizierten Fahrzeuge ein deutliches Übergewicht für permanent-erregte Maschinen identifiziert werden. Bei HEV Konzeptfahrzeugen gab es zwar auch noch einen merklichen Anteil an anderen Bauarten, allerdings haben auch hier die permanent-erregten Maschinen einen Anteil von über 90%.

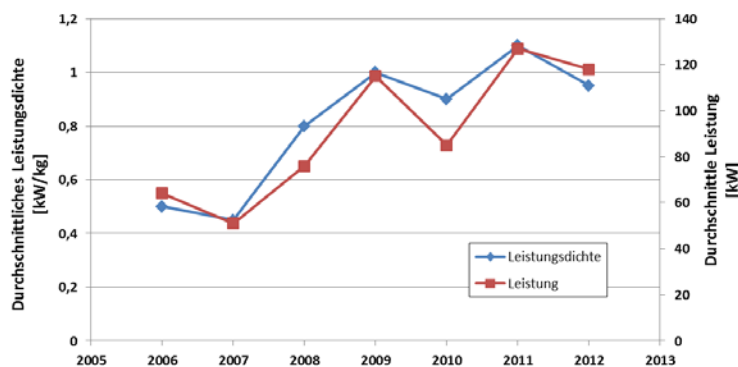
Verwendete Bauarten BEV



Bei batterieelektrischen Fahrzeugen sind deutlich mehr andere Bauarten zu verzeichnen. Knapp ein Fünftel der Serienfahrzeuge ist mit einem Asynchronmotor ausgerüstet. Aber auch hier entfällt mehr als zwei Drittel der Motoren auf permanent-erregte Maschinen.

Im Gegensatz zu den HEVs ist bei BEVs der Anteil von permanent-erregten Maschinen bei Konzeptfahrzeugen sogar noch höher als bei Serienfahrzeugen. Hier sind annähernd 90% der Fahrzeuge mit einem permanent-erregten Motor ausgestattet. Gut 10% entfallen auf Asynchronmotoren. Andere Bauarten spielen hier fast keine Rolle.

Entwicklung der Leistungsdichte



Für die durchschnittliche **Leistungsdichte** der elektrischen Maschinen zeigen die Analysen eine deutliche Steigerung von 0,5 kW/kg auf zwischenzeitlich über 1 kW/kg im Jahr 2011 auf.

Gleichzeitig wurde allerdings auch die durchschnittliche **Leistung** der elektrischen Maschinen gesteigert. Hierbei ist wohl eher ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Leistung der elektrischen Maschine und dem dazugehörigen Leistungsdichte als technische Weiterentwicklungen für den Verlauf verantwortlich.

3 Ausblick

Die vorgestellten Auswertungen aus der Fahrzeugkonzept-Datenbank sind als Zwischenergebnisse zu verstehen und sollen insbesondere dazu dienen, den STROM-Teilnehmern eine Vorstellung von Inhalt und Darstellungsform möglicher zukünftiger Auswertungen zu geben. Die STROM-Begleitforschung wird Feedback in der Ausgestaltung weiterer Auswertungen gerne aufgreifen, um Ergebnisse an die spezifischen Wünsche und Vorstellungen der STROM-Teilnehmer wo möglich anzupassen.

Recherchearbeiten zur Befüllung der Datenbank fokussierten bislang v.a. auf die Bereiche „Fahrzeug und Markt“, „Elektrische Maschine“ und „Batterie“. Die Recherchen werden in der weiteren Projektlaufzeit intensiviert und auf die Technologiebereiche „Leistungselektronik“, „Thermomanagement“ und „Leichtbau“ ausgedehnt, um so bis September 2014 aussagekräftige Ergebnisse zu Entwicklungstrends und Stand der Technik zu bekommen.

Der jetzige Stand erlaubt Darstellungen insbesondere in den allgemeinen Bereichen, die sich auf einen Vergleich von Fahrzeugkonzepten an sich und auf den Markt beziehen. Auf detaillierte, Technologie- und Parameter-bezogene Darstellungen wird nun und im Laufe der weiteren Arbeiten fokussiert. Die Zwischenergebnisse zu „Batteriekapazität im Verhältnis zu Fahrzeugmasse“ und „Entwicklung der Leistungsdichte E-Maschine“ geben einen guten Eindruck, was hier in Zukunft im Rahmen des Technologie-Monitorings angestrebt wird.

Sehr gerne würden wir Ihren direkten Input zu weiteren – möglicherweise spezifischen oder für Sie besonders relevanten – Auswertungen erfahren und für die Ausgestaltung der weiteren Arbeiten nutzen. Die STROM-Begleitforschung freut sich jederzeit sehr über Hinweise hierzu.

Bei Fragen und/ oder Anregungen wenden Sie sich jederzeit gerne an

Benjamin Frieske

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Fahrzeugkonzepte | Fahrzeugsysteme und Technologiebewertung
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 6862 623
Telefax +49 (0)711 6862 258
Benjamin.Frieske@dlr.de

und

Matthias Klötzke

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Fahrzeugkonzepte | Fahrzeugsysteme und Technologiebewertung
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 6862 8092
Telefax +49 (0)711 6862 258
Matthias.Kloetzke@dlr.de