



## 2 Einführung

### 2.1 Einleitung

Die größte technologische Herausforderung, vor der die Automobilindustrie weltweit steht, ist die langfristige Sicherung einer umweltverträglichen, individuellen Mobilität. Elektrofahrzeuge sind hier die aktuell vielversprechendste Option, da sie das gesamte Spektrum erneuerbarer Energien nutzen und insbesondere in urbanen Ballungsräumen die lokalen Schadstoff- und Lärmemissionen senken. Die deutsche Automobilindustrie hat auf Grund ihrer technologischen Kompetenz die Chance, sich langfristig einen weltweiten Spitzenplatz auf diesem hoch-kompetitiven Zukunftsmarkt zu sichern. Jetzt kommt es darauf an, rasch energieeffiziente, ressourcenschonende und leistungsfähige Elektrofahrzeuge zu entwickeln und diese in signifikanten Stückzahlen in den Markt einzuführen. Deutschland soll ein Leitmarkt für Elektromobilität werden.

Die Elektromobilität ist außerdem ein wichtiger Baustein für künftige Mobilitätskonzepte. Sie begrenzt die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen, falls der benötigte Strom mittel- bis langfristig ausschließlich aus erneuerbaren Energien erzeugt wird. Vor der breiten Einführung von Elektrofahrzeugen in den Markt sind allerdings noch wesentliche technologische Hürden zu überwinden. Es reicht nicht, in einem herkömmlichen Fahrzeug den Tank durch eine Batterie und den Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor zu ersetzen. Hier müssen völlig neue Fahrzeugkonzepte entwickelt werden. Ziel ist die Entwicklung eines energieeffizienten, sicheren und komfortablen Fahrzeugs, das letztlich für den Kunden attraktiv ist. Das Projekt e performance bündelte die Kompetenzen aus Industrie, Hochschulen und Forschungseinrichtungen und baute nachhaltige Kooperationen auf.

### 2.2 Motivation und übergeordnete Aufgabenstellung des Projekts

Im Oktober 2009 startete e performance als unternehmensübergreifende Denkfabrik seine Arbeit, in dem das Thema Elektromobilität ganzheitlich untersucht wurde. Das Kernteam bestand aus der AUDI AG, der Audi Electronics Venture GmbH der Robert Bosch GmbH, der Bosch Engineering GmbH und der RWTH Aachen. Das Team wurde von zahlreichen Hochschul- und Industriepartnern unterstützt, wie z.B. der TU München, der TU Dresden, der TU Ilmenau, der LU Hannover, verschiedenen Fraunhofer Gesellschaften, der fka mbH und der ForTISS GmbH. Im Rahmen des Projekts wurde ein modularer Systembaukasten für elektrifizierte Fahrzeuge entwickelt, mit dem sich verschiedene Fahrzeugarchitekturen und Antriebsarten darstellen lassen. Dabei wurde ein breites Spektrum an Technologien aus den Bereichen Antrieb, Energiespeicher, Thermomanagement, Vernetzung und Benutzerführung be-



trachtet. Ein wesentliches Ziel war dabei, eine möglichst hohe Reichweite bei möglichst niedrigen Kosten zu erreichen.

Alle Neuentwicklungen und Lösungsansätze wurden im Hinblick auf die Umsetzung in einem Demonstratorfahrzeug ausgelegt, um daraus Erkenntnisse für einen möglichen Einsatz in Serienprodukten ableiten zu können. Als Demonstrator dieser Technologien entstand ein Forschungsfahrzeug auf Basis des Audi R8.

Der besondere Fokus des Projekts lag auf der Zusammenarbeit von Studierenden und Absolventen mit erfahrenen Experten in Unternehmen – eine kreative Mischung zur Lösung der technischen Herausforderungen. Die Bilanz kann sich sehen lassen: 20 Diplom- und 50 Doktorarbeiten sowie zahlreiche Studien- und Bachelorarbeiten entstanden im Projekt. Die Ergebnisse stellen z.B. für die bei Audi laufenden Fahrzeugprojekte einen wichtigen Erfahrungsschatz dar. Aufgrund der Fülle und Relevanz dieser Erkenntnisse wurden bereits Folgeprojekte abgeleitet. Das Forschungsprojekt endete am 31.03.2013.

Die folgende Abschlussdokumentation beschreibt die im Projekt untersuchten Technologien und stellt die Ergebnisse dar.

### **2.3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Im Verkehrssektor gilt der Straßenverkehr als einer der Hauptverursacher für CO<sub>2</sub>-Emissionen und somit für eine unkontrollierbare Beeinflussung des Klimas. Gleichzeitig gilt es, die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern mittel- bis langfristig zu verringern und dadurch die Voraussetzungen für ein nachhaltiges Wirtschaftswachstum zu schaffen. Damit wächst die Verantwortung der Automobilindustrie, den Flottenverbrauch ihrer Fahrzeuge zu reduzieren. Weiterhin ergeben sich veränderte gesellschaftliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen aus den klimapolitischen Zielen der Bundesregierung, internationalen Verpflichtungen wie dem Kyoto Protokoll sowie den Vorgaben der EU-Kommission.

Hybrid- und batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge können in Zukunft wesentlich dazu beitragen, den Kohlendioxid-Ausstoß im Straßenverkehr zu verringern und die Klimaschutzziele Deutschlands umzusetzen. Die Bundesregierung hat deshalb das Ziel festgelegt, Deutschland zu einem Leitmarkt für Elektromobilität zu machen und dabei bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf die Straßen zu bringen [2.1].

Insbesondere soll durch eine ganzheitliche Strategie bei der Förderung der Elektromobilität sichergestellt werden, dass zukünftig ein hoher Anteil der damit verbundenen Wertschöpfung in Deutschland erbracht wird und somit die Voraussetzungen für



die Entstehung neuer Arbeitsplätze geschaffen werden. Die Bundesregierung hat sich deshalb das Ziel gesetzt, im Rahmen des “Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität” die erforderlichen Maßnahmen im Bereich der Elektromobilität von der Grundlagenforschung, über die technische Entwicklung von Fahrzeugkomponenten und der zugehörigen Infrastruktur, bis hin zur Marktvorbereitung abzustimmen und koordiniert umzusetzen [2.3].

Das Projekt e performance fügte sich in diese Strategie ein, indem verschiedene Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs entwickelt, validiert und in einer gemeinsamen Fahrzeugplattform integriert wurden. Wesentliches Merkmal des Projekts war der durchgängige Ansatz zur Entwicklung der Komponenten von der Konzeption bis hin zur Erprobung unter praktischen Bedingungen, so dass die Ergebnisse des Projekts unmittelbar in die Serienentwicklung einfließen können.

Zugleich war die Partnerschaft zwischen Audi, Bosch, weiteren Wirtschaftsunternehmen und Universitäten ein entscheidender Schritt zugunsten des Standorts Deutschland. Mit dem Forschungsprojekt e performance konnte wesentliches Know-how erarbeitet werden, das sich in der Frühphase der Elektromobilität zum wichtigen Vorteil im Wettbewerb der Automobilnationen entwickeln könnte.

## **2.4 Planung und Organisation des Projekts**

### **2.4.1 Projektpartner**

Da es sich bei den adressierten Themenfeldern von e performance vor allem um angewandte Grundlagenforschung handelte, wurde das Vorhaben durch einen Verbund aus Partnern von Industrie und Forschung umgesetzt. Folgende Partner waren an dem Projekt beteiligt:

- Die AUDI AG (Projektkoordination),
- die Audi Electronics Venture (AEV),
- die Robert Bosch GmbH,
- die Tochtergesellschaft Bosch Engineering GmbH (BEG),
- die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), vertreten durch die Institute
  - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA),
  - Institut für Elektrische Maschinen (IEM),
  - Institut für Kraftfahrzeuge (ika).

Im Unterauftrag der Projektpartner wurden außerdem weitere Forschungseinrichtungen und Dienstleister eingebunden siehe hierzu auch Kap. 2.6).



Gefördert wurde das Projekt durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprogramms IKT2020.

### 2.4.2 Projektstruktur und Arbeitspakete

Das Projekt ist in sieben fachliche Arbeitspakete untergliedert (AP2 bis AP 8 in untenstehender Abbildung 2-1). Die Arbeitspakete wurden wiederum in Unter-APs unterteilt, welche die Aktivitäten nach Themenfeldern und Projektphasen abbildeten.

Weiterhin wurden zwei Querschnitts-Arbeitspakete zur Koordination und Steuerung (AP 1) sowie zur Dokumentation und Berichterstattung (AP 9) eingerichtet.

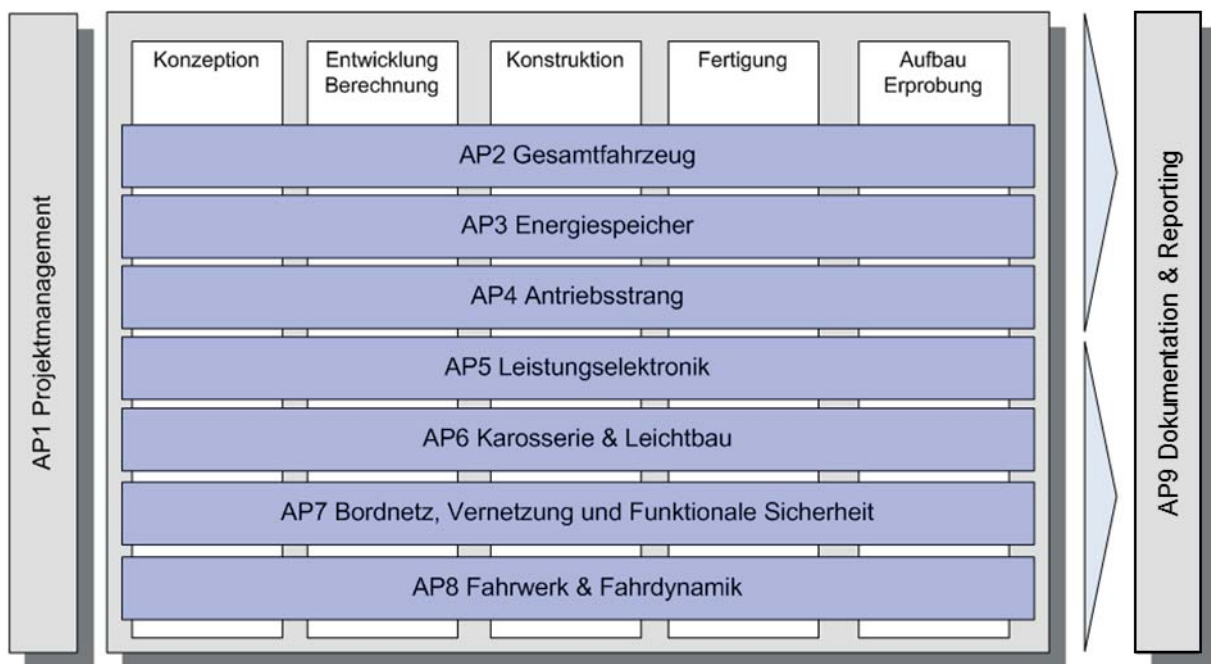


Abbildung 2-1: Projektorganisation

Das übergeordnete **AP1 ‚Projektmanagement‘** beinhaltet die Aktivitäten zur Koordination der Projektpartner und zur übergeordneten Projektsteuerung. Wesentliches Ziel der Koordination war eine zielgerichtete und effektive Projektarbeit des Verbundprojekts. Die Aufgaben des Projektmanagements umfassten sowohl die technische und organisatorische Abstimmung der Projektarbeit als auch die Gewährleistung eines kontinuierlichen und inhaltlichen (Wissens-)Transfers zwischen den Partnern. Das übergeordnete Projektmanagement wurde im Wesentlichen durch die AUDI AG geleistet, die auch die Leitung des APs innehatte.

Das **AP2 ‚Gesamtfahrzeug‘** beinhaltet die fahrzeugübergreifenden Themenschwerpunkte und wurde entlang der Projektphasen in acht Unterarbeitspakete auf-



geteilt. Die AUDI AG war an allen Unter-APs beteiligt und leistete auch die Koordination des Arbeitspakets. Die einzelnen Unter-Arbeitspakete beinhalteten eine Konzeptstudie zur Ermittlung der Umsetzungsalternativen für verschiedene Fahrzeugtypen auf Komponenten- und Modulebene (AP 2.1), die Definition von Package- und Maßkonzepten (AP 2.2) für die Gesamtfahrzeuggestaltung, insbesondere der Fahrgastzelle, grundlegende Arbeiten zur Bedienung und Anzeige für die Mensch-Maschine-Schnittstelle (AP 2.3) sowie Untersuchungen hinsichtlich der Fahrzeugakustik (AP 2.4), was sowohl die innere als auch die äußere Wahrnehmung des Elektrofahrzeugs umfasste. Weitere Schwerpunkte des APs waren das Thermische Management (AP 2.5) zur Entwicklung und Bewertung von Konzepten zur thermischen Gesamtbilanz im Fahrzeug sowie die Kopplung von im Projekt verwendeten Simulationsmodelle zu einer SIL-Umgebung (AP 2.6), mit besonderem Schwerpunkt auf Längsdynamikregelung und Energiemanagement. Ebenfalls projektübergreifend waren die UAPs Fahrzeugintegration (AP 2.7) und Gesamtfahrzeugtest (AP 2.8), von den in anderen Arbeitspaketen entwickelten Komponenten.

Ziel des **AP 3 ‚Energiespeicher‘** war der Aufbau eines Batteriepack-Prototypen. Die Aktivitäten in diesem AP beinhalteten verschiedene Arbeitsschritte zur Konzeption des Batteriepaketes (AP 3.1), zur Untersuchung der Lebensdauer der verwendeten Batteriezellen unter realen Bedingungen (AP 3.2), zum Aufbau eines elektrisch-thermischen Simulationsmodell auf Zell- und Batteriepack-Ebene (AP 3.3), zur Entwicklung von Algorithmen für die Batteriediagnose, das Batteriemanagement, das Zellenausgleichsystem und für die Überwachung des Batteriepacks (AP 3.4). zur detaillierten Berechnung und Auslegung des Batteriepacks (AP 3.5)“, insbesondere hinsichtlich Zellenverbinder, Kühl- und Heizsystem, Sensoren, Batteriepack-Elektronik, Gehäuse und Strukturfestigkeit, zum Aufbau sowie zur Inbetriebnahme und Erprobung des Batteriepacks basierend auf den Ergebnissen der o.g. Unter-APs (AP 3.6). Mit dem Abschluss der Arbeiten in AP 3 stand das Batteriepack zur Erprobung im Versuchsträger bereit.

In **AP4 ‚Antriebsstrang‘** wurden mögliche Antriebsstrangarchitekturen simulativ analysiert, verglichen und bewertet. Dazu wurde ein ganzheitliches Längsdynamiksimulationsmodell aufgebaut, das die verschiedenen Antriebsstränge mit ihren Komponenten dynamisch abbildet (AP 4.1). Die Architekturen wurden bezüglich ihrer Effizienz, Leistungsdichte, Modularität, Skalierbarkeit und ihres akustischen sowie schwingungstechnischen Verhaltens untersucht und bewertet. Darauf basierend wurden die mechanischen Komponenten des Antriebsstrangs (AP 4.2), die elektrische Maschine (AP 4.3) sowie die Regelungstechnik (AP4.6) für den Technikträger entwickelt, aufgebaut und getestet. Das AP beinhaltete auch Untersuchungen zur Vorhersage der Lebensdauer und Zuverlässigkeit (AP 4.4) und zur Akustik der Ma-



schine (AP 4.5). Abschließend wurden im AP 4.7 die o.g. Komponenten zu einem Gesamtantriebsstrangmodul kombiniert, auf einem Prüfstand in Betrieb genommen und für den Betrieb optimiert.

Die Zielsetzung des **Arbeitspakets 5 ‚Leistungselektronik‘** war die Sicherstellung der Funktion der Umrichterkomponenten. Dazu zählten Untersuchungen zu Bordnetzspannungen und Topologien in Abhängigkeit der verwendeten Leistungselektronik (AP 5.1). In dem AP 5.2 wurden dazu zunächst Strukturen heutiger Packages hinsichtlich ihrer Ausfallwahrscheinlichkeit analysiert. In AP 5.3 erfolgte dann die Auslegung und Kalkulation der erforderlichen Umrichter, die basierend auf diesen Ergebnissen in AP 5.4 konstruiert und für das Versuchsfahrzeug aufgebaut wurden. Hierzu wurden die Umrichter in AP 5.5. auf dem Prüfstand getestet und verifiziert.

Das **Arbeitspaket 6** bündelte die Aktivitäten zu den Themenfeldern **‚Karosserie und Leichtbau‘**. Insbesondere sollten hier Plattformstrategien entwickelt und untersucht werden, die für verschiedene Antriebsarten geeignet sind, wobei neben den mechanischen Eigenschaften auch thermische Gesichtspunkte berücksichtigt wurden. Die Arbeiten erfolgten hauptsächlich durch die Projektpartner RWTH und Audi. Wesentliche Arbeitsschritte waren die Konzeption der Karosseriearchitekturen mit Material- und Fügekonzepten (AP 6.1), die Untersuchung der technischen Umsetzbarkeit sowie deren Konstruktion in den APs 6.2 und 6.3. Basierend darauf wurden die Bauteile und die Gesamtkarosserie für das Demonstratorfahrzeug in AP 6.4 entwickelt. Zur Validierung und Absicherung der Untersuchungsergebnisse wurden in AP 6.5 verschiedene Strukturanalysen durchgeführt (Crashtest, Steifigkeitsmessung etc.).

Das **Arbeitspaket 7** behandelte die Themenfelder **Bordnetz, Vernetzung und Funktionale Sicherheit**. Die Arbeiten zum Niedervolt- und Hochvolt-Energiebordnetz des E-Fahrzeugs wurden dabei in AP 7.1 durch Kopplung von Simulation und Prüfstandversuchen durchgeführt. Die Untersuchung, Umsetzung und Erprobung von Architekturen und Netz-Topologien für die fahrzeuginterne Kommunikation erfolgte in AP 7.2. Analysen hinsichtlich der Anforderungen zur Funktionalen Sicherheit im Antriebsstrang erfolgten in AP 7.3. Die Ergebnisse der oben genannten APs waren eine wichtige Grundlage für die Entwicklung der Komponenten in den anderen Arbeitspaketen. Aus diesem Grund waren alle Partner an AP 7 beteiligt, wobei die Leitung des APs durch die RWTH erfolgte

Der Themenblock **Fahrwerk und Fahrdynamik** wurde in dem **AP 8** zusammengefasst. Hierbei waren verschiedene Antriebskonfigurationen, wie zum Beispiel zentraler Antrieb oder Einzelradantrieb (Radnabenmotoren) zu berücksichtigen. Weiterhin wurden Möglichkeiten untersucht, die Bewegungen im Fahrwerk zur Energiegewinnung zu nutzen (Rekuperation). Grundlegende Arbeiten zur Analyse und Modellie-



rung des Fahrwerksystems wurden in AP 8.1 durchgeführt. Darauf aufbauend wurden in AP 8.2 die fahrdynamischen Regelungssysteme und in AP 8.3 das Fahrwerk entwickelt. Letzteres beinhaltete insbesondere auch die Entwicklung des Bremssystems sowie der elektromechanischen Federung für das E-Fahrzeug. Die Umsetzung und Überprüfung der Ergebnisse aus AP 8, sowie die Integration des Fahrwerks in das Versuchsfahrzeug erfolgte in AP 8.4, wobei verschiedene Prüfstände verwendet wurden.

Das Querschnitts-Arbeitspaket **AP 9** diente der **Dokumentation und Dissemination** der Ergebnisse sowie der externen Kommunikation. Weiterhin beinhaltete das AP die Bereitstellung von Tools und grundlegende Aktivitäten zur Organisation des projektinternen Informationsflusses.

### 2.4.3 Ablauf

Zeitlich wurde das Projekt in drei Phasen unterteilt: Die erste Phase begann mit dem Projektstart im Oktober 2009 und diente vor allem der Anforderungsdefinition, Konzeption und Spezifikation des Gesamtsystems und seiner Komponenten. Damit waren die theoretischen und organisatorischen Grundlagen gelegt für die Projektphase 2, welche die Entwicklung, Konstruktion und den Aufbau der einzelnen Komponenten und Systeme beinhaltete. In der dritten Projektphase wurden diese dann in das Demonstrator-Fahrzeug integriert, worauf Tests und Erprobungen des Gesamt-Fahrzeugs erfolgten.

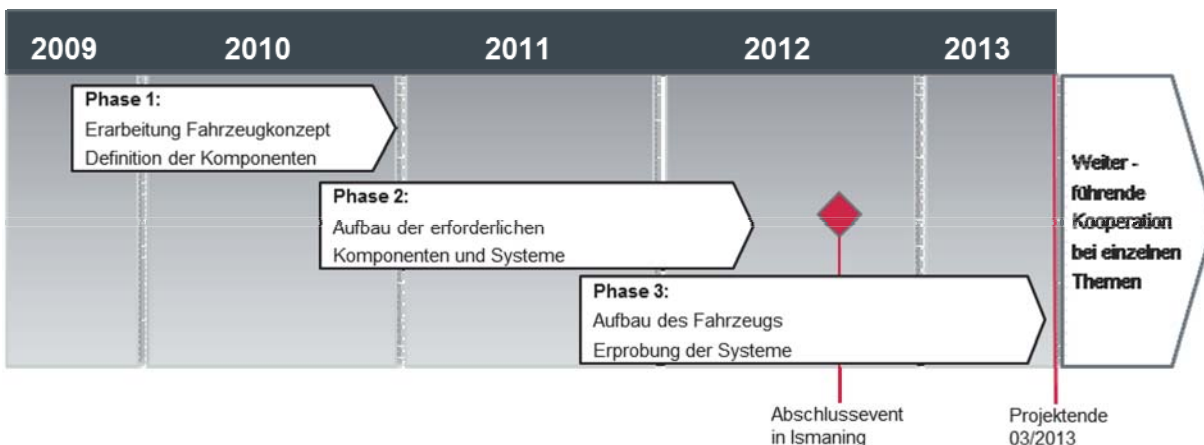


Abbildung 2-2: Zeitlicher Ablauf und Projektphasen



## 2.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

### 2.5.1 Übersicht

Die Historie des Elektrofahrzeugs reicht bis in die Anfänge der Automobilentwicklung zurück (siehe Abbildung 2-3). Anfang des 20. Jahrhunderts spielten insbesondere in den USA Elektrofahrzeuge eine große Rolle, so dass dort um die Jahrhundertwende mehr Elektrofahrzeuge zugelassen waren als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

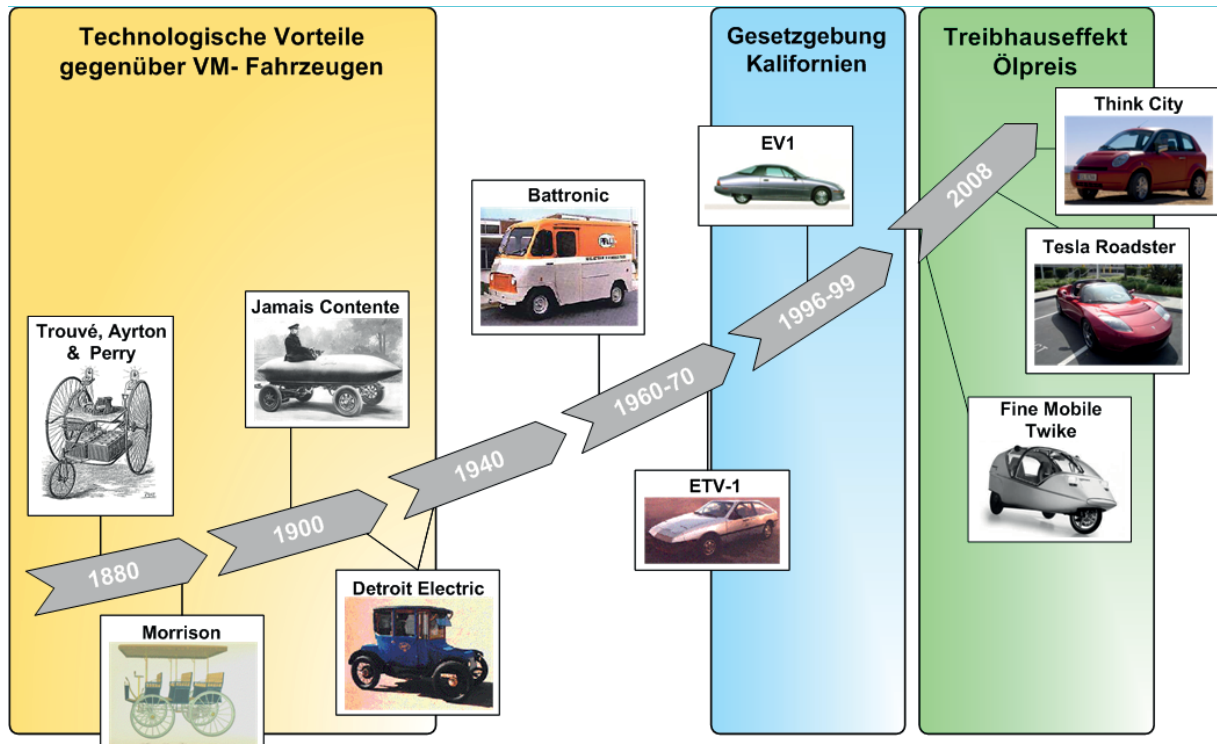


Abbildung 2-3: Zeitgeschichtliche Entwicklung des Elektrofahrzeugs [2.13]

Im Fortgang der schnell ansteigenden Automobilisierung führten jedoch die vielen offensichtlichen Vorteile des sich weiter entwickelnden Verbrennungsmotors dazu, dass heutige Kraftfahrzeuge weltweit fast ausschließlich von Otto- und Dieselmotoren angetrieben werden. Der rein elektrische Fahrantrieb erlebt jedoch derzeit aufgrund von verschiedenen Randbedingungen (Entwicklung der Kraftstoffpreise, CO<sub>2</sub>-Diskussion, Schadstoff- und Geräuschemissionen) eine technologische Renaissance. Der Markt für Elektrofahrzeuge befindet sich allerdings derzeit in einer frühen Entwicklungsphase, was sich unmittelbar aus dem aktuellen Stand der Technik und den Zulassungszahlen ableiten lässt.

Der elektrische Antrieb ermöglicht durch die Wandlung von elektrischer in mechanische Energie einen äußerst effizienten Antrieb. In Verbindung mit einem geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß (z.B. durch Ausbau von Regenerativen Energiequellen) in der Strom-





produktion kann das das Elektrofahrzeug dazu beitragen, die verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Zudem ermöglicht diese Antriebsform die Verringerung der Abhängigkeit vom Erdöl. Aus diesem Grund verabschiedete das Bundeskabinett Ende 2008 den Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität, der den Rahmen für eine anzustrebende Markteinführung von PlugIn-Hybrid- und Elektrofahrzeugen in Deutschland bilden soll.

Auf dem Weg zur Markteinführung sind allerdings noch zahlreiche technologische Entwicklungen notwendig, um ein kundengerechtes Produkt anbieten zu können. Diese Technologieentwicklungen beziehen sich hauptsächlich auf den elektrischen Antrieb und den Energiespeicher. Das Elektrofahrzeug bietet jedoch neben der sehr hohen Energieeffizienz des elektrischen Antriebs grundsätzlich die Möglichkeit, Innovationen im gesamten Fahrzeug zu platzieren und alte Strukturen und Konzepte neu zu entwickeln.

### **2.5.2 Energiespeicher**

Der Energiespeicher ist eine zentrale Komponente des Elektrofahrzeugs. Bis in die 90er Jahre hinein kamen Blei-basierte Batterien zum Einsatz, die zwar preisgünstig sind, aber auch erhebliche Nachteile aufweisen, insbesondere hohes Gewicht, geringe Leistungsfähigkeit, relativ schlechte Ladeakzeptanz sowie schnelle Alterung. Später wurden deshalb Ni-MH Batterien eingesetzt, die im Vergleich zu Blei-Batterien eine höhere Energiedichte, Leistungsfähigkeit und Lebensdauer aufweisen. Nachteilig sind dagegen das Verhalten von diesen Batterien bei niedrigeren Temperaturen, eine niedrige Zellspannung und höhere Kosten als bei Bleibatterien. Auch Hochtemperaturbatterien werden noch in mehreren Kleinserien verwendet (z. B. Zebra-Batterie), die eine relativ hohe Energiedichte aufweisen. Ein breiter Einsatz der Hochtemperatur-Batterien wird jedoch dadurch verhindert, dass die Batterien während der Standzeiten geheizt werden müssen.

Aktuell zeichnet sich deshalb der Einsatz von Li-Ionen basierten Batterien ab, wobei es sich hier eigentlich um einem Sammelbegriff für eine Vielzahl primärer und sekundärer Batteriesysteme handelt, in denen Lithium in reiner oder gebundener Form als Aktivmaterial in beiden Elektroden verwendet wird.

Li-Ionen Batterien haben sich schon im Bereich der Consumer-Elektronik bewährt, für einen breiten Einsatz in Fahrzeugen werden aber spezielle Automotive-taugliche Zellen benötigt, mit weiter erhöhter Kapazität, Leistungsfähigkeit und Lebensdauer. Tatsächlich sind schon Zellen mit deutlich verbesserter Automotive-Tauglichkeit verfügbar. Zum Projektstart waren aber noch viele Fragen bzgl. des Zusammenbaus zu einem Batteriepack und dessen Integration zu klären. insbesondere hinsichtlich



Schutzmechanismen, Batteriemanagement, Betriebsstrategien, Thermo-Management, Zellenausgleichsystemen oder mechanischer Auslegung des Batteriepacks. Zur Optimierung dieser Parameter werden zurzeit verschiedene F&E-Arbeiten durchgeführt.

### 2.5.3 Elektrischer Antrieb

Neben dem Energiespeicher ist der elektrifizierte Antriebsstrang, bestehend aus der Maschine, Getriebe und Leistungselektronik, im Elektrofahrzeug von entscheidender Bedeutung. Während elektrische Antriebe in anderen Industriebereichen seit Jahrzehnten Standardkomponenten darstellen, war die Anwendung im Kraftfahrzeug bisher begrenzt auf Motoren niedriger Leistung oder Spannung, z.B. Lichtmaschine, Anlasser oder Stellmotoren. Eine Anwendung des Elektromotors als Fahrzeugantrieb ergab sich in nennenswertem Umfang erst in Hybridfahrzeugen, in denen der elektrische Antrieb das klassische Antriebssystem unterstützt.

Es existieren verschiedene Maschinentypen, die in einem modernen Elektrofahrzeug eingesetzt werden können. Im Einzelnen sind dies die permanenterregte Synchronmaschine (PMSM), die bürstenlose Gleichstrommaschine (BLDC), die Asynchronmaschine (ASM), die geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) und die Transversalflussmaschine (TFM).

Die permanenterregte Synchronmaschine (PMSM) erlaubt verschiedene Ausführungsformen des Stators und des Rotors. Der Stator kann sowohl mit einer verteilten Drehstromwicklung wie auch mit einer konzentrierten Wicklung ausgeführt werden. Bei letzterer werden die Kupferverluste durch kleinere Wickelkopfabmessungen reduziert. Allerdings entstehen vermehrt Oberwellen des Statorfeldes, die neben steigenden Eisenverlusten zu einer erhöhten Schwingungsanregung im Stator und somit zu einer höheren Geräuschemission führen können. Die Magneten auf dem Rotor werden unterschiedlich angeordnet, wobei jede Bauart individuelle Vor- und Nachteile hat, die sich in Unterschieden des Drehzahlbereichs, des Wirkungsgrades und der Fertigungskosten auswirken. Die Asynchronmaschine (ASM) ist aufgrund ihres einfachen Aufbaus, des geringen Wartungsaufwands und ihrer Robustheit sowie ihres langjährigen erfolgreichen Einsatzes als Traktionsantrieb eine in Elektrofahrzeugen häufig eingesetzte Maschine. Verglichen mit anderen elektrisch kommutierten Maschinen stellt die Asynchronmaschine die ausgereifteste Technologie dar. Nachteile ergeben sich aufgrund des vorhandenen Kippmoments, das den Bereich konstanter Leistung limitiert. Die geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) zeichnet sich durch ihr einfaches und robustes Design sowie eine vorteilhafte Drehmoment-Drehzahl Charakteristik aus. Aufgrund des günstigen Feldschwächbereichs kann die SRM im größten Drehzahlbereich aller betrachteten Maschinen betrieben werden.



Diese Eigenschaft wird durch die geringen mechanischen Beanspruchungen im Rotor der Maschine unterstützt. Die SRM erfordert im Vergleich zu Drehfeldmaschinen einen erhöhten Verkabelungsaufwand. Negativ für den Einsatz im Elektrofahrzeug wirken sich die im Betrieb entstehenden Geräusche aus. Bei einer Transversalflussmaschine wird der magnetische Fluss in der Maschine transversal, also senkrecht zur Bewegungsrichtung des Rotors geführt. Diese Ausführung ist mit dem Vorteil verbunden, dass der flussführende Eisenquerschnitt von dem stromführenden Wicklungsquerschnitt getrennt ist, wodurch eine Erhöhung der Kraftdichte erreicht wird. Daher erzielt die Transversalflussmaschine eine sehr hohe Leistungsdichte. Negativ wirkt sich der komplizierte Aufbau der Maschine aus, der erhebliche Kosten zur Folge hat. Dies sorgt bis heute dafür, dass die TFM nicht in die Serienproduktion gelangt ist.

Bei den elektrischen Antrieben heutiger realisierter Elektrofahrzeuge handelt es sich im Wesentlichen um konventionelle elektrische Antriebskomponenten, welche aus bekannten, aber Automotive-fremden Anwendungen adaptiert wurden und somit das Potential dieser Technologie nicht vollständig nutzen können. Es fehlen vielmehr fundierte Untersuchungen und Aussagen zu den Potentialen dieser Komponenten in Bezug auf Leistungsdichte, Gewicht, Effizienz, Akustik, etc. für die Anwendung im Kraftfahrzeug ([2.4], [2.5], [2.6]).

#### **2.5.4 Leistungselektronik**

Zur Optimierung des Wirkungsgrades und der Lebensdauer elektrisch angetriebener Kraftfahrzeuge ist der Einsatz verschiedener leistungselektronischer Umrichter erforderlich. Bürstenlose Motoren erfordern zunächst einen Umrichter, welcher auf das Maximum von Antriebs- bzw. Rekuperationsleistung ausgelegt ist. Eingangsseitig wird dieser Umrichter von einer Gleichspannung versorgt. Bei einem Fahrzeug der anvisierten Klasse kann ein zusätzlicher DC/DC-Wandler gleicher Leistung vorteilhaft sein, welcher ausgangsseitig diese Gleichspannung auf einem DC-Bus zur Verfügung stellt. Eingangsseitig wird dieser DC/DC-Wandler direkt mit der Batterie verbunden.

Der Einsatz dieses DC-Busses ermöglicht neben der Verwendung von leistungsstarken Hochvoltkomponenten insbesondere auch ein variables Zwischenkreispotential, unabhängig vom Ladezustand der Batterie. Aktuell im Automobil verwendete Bauelemente sind jedoch auf eine Versorgungsspannung von 12 V ausgelegt. Daher wird ein weiterer Wandler benötigt, der die Lichtmaschine eines klassischen Automobils ersetzt. Dieser Wandler hat eine kleinere Leistung im Bereich weniger Kilowatt.



Die prinzipiellen Topologien mit denen die dargestellten Wandler aufgebaut werden können, sind bereits hinlänglich erforscht und es ergibt sich typischerweise je Wandler ein Wirkungsgrad oberhalb von 95%. Relativ neu im Bereich der Leistungselektronik sind hingegen die Umgebungsbedingungen, welche aus dem Anwendungsbereich Automotive kommen, insbesondere Vibrationen oder auch Temperaturzyklen durch Witterung und Betrieb. Die Packages der aktiven Bauelemente sind derartigen Anforderungen hinsichtlich ihrer Lebensdauer aktuell nur bedingt gewachsen. So wird für Halbleiterpackages eine Lebensdauer von 20 Jahren angesetzt, wenn sie im Labor 100 Testzyklen zwischen  $-25^{\circ}\text{C}$  und  $125^{\circ}\text{C}$  überstehen. Für die weit höheren Anforderungen im Automobil wäre hier eine Zyklenfestigkeit von etwa 1000 Zyklen erforderlich, so dass für eine hinreichende Lebensdauer grundlegend neue Wege beschritten werden müssen. Ansätze hierfür zeigt der Toyota Lexus RS600h, bei dem eine beidseitige Wasserkühlung der aktiven Komponenten ohne Bonddrahtkontaktierung entwickelt wurde.

Für die dynamische Drehmomentregelung elektrischer Antriebe gibt es als grundlegende Verfahren die feldorientierte Regelung [2.9][2.12] und die direkte Drehmomentregelung [2.10][2.17][2.10]. Beide Verfahren finden im industriellen Einsatz in verschiedenen Produkten Anwendung [2.7][2.11]. Die Regelung von Asynchron- und Synchronmaschinen in industriellen Anwendungen ist umfangreich erforscht. Traktionsanwendungen erfordern die Ausreizung der Betriebsgrenzen von Maschine und Umrichter. Insbesondere bei der Regelung der heutzutage vermehrt eingesetzten permanenterregten Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten [2.8] gibt es noch einen großen Forschungsbedarf. Dieser betrifft die Optimierung des Wirkungsgrads, die thermische Ausnutzung der Maschine, die Einhaltung einer maximalen Magnettemperatur und Entmagnetisierung, den Betrieb an der Spannungsgrenze sowie die Berücksichtigung des nicht-linearen Betriebsverhaltens. In der Literatur werden lagegeberlose Verfahren für unterschiedliche Betriebsbereiche und Anwendungen beschrieben und experimentell verifiziert [2.16][2.16]. Untersuchungen bezüglich der Stabilität der Verfahren wurden nur teilweise vorgenommen [2.18][2.14]. Bei Ansätzen zur Auslegung und Charakterisierung der vorgestellten Verfahren besteht weiterer Forschungsbedarf.

### 2.5.5 Karosserie

Karosserien heutiger Elektrofahrzeuge sind oftmals von konventionell angetriebenen Modellen übernommen oder nach klassischen Richtlinien konstruiert. Diese traditionellen Strukturen sind das Ergebnis einer langen Evolution, bei der das Package der Antriebskomponenten als Randbedingung aber prinzipiell gleich geblieben ist. Folglich ist das über Jahre erzielte hohe Niveau heutiger Karosseriestrukturen, wie etwa



bei der Crashesicherheit, der Steifigkeit oder auch der Raumnutzung, an das typische Package des Verbrennungsmotors gebunden und sind nicht an die speziellen Erfordernisse und Möglichkeiten des Elektroantriebes angepasst. Wird ein Elektrofahrzeug auf Basis eines bestehenden verbrennungsmotorischen Modells und dessen Karosserie aufgebaut, herrschen zudem erhöhte Einschränkungen bei der Auslegung des elektrischen Antriebes, der in die bestehende Struktur einzugliedern ist. Ein Beispiel hierzu ist die Schwierigkeit bei der Unterbringung der Traktionsbatterie in bestehenden Strukturen.

### 2.5.6 Bordnetz

Die Energiebordnetze von Hybridfahrzeugen (HEV) sowie von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen (BEV) sind heutzutage prinzipiell sehr ähnlich aufgebaut wie konventionelle 14V-Bordnetze. Ein grundlegender Unterschied liegt jedoch in der zusätzlich vorhandenen Hochspannungsebene für die Antriebselektronik. Die Schnittstelle zwischen dem konventionellen 14V- und dem Hochspannungs-Bordnetz wird durch einen DC/DC-Wandler bereitgestellt. Dieser übernimmt die Aufgabe der Energieversorgung für alle Restbordnetz-Lasten. Idealerweise ist der DC/DC-Wandler bidirektional ausgelegt, sodass bei Bedarf Energie zwischen den Bordnetzspannungsebenen in beide Richtungen ausgetauscht werden kann. Ziel dieses Projektes ist es, über diesen konservativen Ansatz hinauszugehen und mehr elektrische Lasten, die zurzeit üblicherweise noch auf der 14V-Ebene realisiert werden, auf der Hochspannungs-Seite zu implementieren.

## 2.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Forschungsvorhaben beinhaltete vor allem anwendungsorientierte Forschungsaktivitäten. Entsprechend stellten die Partner einen Verbund aus Industriepartnern und Forschungsinstituten dar. Zusätzlich wurden weitere Forschungsinstitutionen und Dienstleister einbezogen. Auf diese Weise war ein effizienter Know-how-Transfer zwischen Forschung und Industrie gewährleistet. Im Einzelnen wurden durch die Projektpartner folgende Forschungseinrichtungen und Unternehmen einbezogen:

- Die Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka)
  - Szenarien-Definition und Verkehrsfluss-Simulation zu Konzeption des Elektrofahrzeuges und Dimensionierung von Komponenten
  - Unterstützung bei der Berechnung und Konstruktion von Getrieben und Antriebskomponenten
- das Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering (IESE)
  - Unterstützung Sicherheitsanalyse mit ihren Kompetenzen in den Bereichen Engineering und Prozesse



- Erarbeitung Sicherheitskonzept unter Verwendung von modellbasierten Ansätzen für Sicherheitsanalyse und -Nachweis
- das Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelemente (IISB) in Erlangen
  - Normative Aufarbeitung und Systembetrachtungen zur Ladetechnik
  - Konzeption und Auslegung des Ladegerätes
  - Unterstützung bei Integration des Ladegeräts
- die Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für Echtzeitsysteme und Robotik
  - Überführung der funktionalen Architektur auf eine technische Architektur, insbesondere im Bereich Bordnetze
  - Grundlagenarbeiten und Unterstützung beim Aufbau einer Gesamtfahrzeugsimulation
- die Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für Thermodynamik
  - Erarbeitung unterschiedlicher Konzepte zur energetisch optimierten Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums,
  - dynamische Berechnungsmodelle unter Einbeziehung unterschiedlicher Wärmequellen
  - Betriebsstrategien Wärmepumpe/Kälteanlage
- die Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik
  - Konzeption und Analyse von Brake-By-Wire Systemen
  - Optimierung Mensch-Maschine-Schnittstelle und Fahrverhalten auch bzgl. des Crashverhaltens
- die Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK)
  - Fertigungskonzepte für die automatisierte Herstellung von Leichtbauteilen
  - Untersuchung von Möglichkeiten zur Reduktion von Produktionszykluszeiten und zum Recycling von Bauteilen
- die ForTISS GmbH, ein An-Institut der TU München
  - Konzeption Vernetzung
  - Gesamtfahrzeugsimulation
  - Kommunikationsinfrastruktur Wissensmanagement
- die Leibniz Universität Hannover, Institut für Praktische Informatik – Fachgebiet Software Engineering
  - Untersuchungen Adsoptionsspeicher
  - Wissensmanagement e performance



## 2.7 Literatur und Referenzen

- [2.1] Pressemitteilung 182/2009 des BMBF,  
„Wir müssen Autos neu denken“, <http://www.bmbf.de/press/2625.php>,  
16.07.2009
- [2.2] Webpage e performance Projekt;  
<http://www.audi.de/eperformance/brand/de.html>
- [2.3] Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität, Bundesregierung, August  
2009, [www.bmbf.de/pubRD/nationaler\\_entwicklungsplan\\_elektromobilitaet.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf)
- [2.4] NEUDORFER, H.;;  
Vergleich unterschiedlicher elektrischer Antriebskonzepte für Elektro- und  
Hybridstraßenfahrzeuge, Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahr-  
zeuge,  
Haus der Technik Fachbuch, Bd. 80, expert Verlag, Renningen, 2007
- [2.5] YABUMOTO, M.;;  
Electrical Steel Sheet for Traction Motors of Hybrid/Electric Vehicles,  
Nippon Steel Technical Report, No. 87, pp 57-61, Juli 2003
- [2.6] ZERAOULIA, M.;;  
Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Compar-  
ative Study, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 55, No.6, No-  
vember 2006
- [2.7] Technical Guide No. 1: Direct Torque Control – the world's most ad-  
vanced AC drive technology, verfügbar auf <http://www.abb-drives.com>, 2009
- [2.8] Bae, B.-H.; Patel, N.; Schulz, S.; Sul, S.-K.;;  
New Field Weakening Technique for High Saliency Interior Permanent Magnet  
Motor  
Industry Applications Conference, 2003
- [2.9] Blaschke, F.;;  
Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronmaschine  
Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte 1 Nr. 1/72, 1972, S. 184-193
- [2.10] Depenbrock, M.;;  
Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machines  
IEEE Transactions on Power Electronics, 1988 – Vol. 3, No. 4, Oct. 1988
- [2.11] Casadei, D.; Profumo, F.; Serra, G.; Tani, A.;;  
FOC and DTC: Two Viable Schemes for Induction Motors Torque Control  
IEEE Transactions on power Electronics, Vol. 17, No. 5, September 2002
- [2.12] De Doncker, R.; Novotny, D.;;  
The universal field oriented controller, Industry Applications, IEEE Transac-  
tions on, Volume 30, Issue 1, Jan.-Feb. 1994 Page(s):92 – 100



- [2.13] GIES, S  
Unkonventionelle Kraftfahrzeugantriebe  
Vorlesungsumdruck RWTH Aachen, Aachen, 2008
- [2.14] M. C. Harke; L. A. de S. Ribeiro; R. D. Lorenz  
Disturbance rejection limitations of back-emf based sensorless PM drives  
European Conference on Power Electronics and Applications, September 2007
- [2.15] Zulassungsstatistik 2009 des Kraftfahrtbundesamt  
Homepage des KBA, Berlin, 2009
- [2.16] MONTESINOS, D.; GALCERAN, S.; BLAABJERG, F.; SUDRIA, A.;  
GOMIS, O.;  
Sensorless control of PM synchronous motors and brushless DC motors – an  
overview and evaluation, In Power Electronics and Applications, 2005 Euro-  
pean Conference on, September 2005
- [2.17] TAKAHASHI, I. OHMORI, Y.;  
High-performance direct torque control of an induction motor  
Industry Applications, IEEE Transactions, Mar/Apr 1989, Vol. 25, Issue: 2, pp.  
257-264
- [2.18] WALLMARK, O.;  
Control of Permanent-Magnet Synchronous Machines in Automotive Applica-  
tions  
PhD thesis, Chalmers University of Technology, Schweden, 2006
- [2.19] WEBER, T.;  
Interview mit Daimler-Vorstand Thomas Weber zur Umweltstrategie des Kon-  
zerns und die Zukunft alternativer Antriebskonzepte  
Seiten 52-54, auto motor und sport, Heft 1, 2009





### 3 Ganzheitlicher und modularer Ansatz

Autoren: Johannes Landgraf (AUDI AG)

#### 3.1 Herausforderungen und Ziele

Im Forschungsprojekt e performance stand nicht nur die ganzheitliche Betrachtung von Problemstellungen der Elektromobilität im Vordergrund, gleichzeitig wurden die Komponenten mit der Zielsetzung einer größtmöglichen Modularisierbarkeit ausgelegt um verschiedene Fahrzeugkonzepte darstellen zu können und die Voraussetzung zur Realisierung einer Plattform für die Elektromobilität zu schaffen. Basis für die Modularisierung bilden ein modulares Batteriesystem, eine modulare HV-Architektur, die modulare Vernetzungsarchitektur und ein diversifiziertes Antriebssystem.

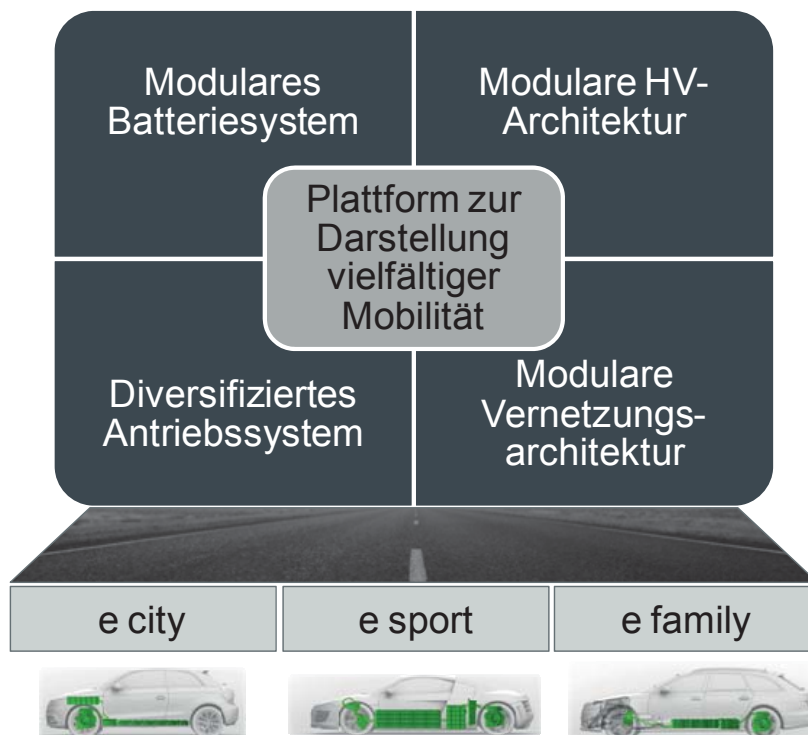


Abbildung 3-1: Kernelemente des Modulen Baukastens

#### 3.2 Konzepte und Lösungen

Ausgehend vom Konzept e sport, das im Projekt als Prototyp realisiert wurde, wurden noch zwei andere Charaktere konzipiert. Zum einen ein familientaugliches Mittelklassefahrzeug und zum anderen ein kleines Stadtfahrzeug. Während es sich bei den Ausprägungen e sport und e city um reine BEVs handelt, ist beim e family eine Ausprägung als BEV oder PHEV denkbar.



Die Ableitung der verschiedenen Charaktere erfolgte auf Basis bestehender Audi-Fahrzeuge. Diese als Conversion Design bezeichnete Vorgehensweise ist mit zahlreichen Einschränkungen verbunden, ermöglicht allerdings eine schnelle Umsetzung der Konzepte. Zur optimalen Nutzung der Möglichkeiten der modularen Plattform ist der Einsatz eines Purpose Designs erforderlich, das die spezifischen Anforderungen an eine Plattform für die Elektromobilität berücksichtigt.

### 3.2.1 Modulares Batteriesystem

Ein grundlegendes Element zur Umsetzung verschiedener Fahrzeugkonzepte stellt das modulare Batteriesystem dar. Durch den modularen Aufbau ergeben sich einige Freiheitsgrade bzgl. der Geometrie, der Leistung und des Energieinhalts des Batteriesystems. Die Basiseinheit stellt die Makrozelle dar. Diese besteht aus 26 parallel geschalteten Einzelzellen vom Typ 18650 und besitzt einen Energieinhalt von 200 Wh.



Abbildung 3-2: Einzelteile einer Makrozelle

Die Anordnung der Makrozellen zu einem Batteriesystem erfolgt flexibel unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Bauraumes. Die mechanische Grundstruktur wird von den Makrozellen, den Bodenplatten, den Crashprofilen und einem Verbindungsrahmen gebildet. Während die Bodenplatte und die Rahmenstruktur für jedes Konzept individuell ausgelegt werden muss, können die Crashprofile durch die modulare Fertigungsstruktur einfach an die erforderliche Länge angepasst werden.

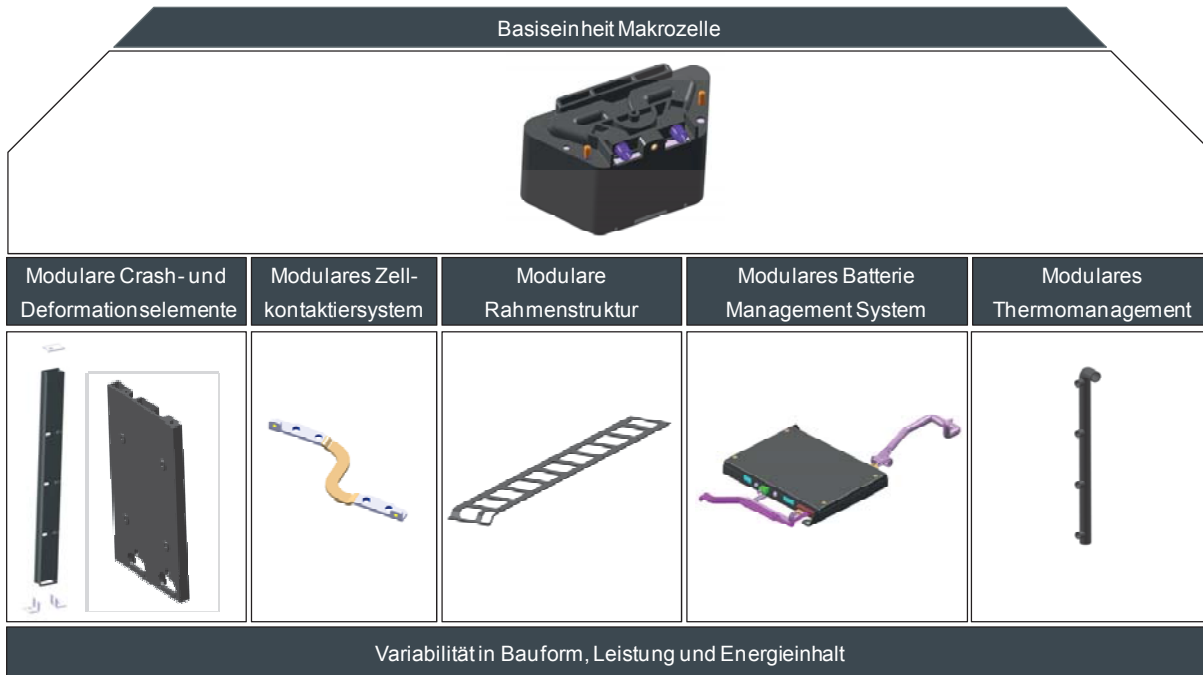


Abbildung 3-3: Modularisierungskonzept HV-Batterie

Die Anordnung der Makrozellen muss sowohl belastungsgerecht, als auch in einer bestimmten Anordnung zueinander und zu den Crashprofilen erfolgen um die Funktion des Deformationsvermögens zu gewährleisten. Dabei wird die Anordnung stets für eine Belastungsrichtung optimiert (vgl. Abbildung 3-4).

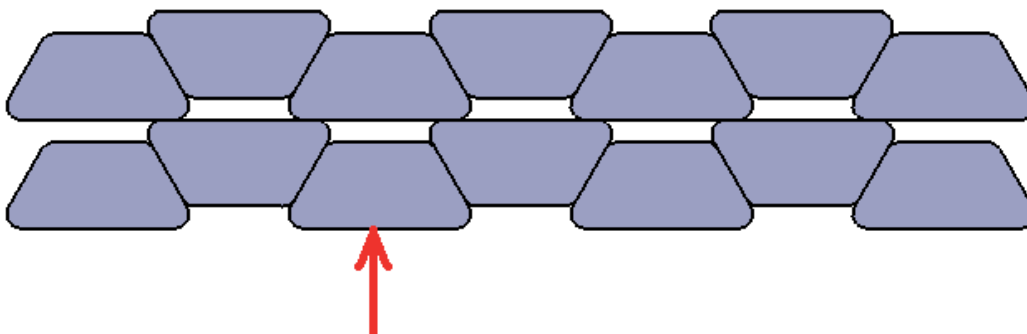


Abbildung 3-4: Anordnung für eine Belastungsrichtung

Dieser Nachteil lässt sich durch eine Alternativenanordnung umgehen und das Batteriesystem kann somit für verschiedene Belastungsrichtungen optimiert werden. Die Anordnung wurde im Rahmen des Forschungsprojekts noch nicht validiert.

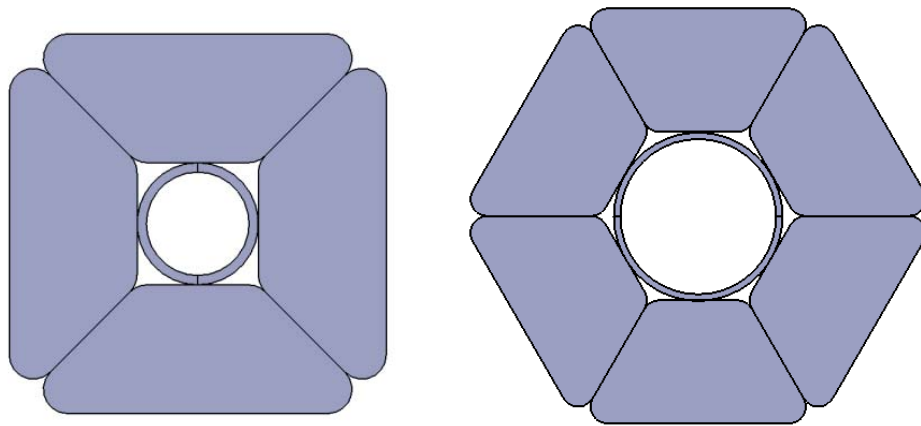


Abbildung 3-5: Alternativanordnungen der Batteriezellen zur Erzielung einer multidirektionalen Crashtauglichkeit

### 3.2.2 Modulare HV-Architektur

Maßgeblich zur Umsetzung verschiedener Fahrzeugkonzepte trägt auch die modulare HV-Architektur bei, bei der die zentrale Komponente vom HV-DC/DC-Wandler gebildet wird. Der HV-DC/DC-Wandler besteht aus zwei Teilwandlern, die die Eingangsspannungen der Batterien auf eine definierte, einstellbare Zwischenkreisspannung transformieren. Diese konstante Zwischenkreisspannung ermöglicht den Einsatz zweier getrennter Batteriesysteme und die Entkopplung der Energiequellen vom Traktionsnetz.

Durch die konstante Zwischenkreisspannung entfallen die bei variabler Zwischenkreisspannung auftretenden Drehmomenteinbußen am Antrieb. Wird die E-Maschine auf die Maximalspannung ausgelegt, so verschiebt sich der Eckpunkt zu kleineren Drehzahlen, wenn die Zwischenkreisspannung sinkt, d.h. der Feldschwäcbereich setzt bei niedrigerer Geschwindigkeit ein (siehe Abbildung 3-6). Die Folge ist eine Verschlechterung der dynamischen Eigenschaften. Das Drehmoment nimmt bei höheren Drehzahlen überproportional ab.