

Abschlussbericht

des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF
geförderten Forschungsvorhabens

Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (FSEM)

**Schwerpunkt: »Technische Systemintegration und gesellschafts-
politische Fragestellungen«**

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V.

Schwerpunktverantwortlicher Prof. Dr. Martin Wietschel
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Förderkennzeichen: 13N10600

Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2009 – 31.07.2011



Präambel

Einordnung des Verbundvorhabens »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität«

Um die volkswirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit vor allem im Automobilbau und auf den Gebieten Energieerzeugung und -speicherung zu erhalten und die internationale Entwicklung maßgeblich und nachhaltig mit zu gestalten, muss Elektromobilität in Deutschland systematisch und ganzheitlich vorangetrieben werden.

Mit der Fraunhofer »Systemforschung Elektromobilität« (FSEM) verfolgte die Fraunhofer-Gesellschaft das Ziel, den Wandel zu einer nachhaltigen »All-electric Economy« wirkungsvoll zu unterstützen. Die Besonderheit des Fraunhofer-Ansatzes war es, alle Wertschöpfungsstufen der Elektromobilität zu betrachten und aufeinander abgestimmt zu erforschen.

Die Initiative war so angelegt, dass die deutsche Wirtschaft kurzfristig auf eine sehr umfassende Systemkompetenz zurückgreifen sowie eine mit neuen Produkten aufgestellte Branche, neue Geschäftsmodelle und neue Märkte für sich erschließen konnte. Sie umfasste die fünf Themenschwerpunkte »Fahrzeugkonzepte«, »Energieerzeugung, -verteilung und -umsetzung«, »Energiespeichertechnik«, »Technische Systemintegration und gesellschaftspolitische Fragestellungen« sowie »Funktion, Zuverlässigkeit, Prüfung und Realisierung«. Der letztgenannte Schwerpunkt wurde hierbei im Jahr 2011 neu angelegt.



Bild 1: Schwerpunkte der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (Stand 2011)

Das Vorhaben wurde im Rahmen des Konjunkturprogramms II mit 34,5 Mio. Euro durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF gefördert (Förderkennzeichen 13N10597 - 13N10600 und 13N11426).

Tabelle 1 zeigt ergänzend eine Zusammenfassung der Schwerpunkte mit deren untergliederten Teilprojekten.

Tabelle 1: Schwerpunkte und Teilprojekte der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität

Schwerpunkt	Teilprojekte (Kurzbezeichnung)
Energieerzeugung,- verteilung und -umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> • Energieerzeugung und Netzintegration • Leistungselektronik und Antriebstechnik
Energiespeichertechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Materialentwicklung • Batteriesysteme
Fahrzeugkonzepte	<ul style="list-style-type: none"> • Radnabenmotor • Crashesichere Batterie • Batteriewechselsysteme • Ganzfahrzeugprüfstände
Technische Systemintegration und gesellschaftspolitische Fragestellungen	<ul style="list-style-type: none"> • Demonstrator Frecc0 • Demonstrator AutoTram • Forum Elektromobilität • Gesamtkonzepte und Gestaltungsoptionen • Wertschöpfungsarchitekturen • Übergeordnete Projektkoordination
Funktion, Zuverlässigkeit, Prüfung und Realisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Batterieprüfung • Innenraumklimatisierung • Sicherheit & Zuverlässigkeit • Rohstoffe, Recycling, Ökobilanzen • Anwendungsfelder und Fertigungsverfahren • Akustik und NVH

Übergeordnete Projektziele des Verbundvorhabens

Das Verbundvorhaben »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität« verfolgte folgende globale Zielsetzungen:

- Aufbau und Vermarktung einer Fraunhofer-Gesamtkompetenz »Systemforschung Elektromobilität«,
- Entwicklung funktionsfähiger Lösungen und Integration in die Demonstratoren Frecc0 und AutoTram,
- Promotion der Elektromobilität in Deutschland und
- Stärkung der Zusammenarbeit der Fraunhofer-Institute.

Mit den Ergebnissen wurde ein übergreifendes Systemangebot entwickelt, welches eine wesentliche Basis zur Umsetzung von Komplementär- und Transferprojekten mit der Industrie darstellt. Des Weiteren werden die Ergebnisse des Vorhabens in Forschung und Lehre der teilnehmenden Institute verwertet.

Projektstruktur und zentraler Meilenstein

Das Gesamtprojekt wurde von Prof. Dr. Ulrich Buller, Mitglied des Fraunhofer-Vorstandes und zuständig für den Bereich Forschungsplanung, geleitet und durch Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, koordiniert. Die Hauptkoordination wurde durch eine Geschäftsstelle, geleitet von Dr.-Ing. Michael Jöckel vom Fraunhofer LBF, unterstützt. Die Betreuung der Schwerpunkte und Teilprojekte erfolgte jeweils durch Fachspezialisten aus den teilnehmenden Fraunhofer-Instituten.

Die Projektleitung wurde von einem Fraunhofer-Lenkungskreis beraten, welcher wiederum die Schnittstelle zu einem zwölfköpfigen Industriebeirat darstellte. Des Weiteren wurden im Rahmen des Vorhabens FSEM das Forum Elektromobilität im Spreepalais Berlin sowie der Verein Forum Elektromobilität e.V. gegründet und ausgebaut (vgl. Berichtsteil des Teilprojekts »Forum Elektromobilität« im Schwerpunkt »Technische Systemintegration und gesellschaftspolitische Fragestellungen«).

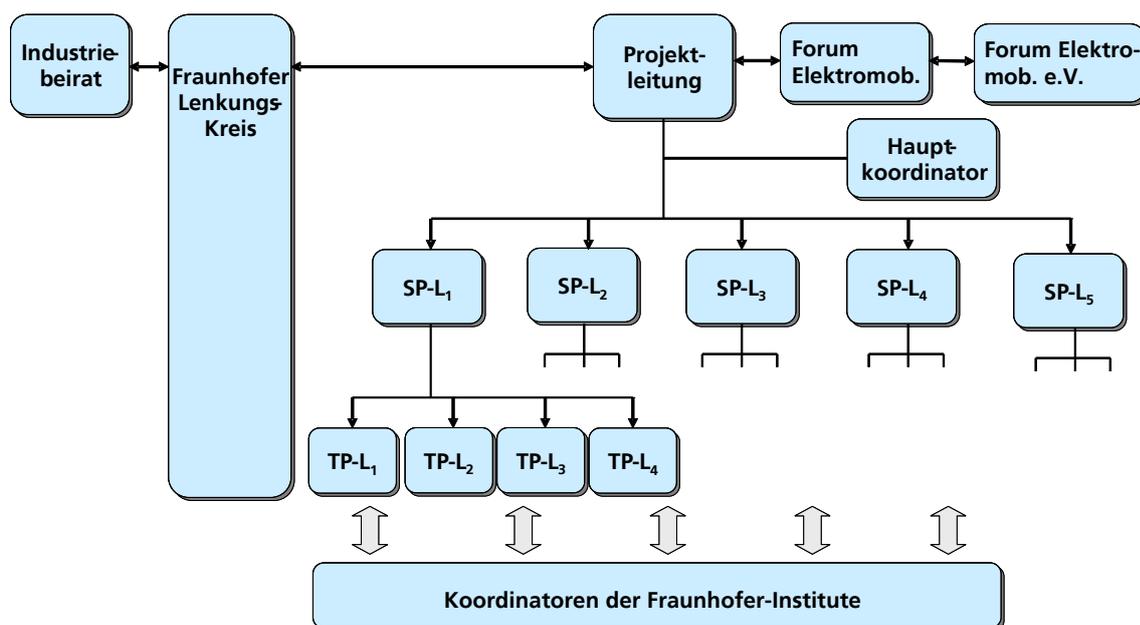


Bild 2: Projektstruktur (SP-L: Schwerpunktleiter, TP-L: Teilprojektleiter)

Im Gesamtvorhaben wurde für alle Schwerpunkte ein zentraler Meilenstein am 30.06.2010 definiert: »Teiltechnologien soweit entwickelt, dass die Umsetzung der Demonstratoren gewährleistet ist.« Dieser Meilenstein wurde erfolgreich absolviert.

Inhalte der Projektschwerpunkte

Schwerpunkt »Fahrzeugkonzepte« (FKZ 13N10597)

Ziel der Arbeiten in diesem Schwerpunkt war die Bündelung der Kompetenzen der Fraunhofer-Institute in verschiedenen Teilbereichen der Elektromobilität zur Weiterentwicklung bestehender Fahrzeugkonzepte. Das Ergebnis dieser gemeinsamen Arbeit ist ein wegweisendes Elektrofahrzeugmodell, welches den wirtschaftlichen und technischen Randbedingungen gerecht wird. Der Schwerpunkt gliederte sich in die Teilprojekte

- Neue Antriebskonzepte durch Einsatz von Radnabenmotoren
- Integration von betriebsfesten und crashsicheren Batterien in Leichtbaustrukturen für Elektrofahrzeuge
- Wechselsysteme für den halb oder vollautomatisch ablaufenden Wechsel von Batterien in Elektrofahrzeugen
- Aufbau eines Leistungszentrums »Gesamtfahrzeugprüfstände«

Diese vier Bereiche sind stark untereinander verzahnt und die Ergebnisse jedes Teilprojekts fließen in die Bearbeitung der jeweils anderen ein.

Leiter des Schwerpunkts »Fahrzeugkonzepte« war Prof. Dr.-Ing. Matthias Busse, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM.

Schwerpunkt »Energieerzeugung, -verteilung und -umsetzung« (FKZ 13N10598)

Dieses Schwerpunktprojekt betrachtete den gesamten Energiepfad von der Erzeugung elektrischer Energie über deren Verteilung bis hin zur Umsetzung in mechanische Energie im Fahrzeug. Die beiden Teilbereiche des Schwerpunkts »Energieerzeugung und Netzintegration« und »Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik« waren dabei eng verzahnt.

Die wesentlichen Aspekte lagen auf der Schnittstelle zwischen dem öffentlichen Stromversorgungsnetz und Elektrofahrzeugen sowie auf den leistungselektronischen Systemen für das elektrische Energiemanagement im Fahrzeug und elektrische Fahrtriebe:

- Konzept zur bidirektionalen Anbindung von E-Fahrzeugen an das Stromversorgungsnetz und
- dazugehörige innovative Komponenten für Leistungswandlung, Energiemanagement, Metering und Abrechnung sowie zur Kommunikation an der Fahrzeug-Netz-Schnittstelle
- Optimierte Betriebsführung von Fahrzeugen als Netzteilnehmer und Auswirkungen auf die Netze
- Leistungsmodule mit hoher Zuverlässigkeit und Funktionalität
- Elektromagnetische Verträglichkeit im Bordnetz von Elektrofahrzeugen
- Elektrische Achsantriebe mit integrierter Leistungselektronik

- Mit innovativen Technologien sollen Wirkungsgrad, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit der elektronischen Systeme deutlich gesteigert werden

Leiter des Schwerpunkts »Energieerzeugung und Netzintegration« war Dr. Martin März, Abteilungsleiter am Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB.

Schwerpunkt »Energiespeichertechnik« (FKZ 13N10599)

Grundvoraussetzung für jede Zukunftsvision - von der Elektromobilität bis hin zu rückspeisenden Speichereinheiten - ist ein zuverlässiges, effizientes und langlebiges Speichersystem. Lithiumbatterien mit ihren spezifischen Eigenschaften, vor allem hohe Energie und Leistungsdichten sowie hohe erreichbare Lebensdauern, stellen eine mögliche Basis für derartige Systeme dar. Allerdings gibt es sowohl auf der Material- als auch Systemebene noch eine Reihe von offenen Fragen.

Für eine erfolgreiche Akzeptanz von elektrisch betriebenen Fahrzeugen spielt die Speicherung und Bereitstellung der elektrischen Energie im Fahrzeug die entscheidende Rolle, insbesondere für Reichweite und dynamisches Fahrverhalten. Mit dem Teilprojekt Materialentwicklung wurden diese Aspekte im Verbund einer Vielzahl von Instituten, die mit ihren jeweiligen Kernkompetenzen die Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Technologie auf breiter Front untersuchten, adressiert.

Im zweiten Teilprojekt (Batteriesysteme) wurden innovative Batteriesysteme aufgebaut und für den Einsatz in zwei Demonstratoren angepasst. In Fahrzeugen sind die Sicherheitsanforderungen, Zuverlässigkeit, Langlebigkeit und nicht zuletzt das elektrische Anforderungsprofil an das Batteriesystem sehr hoch. Die Beherrschung des erforderlichen Energieinhaltes und Leistung unter extremen Umgebungseinflüssen erfordert eine deutlich verbesserte Sicherheit der Batterien nicht nur auf der Ebene der Batteriechemie sondern auch des Batteriesystems. Dazu wurden das Batteriemanagement, Kühlsystem sowie die Aufbau- und Verbindungstechnik weiter entwickelt.

Leiter des Schwerpunkts »Energiespeichertechnik« war Dr. Jens Tübke, Abteilungsleiter am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT.

Schwerpunkt »Technische Systemintegration und gesellschaftspolitische Fragestellungen« (FKZ 13N10600)

Die Integration elektrisch betriebener Fahrzeuge in Verkehrs- und Produktionssysteme stellt die Systemkonzeption und Implementierung vor große Herausforderungen. Vor diesem Hintergrund war es Ziel dieses Schwerpunkts, im Dialog mit der technischen Entwicklung Marktchancen aber auch Hemmnisse der Elektromobilität in Deutschland zu identifizieren, Forschungs- und Entwicklungsergebnisse zu demonstrieren und so einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen, sowie interdisziplinäre Partnerschaften zu etablieren.

Mit Demonstratoren – einem reinen Elektro-Pkw und neuartigen Fahrzeugen für den öffentlichen Nahverkehr, sowie den innerstädtischen Lieferverkehr – wurde die grundsätzliche Machbarkeit der in den anderen Schwerpunkten entwickelten innovativen Konzepte gezeigt. Die Demonstratoren schufen eine gemeinsame Arbeitsplattform für die beteiligten Institute und demonstrierten die neuen Konzepte gegenüber Industrie, Politik und Öffentlichkeit.

Der zweite Aspekt des Schwerpunktes, die gesellschaftspolitischen Fragestellungen, beschäftigten sich mit verschiedenen Aspekten der Elektromobilität. Ein zentrales Thema war, welche neuartigen verkehrswirtschaftlichen Konzepte sich sowohl für den motorisierten Individualverkehr wie auch für den innerstädtischen Lieferverkehr aus der neuen Technologie entwickeln lassen. Dabei ist die Kundenakzeptanz ein kritischer Schlüsselfaktor für den Markterfolg der Elektromobilität. Ein wesentlicher Treiber der Elektromobilität sind die erwarteten Umweltvorteile, von der Reduzierung der Treibhausgase über die Minderung der Feinstaubemissionen bis hin zur Lärmreduzierung. Bei einem weltweiten Boom der Elektromobilität ergeben sich jedoch auch Risiken der Verfügbarkeit seltener Metalle für Batterien und Leistungselektronik. Mögliche Engpässe und Substitutionsstrategien wurden hier aufgezeigt. Der Übergang von Verbrennungsmotoren hin zu Elektroantrieben mit ganz neuen Fahrzeugkonzepten verändert die bisher etablierten Zuliefer- und Fahrzeugherstellerstrukturen. Daher widmete sich ein weiteres Arbeitspaket der Untersuchung, wie die Industrie auf die sich verändernden Wertschöpfungsstrukturen im internationalen Wettbewerb vorzubereiten ist.

Leiter des Schwerpunktes »Technische Systemintegration und gesellschaftspolitische Fragestellungen« war Prof. Dr. Martin Wietschel, Geschäftsfeldleiter am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Schwerpunkt » Funktion, Zuverlässigkeit, Prüfung und Realisierung« (FKZ 13N11426)

Dieser Schwerpunkt befasste sich mit Lösungsansätzen für ausgewählte Herausforderungen der Elektromobilität im Umfeld von Sicherheit, Zuverlässigkeit und Fertigungstechnik. Der Fokus lag dabei auf den Bereichen Batterietest und -prüfung, Methoden der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbewertung sowie Innenraumklimatisierung. Des Weiteren wurden Komfortfragen adressiert sowie die kosteneffiziente Serienfertigung von Komponenten untersucht. Komplementäre Studien zur Rohstoffverfügbarkeit und zum Nutzerverhalten rundeten die Inhalte ab. Die Arbeiten im Rahmen des Schwerpunktes gliederten sich in fünf Teilprojekte:

- Grundlegende Untersuchungen zur Test- und Prüfmethodik von Batterien für Fahrzeuganwendungen
- Innenraumklimatisierung von Elektrofahrzeugen
- Sicherheit und Zuverlässigkeit
- Vertiefende Studien zur Rohstoffverfügbarkeit und zum Nutzerverhalten
- Neue Anwendungsfelder für die Elektromobilität und alternative Fertigungsverfahren für Elektrofahrzeugkomponenten
- NVH und (Psycho-) Akustik

Leiter des Schwerpunktes »Funktion, Zuverlässigkeit, Prüfung und Realisierung« war Dr.-Ing. Matthias Klingner, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises des Schwerpunkts » Technische Systemintegration und gesellschafts-politische Fragestellungen «

Gesamtbudget:	7.934.064
Davon	
Personal	5.339.944
Fremdleistungen	1.471.213
Investitionen	667.657
Material	179.740
Sonstiges	156.879
Reisekosten	118.630

Präsentation und Öffentlichkeitsarbeit

Die Projektarbeiten und -ergebnisse wurden unter anderem im Rahmen folgender Veranstaltungen und Messen vorgestellt:

- Hannover-Messe Industrie 2010 und 2011
- KONGRESS des Forum Elektromobilität e.V. 2010 und 2011 (inkl. Fachaussstellung)
- Abschlussveranstaltung auf der ATP Teststrecke Papenburg am 02.09.2011



Bild 3: Impressionen der Messeauftritte im Rahmen der Hannover-Messe Industrie 2010 und 2011

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Schwerpunkts »Technische Systemintegration und gesellschafts-politische Fragestellungen« anhand der bearbeiteten Teilprojekte dargestellt.



Teilprojekt

»Demonstrationsfahrzeug Frecc0«

Teilnehmende Fraunhofer-Institute: IISB, IFAM, ESK, LBF

Teilprojektleiter: Prof. Dr. Matthias Busse

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM

I. Zusammenfassende Darstellung

1. Aufgabenstellung

Wesentliches Ziel dieses Teilprojekts war die Integration der Fraunhofer-Prototypen für Batteriesystem, Ladeinfrastruktur sowie Fahrzeugsteuerung und -antrieb in einem Gesamtfahrzeug. Zu diesem Zweck wurden zwei Demonstratorfahrzeuge Frecc0 1.0 und Frecc0 2.0 aufgebaut. Diese Fahrzeuge ermöglichten die Darstellung des Zusammenwirkens aller Einzelkomponenten und die Erprobung der Hardware unter den realen Umgebungsbedingungen im Gesamtsystem Elektrofahrzeug. Insbesondere die Bewertung des Fahrverhaltens eines Fahrzeuges mit Radnabenmotoren war ein wichtiger Aspekt bei der Erprobung. Die Konzeptionierung als Fahrzeug mit Mehrmotorenantrieb ermöglichte unter anderem die Umsetzung von fahrdynamischen Regelsystemen mit einer asymmetrischen Drehmomentverteilung an der Hinterachse.

Im Fahrzeug Frecc0 1.0 kamen am Markt verfügbare, meist prototypische Komponenten zum Einsatz, wobei als Antriebskonzept radnahe, getriebeübersetzte Antriebsmotoren verwendet wurden. Dies ermöglicht einen späteren, direkten Vergleich der konkurrierenden Antriebskonzepte »radnaher Motor« und »Radnabenmotor« für zukünftige Generationen von Elektrofahrzeugen. Batteriesystem und Ladeinfrastruktur wurden ebenfalls mit marktverfügbarer Technologie umgesetzt.

Der Demonstrator Frecc0 2.0 basierte auf den innerhalb der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität entwickelten Komponenten. Hierzu zählten die entwickelten Radnabenmotoren, das Batteriesystem sowie ein On-Board-Ladegerät und ein externes Schnellladegerät. Die Kommunikation der Komponenten untereinander, die Anbindung an das Basisfahrzeug und die Darstellung der relevanten Daten auf einem Anzeigeelement wurden ebenfalls mit Fraunhofer eigenen Lösungen realisiert.

Gegenüber anderen prototypischen Demonstratorfahrzeugen von Universitäten, Forschungsstellen oder der Industrie in Deutschland zeichnen sich die beiden Frecc0-Versionen durch eine Reihe von Besonderheiten aus. Erstmals kann ein Antriebskonzept mit Radnabenmotoren detailliert und im direkten Vergleich mit einem radnahen Antriebskonzept bewertet werden. Hierzu zählt auch die Erprobung des Fahrverhaltens bei einer ungleichen Drehmomentverteilung an den Antriebsrädern. Die umfangreiche Ladeinfrastruktur in Frecc0 2.0 ermöglicht zudem eine umfassende Netzintegration und die praktische Erprobung eines Schnellladekonzepts.

Innerhalb des Teilprojekts wurde zur Bearbeitung der anstehenden Aufgaben ein »Frecc0-Entwicklungsteam« aus mehreren Fraunhofer-Instituten gebildet. Im Einzelnen wurden folgende Teilaufgaben bearbeitet, die nachfolgend detailliert dargestellt werden:

- Konzepterstellung und Detailspezifikation der Demonstratorfahrzeuge, Abstimmung der technischen Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten, Koordination des Fahrzeugaufbaus insbesondere mit dem OEM-neutralen Partner, Projektmanagement (Fraunhofer IFAM)
- Entwicklung einer komponentenübergreifenden sicheren Fahrzeugsteuerung (Fraunhofer ESK)
- »Package« der Komponenten (geometrische Integration von Komponenten und deren Haltern in den zur Verfügung stehenden Bauraum) im Fahrzeug und Integration in das Demonstratorfahrzeug (Fraunhofer LBF)

- Bewertung der Funktionalen Sicherheit und Durchführung von FMEA für die wesentlichen Komponenten sowie für das Gesamtsystem Fahrzeug (Fraunhofer LBF)
- Entwicklung und Fertigung einer Hochvolt-Anschlussbox mit integrierter Zwischenkreisvorladung (Fraunhofer IISB)

Die Aufgabenstellung für das Fraunhofer ESK umfasste hier die funktionale Integration der Fraunhofer-Komponenten in die Prototypen-Fahrzeugen Frecc0 1.0 und 2.0 inkl. des gesamten Entwurfs des Daten-Bordnetzes, sowie die Erstellung einer funktional sicheren Fahrzeugsteuerung. Zusätzlich wurde das vollgraphische Kombiinstrument erstellt sowie die Software zur Ansteuerung der Nebenaggregate wie Kühlmittelpumpen, Lüfter, Zwischenkreisvorladung etc. entwickelt. Zur funktionalen Absicherung wurden Empfehlungen der künftigen Norm ISO 26262 herangezogen. Bei der Integration und der Erstellung des Daten-Bordnetzes wurde auf das Know-How der Fraunhofer ESK aufgebaut.

Das Fraunhofer LBF hat die Komponentenentwicklung für den Frecc0 2.0 im Hinblick auf eine reibungslose Integration im Fahrzeug wesentlich unterstützt. Insbesondere wurden Aufgabenumfänge hinsichtlich der Fahrwerksauslegung und Simulation sowie des Package der Radnabenmotoren im Demonstratorfahrzeug wahrgenommen.

Ebenfalls durch das Fraunhofer LBF wurde die Funktionale Sicherheit einzelner Komponenten betrachtet und bewertet. Hierfür wurden im Rahmen von Gefahren- und Risikoanalysen und Fehlermöglichkeits- und -einflußanalysen (FMEA) einzelne Komponenten sowie das Gesamtsystem des Demonstratorfahrzeugs hinsichtlich möglicher Fehler und deren Kritikalität bzw. Kontrollierbarkeit durch den Fahrer betrachtet.

Das Fraunhofer IISB hat die Entwicklung und Fertigung einer zentralen Anschlussbox für alle Komponenten des Hochvolt-Bordnetzes im Frecc0 2.0 übernommen. Neben der notwendigen Isolationssicherheit für die gewählte Spannungslage war dabei auch eine Zwischenkreisvorladung im Bauraum der Anschlussbox mit entsprechendem Vorladeschutz zu entwickeln.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

In der Tabelle 1 ist die im Antrag formulierte Zeitplanung dargestellt. Während der Feinspezifikation und insbesondere während der Bearbeitung des Projekts haben sich an dieser überschlägigen Planung aufgrund inhaltlicher und zeitlicher Abhängigkeiten, Verzögerungen und Änderungen ergeben, die jedoch den Projekterfolg im Ergebnis nicht nennenswert beeinträchtigt haben.

Tabelle 1: Projektzeitplanung gemäß Antrag

	2009			2010				2011	
	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
AP1 Konzepterstellung									
AP2 Lastenheft									
AP3 Modellsimulation									
AP4 Aufbau/Integration									
AP5 Prüfung									
AP6 Koordination									
	M1			MZ				M2	

Der Meilenstein M1 (Abschluss des Vertrags über den Fahrzeugaufbau) konnte in dieser Form zunächst nicht eingehalten werden, da trotz intensiver Verhandlungen mit potenziellen Auftragnehmern hier mit dem zur Verfügung stehenden Budget und in Anbetracht der knappen Projektlaufzeit zunächst kein erfolgreicher Abschluss erzielt werden konnte. Im 4. Quartal 2010 konnte aber aufgrund einer veränderten Situation beim Hersteller des ausgewählten Basisfahrzeugs Artega GT der Aufbau der Demonstratorfahrzeuge direkt mit Artega Automobil GmbH erfolgreich verhandelt und vertraglich abgeschlossen werden. Inhaltlich hatte dieser zeitliche Aufschub im positiven Sinne dazu geführt, dass einerseits nicht nur die Spezifikationen und Schnittstellen der Fraunhofer-Komponenten seitens aller beteiligten Partner besser verstanden wurden und damit auch genauer und zielführender abgestimmt werden konnten. Andererseits verfügt lediglich Artega als Hersteller über so viele Detailkenntnisse und umfangreiche Daten über das Basisfahrzeug, dass dadurch die Konstruktion und der Aufbau der Demonstratorfahrzeuge erheblich beschleunigt werden konnte. Auf diese Weise wurde der Zeitverzug gegenüber der ursprünglichen Planung mehr als kompensiert.

Der zentrale Meilenstein MZ diente dazu, alle Fraunhofer-Komponenten für die Demonstratorfahrzeuge soweit zu entwickeln, dass eine zeitgerechte Integration ins Fahrzeug möglich ist. Dies wurde durch die Teilprojektleitung vorbereitet und dem FSEM-Lenkkreis im Sommer 2010 erfolgreich präsentiert.

Der Meilenstein M2 konnte aufgrund von Verzögerungen in der Bereitstellung aller Komponenten insbesondere für den Frecc0 2.0 erst zum Juli 2011 erreicht werden.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

In den vergangenen Jahrzehnten wurden seitens der Automobilhersteller immer wieder Konzept- und Demonstratorfahrzeuge mit Elektroantrieb und unterschiedlichsten Energiespeicher-Typen vorgestellt. Auch Universitäten und andere Forschungsstellen in Deutschland können auf erfolgreiche Präsentationen von entsprechenden Fahrzeugen verweisen, die u.a. für Forschungs- und Entwicklungsprojekte eingesetzt wurden und werden. Bei den in Realität umgesetzten Demonstratoren handelte es sich dabei meist um auf bestehenden Fahrzeugkonzepten basierende Prototypen, um den Aufwand (bspw. für die Fahrzeugsteuerung und nicht elektrofahrzeugspezifische Komponenten) möglichst gering zu halten. Von einem einheitlichen »Stand der Technik« im klassischen Sinn kann man hier jedoch

nicht sprechen, da sich die verschiedenen Fahrzeugkonzepte doch zu sehr unterscheiden und zudem unter ganz unterschiedlichen Prämissen bzw. Zielrichtungen aufgebaut wurden.

Zu Beginn der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität waren dennoch kaum aktuelle PKW-Demonstratorfahrzeuge mit Elektroantrieb in der Öffentlichkeit präsentiert und im Detail vorgestellt, die explizit auf einen Antrieb des Fahrzeugs mit mehreren Motoren zielen. Insbesondere erfolgreich umgesetzte Prototypen und Demonstratoren mit kompakten Radnabenmotorantrieben mit hoher Leistungs- und Drehmomentdichte waren nicht in dieser Form verfügbar. In diese Lücke stoßen die Demonstratoren Frecc0 1.0 und 2.0, indem diese sowohl ein Antriebskonzept mit zwei karosseriefesten radnahen Elektroantriebsmaschinen umsetzen als auch mit dem Frecc0 2.0 ein Fahrzeug mit Radnabenmotoren. Grundlage für beide Fahrzeuge bildeten vormals mit Verbrennungsmotor angetriebene Vorserienfahrzeuge Artega GT, welche auf Elektroantrieb umgebaut wurden. Dabei konnte erfolgreich auf die detaillierten Kenntnisse der Herstellers Artega über das Fahrzeug und die sehr gut für die Elektrifizierung geeignete Basis des Artega GT zurückgegriffen und aufgebaut werden.

4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Während des Vorhabens wurden kontinuierlich Informationsrecherchen im Sinne Nr. 6.1 NKBF 98 durchgeführt. Darüber hinaus wurde im Rahmen zahlreicher Messe- und Kongressbesuche (u.a. eCarTec München (2009), VDI-Kongress Elektromobilität Leipzig (2010), Elektromobilitäts-Kongress Bonn (2010), Hannover-Messe Industrie (2010)) eine kontinuierliche inhaltliche Diskussion mit den Aktivitäten anderer Forschungsstellen und auch der Automobilhersteller geführt.

Für die Bearbeitung der Aufgaben innerhalb dieses Teilprojekts wurde unterschiedlichste Fachliteratur verwendet, die nachfolgend als Auszug dargestellt ist:

- [1] VDE (Hrsg.): VDE-Studie Elektrofahrzeuge – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. VDE (2010)
- [2] Heissing, B., Ersoy, M. (Hrsg.): Fahrwerkhandbuch. Vieweg (2007)
- [3] ITS Niedersachsen (Hrsg.): Hybrid Vehicles, Electric Vehicles and Energy Management (Tagungsband). ITS Niedersachsen (2010)
- [4] Reif, Konrad: Automobilelektronik. Vieweg+Teubner (2009)
- [5] International Organization for Standardization, Draft International Standard ISO/DIS 26262 – Road vehicles – Functional safety – Part 1-10 (2009)

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Abstimmung der technischen Schnittstellen und Funktionen, zur Integration der Fahrzeugkomponenten sowie deren funktionalen Absicherung wurde mit folgenden Fraunhofer-Instituten, die die wesentlichen Komponenten für den Frecc0 2.0 aus der FSEM heraus entwickeln, intensiv zusammengearbeitet:

- Radnabenmotoren [IFAM]
- Energie- und Batteriemangement [ISE]
- Lademanagement [IIS]
- On-Board Ladegerät (AC) [IISB]

- Externes Ladegerät (DC) [ISE]
- Prototypen-Entwicklung (Frecc0 1.0 und 2.0) [IFAM, ISE, IIS, IISB, ISE, LBF]

Dieses Teilprojekt interagierte dabei sehr eng mit anderen Schwerpunkten, da es deren Kompetenzen bündelt und in das Prototypenfahrzeug Frecc0 einfließen lässt; dies ist in nachfolgendem Bild 1 dargestellt.

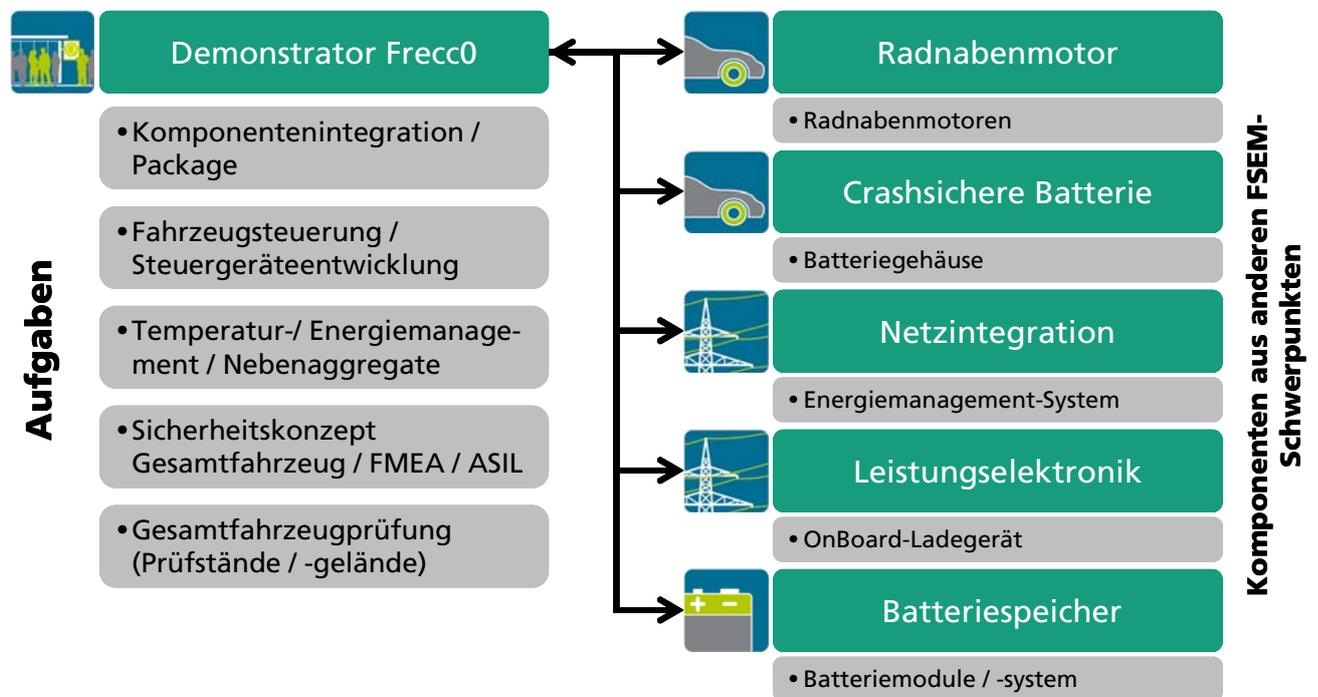


Bild 1: Vernetzung dieses Teilprojektes mit anderen Teilprojekten innerhalb der FSEM

Konkrete Beispiele für diese Vernetzung innerhalb der FSEM sind:

Schwerpunkt »Fahrzeugkonzepte« Teilprojekt »Radnabenmotor«

- Integration des Motors in das Fahrzeug. Hierzu mussten die Schnittstellen des Motors und des Fahrzeuges aufeinander abgestimmt werden. Teilweise waren sogar Modifikationen am Radnabenmotor erforderlich, die in Abstimmung mit dem Teilprojekt veranlasst wurden.
- Aufbereitung der Fahrbetriebsmessungen mit dem Erprobungsträger Artega GT zu Radlastkollektiven für die Erprobung der Radnabenmotoren in der Radprüfeinrichtung W/ALT sowie Last-Zeitreihen für die numerische Betriebsfestigkeitsrechnung der Motoren.

Schwerpunkt »Fahrzeugkonzepte« Teilprojekt »Crashsichere Batterie«

- Zum Einbau der Batterie in das Fahrzeug musste der Bauraum abgeschätzt sowie die Schnittstellen zur Batterie definiert werden. Hierzu waren intensive Abstimmungen mit den anderen Teilprojekten erforderlich.
- Überprüfung der Lastannahmen für das Batteriesystem anhand der Ergebnisse aus den Fahrbetriebsmessungen sowie das Einfahren von Norm-Fahrevents zum Abgleich der numerischen Fahrzeugmodelle.

II. Erweiterte Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzieltes Ergebnis im Einzelnen

Aufbau der Demonstratorfahrzeuge Frecc0 / Projektmanagement

Während der Bearbeitung der anstehenden Aufgaben innerhalb des Teilprojekts wurde die Projektleitung vom Fraunhofer IFAM wahrgenommen. In Abstimmung mit allen Partnern, die im Rahmen der FSEM Komponenten für die Frecc0-Demonstratoren entwickelt haben, wurde unter den im Antrag dargestellten Zielvorgaben ein detailliertes Konzept für die Demonstratoren entwickelt. Hierfür wurde zunächst eine geeignete technische Basis nach unterschiedlichen Kriterien gesucht. Aufgrund seiner OEM-Neutralität und der konstruktiven Ausführung des Fahrzeugs (z.B. einfach anpassbarer Gitterrohrrahmen als Aggregateträger im Heckbereich, moderne Bordvernetzung) hat sich hier der Artega GT der Artega Automobil GmbH, Delbrück als besonders geeignet erwiesen. Das angestrebte Fahrzeugkonzept umfasst mit dem Frecc0 1.0 und dem Frecc0 2.0 zwei Varianten mit unterschiedlichen Antriebskonzepten und Batteriesystemen. Während der Frecc0 1.0 in wesentlichen Teilen auf (prototypischen) am Markt verfügbaren Komponenten basiert, wurden im Frecc0 2.0 von den an der FSEM beteiligten Fraunhofer-Instituten entwickelte Komponenten verwendet.

Um die geeignete Einbindung der Komponenten im Fahrzeug zu gewährleisten, wurden im Rahmen einer Detailspezifikation einzelne Leistungsdaten und Randbedingungen sowie die notwendigen technischen Schnittstellen (z.B. im Hinblick auf die Fahrzeugsteuerung oder den benötigten Bauraum) gemeinsam mit den beteiligten Partnern abgestimmt und nötigenfalls das Konzept für die Demonstratorfahrzeuge angepasst. Weiterhin wurden gemeinsam mit dem OEM-neutralen Partner geeignete Spezifikationen für notwendige Nebenaggregate wie z.B. Innenraumheizung, Unterdruckpumpe für den Bremskraftverstärker oder Kühlmittelpumpen erarbeitet und deren Schnittstellen für eine geeignete Ansteuerung im Fahrzeug beschrieben. Das Bild 2 zeigt das Systemschema für den Frecc0 2.0 mit den verschiedenen Abhängigkeiten und Schnittstellen.

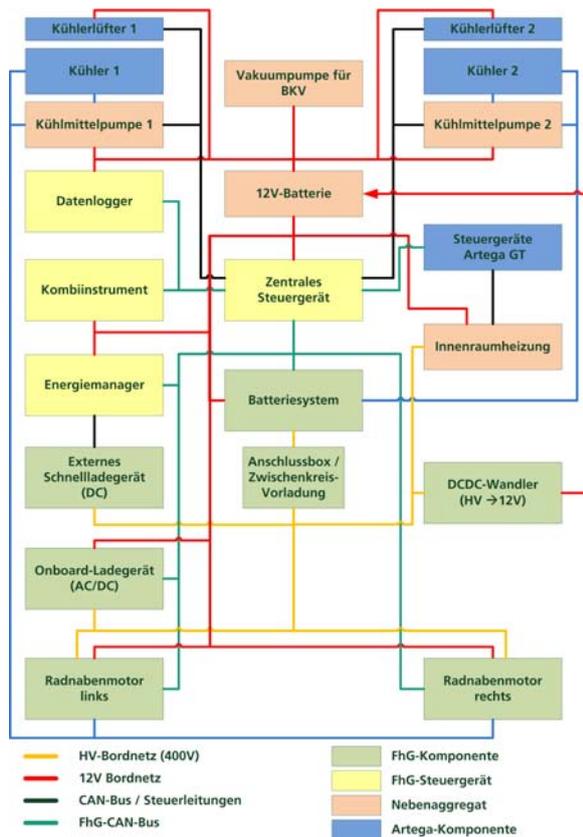


Bild 2: Systemschema des Demonstratorfahrzeugs Frecc0 2.0

Eine weitere wichtige Aufgabe lag in der Koordination des Fahrzeugaufbaus und der Auswahl und Beauftragung des OEM-neutralen Partners. Hier konnte eine direkte Zusammenarbeit mit dem Hersteller des Basisfahrzeugs, der Artega Automobil GmbH, erreicht werden. Wesentliche Arbeitspunkte waren hier die Erarbeitung und Abstimmung einer Zeitplanung für den Aufbau der Fahrzeuge, die Planung und konstruktive Umsetzung der notwendigen Änderungen am Fahrzeug (z.B. bei Frecc0 1.0 die Anpassung des Aggregateträgers an die Erfordernisse des Batteriesystems) und die kontinuierlich anfallende Abstimmung mit den beteiligten Fraunhofer-Instituten. Weiterhin waren z.B. bei Frecc0 2.0 umfangreiche Änderungen am Fahrwerk der Hinterachse notwendig, um die Fraunhofer-Radnabenmotoren unter Beibehaltung einer mechanischen Bremse und kinematisch gegenüber dem Serienstand unverändertem fahrdynamischen Verhalten des Fahrzeugs im verfügbaren Bauraum zu realisieren. Dies konnte federführend durch Artega in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer LBF und dem Fraunhofer IFAM erreicht und im Fahrzeug umgesetzt werden.

Letztlich wurde auch das Projektmanagement innerhalb des Teilprojekts durch das Fraunhofer IFAM wahrgenommen. Dies betraf beispielsweise den Aufbau des »Frecc0-Entwicklungsteams«, welches sich aus Mitarbeitern verschiedener Institute interdisziplinär zusammensetzt. Nicht zuletzt wurde auch die FSEM-Abschlussveranstaltung auf dem ATP-Prüfgelände in Papenburg vom Fraunhofer IFAM gemeinsam mit dem Fraunhofer LBF und der Fraunhofer-Zentrale organisiert. In diesem Rahmen wurden die beiden Demonstratorfahrzeuge Frecc0 1.0 und Frecc0 2.0 öffentlich vorgestellt und in Fahrt vorgeführt (siehe Bild 3).



Bild 3: Präsentation der Demonstratorfahrzeuge Frecc0 1.0 und 2.0 in Fahrt

Entwicklung einer komponentenübergreifenden sicheren Fahrzeugsteuerung

Im Rahmen dieser Teilaufgabe wurde auf Basis der vom Fraunhofer ESK entwickelten »Artis-Box« ein Zentrales Steuergerät (ZSG) zur Fahrzeugsteuerung bei Frecc0 1.0 und 2.0 definiert und realisiert. Hierzu gehörte u.a. die funktionale Umsetzung und Programmierung entsprechender Software zur Interpretation des Fahrerwunsches (z.B. Fahrpedalstellung, Bremsen, Wählhebelstellung, Fahrzeugstatus), die Interaktion mit angebotenen Fraunhofer-Komponenten und Drehmomentenberechnung und Übermittlung an die Motoren. Das Bild 4 zeigt anhand der Momentensteuerung der Fraunhofer-Radnabenmotoren ein Beispiel für die Interaktion der einzelnen Komponenten und Signale auf. Zusätzlich wurde die Ansteuerung der Nebenaggregate wie z.B. Steuerung der Kühlmittelpumpen und Bedienung der Zwischenkreisvorladung realisiert. Darüber hinaus wurde ein Fahrzeug-Zustandsmanagement für Prototypenfahrzeuge Frecc0 1.0 und 2.0 definiert.

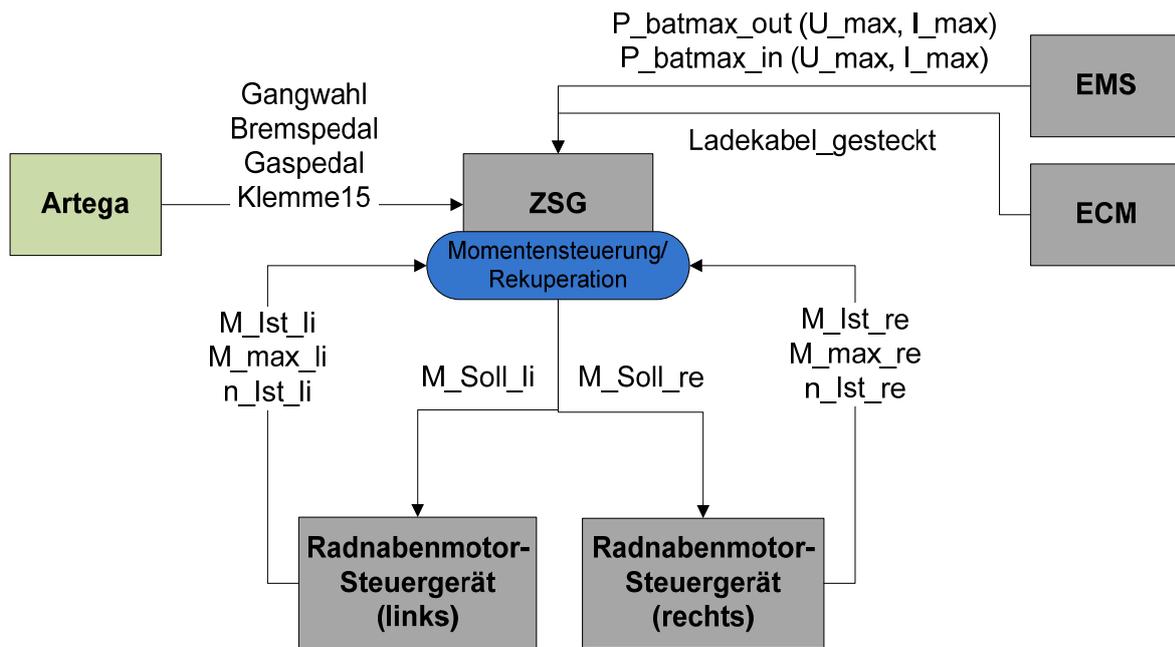


Bild 4: Momentsteuerung der Radnabenmotoren als Beispiel für komponentenübergreifende Funktionen auf Zentralem Steuergerät

Im Hinblick auf die Einbindung der Komponenten in das Datenbordnetz (v.a. bestehende CAN-Bussysteme im Basisfahrzeug) wurden die Schnittstellen zu den bestehenden Fahrzeugkomponenten und neu integrierten FhG-Komponenten definiert. Hierbei wurde ein modularer Aufbau durch Implementierung eines eigenen Fraunhofer-CAN-Bus zur Vernetzung aller Fraunhofer-Komponenten unter Nutzung eines Zentralen Steuergeräts (ZSG) erreicht. Hierfür war es u.a. nötig, eine Integration des bestehenden Basisfahrzeug-Bordnetzes in Frecc0 1.0 und 2.0 durchzuführen, um die notwendigen Fahrzeugdaten zu empfangen und einen fehlerfreien Betrieb der bestehenden Fahrzeugkomponenten zu realisieren. Beispielsweise wurden hier für den sicheren Weiterbetrieb des Fahrzeugs weiterhin notwendige CAN-Botschaften im Rahmen der Umrüstung weggefallener Steuergeräte (z.B. Motorsteuergerät) seitens des ZSGs zyklisch gesendet. Ebenso wurde ein Überwachungsrechner für das ZSG definiert und umgesetzt. Zur Darstellung elektrofahrzeugspezifischer Fahrerinformations- und Anzeigeelemente wurde eine Kombiinstrument-Software mit entsprechendem Design für Frecc0 1.0 und 2.0 entwickelt und aufbauend auf bestehender Hardware im Artega GT umgesetzt.

Hinsichtlich der Entwicklung der Software für die Steuergeräte wurde ein MatLab/Simulink Simulations- und Code-Generierungsframework für Frecc0 2.0 umgesetzt, welches eine deutlich vereinfachte Entwicklung ermöglichte. Weiterhin wurde eine komponentenübergreifende Entwicklungsverwaltung auf SVN-Basis implementiert, die die kooperative Entwicklung und Versionsverwaltung aller Entwicklungszweige maßgeblich unterstützt hat.

Package der Komponenten und Fahrzeugintegration

Package der Radnabenmotoren

Im Bereich Package Radnabenmotoren wurden verschiedene, teilweise Schwerpunkt- und Teilprojektübergreifende Fragestellungen untersucht. Das Frecc0-Team fungierte hierbei als Koordinator, der bei auftretenden Problemen die fachlichen Expertisen der Teilprojekt-Verantwortlichen sammelte und daraus Lösungskonzepte entwickelte.

Ein Bestandteil dieser Arbeiten waren beispielsweise Betrachtungen zum Fügen von verschiedenen Materialpaarungen des Radnabenmotors (Aluminium, Stahl), da diese im Betrieb durch die auftretenden Temperaturwechsel starken mechanischen Beanspruchungen unterliegen.

Ein weiterer Aspekt betraf die Integration der ABS-Sensorik in den Frecc0 2.0. Aufgrund der baulichen Gegebenheiten konnte die Sensoreinheit aus dem Artega hier nicht verwendet werden. Um die ABS-Funktion des Artega auch im Frecc0 gewährleisten zu können, musste eine neue Sensorlösung mit identischer Signalmatrix erdacht und in das Package integriert werden. Bild 5 zeigt in grün die Montageposition der entwickelten Magnet-Sensorscheibe. Der Sensor ist in den Flansch zur Bremsscheibenmontage integriert und kommt so ohne zusätzliche Komponenten aus.

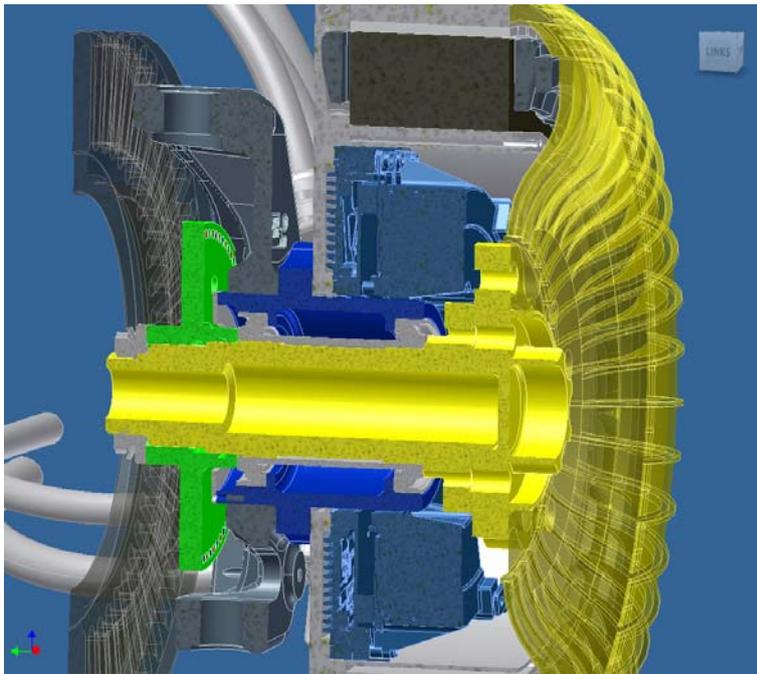


Bild 5: Montageposition der ABS-Sensorik (grün) im Radnabenmotor Package

Koordination der Komponentenentwicklung für den Frecc0 2.0

Im Verlauf des Projektes wurden durch das Frecc0-Team Gesamtentwicklertreffen veranstaltet. In diesen Treffen wurde die Interaktion der Frecc0-Komponenten besprochen sowie »Gefahren und Risikoanalysen« der Komponenten durchgeführt. Die Treffen sorgten für eine engere Vernetzung der verantwortlichen Entwicklungsingenieure und trugen so wesentlich zu einer effizienten Arbeitsweise bei.

Räderprüfung

Für den Frecc0 2.0 wurden durch Artega spezielle Räder auf Basis des Standard Artega-Felge entwickelt. Diese weisen eine besonders große Einpresstiefe auf, so dass der Radnabenmotor ohne Veränderung der Spurbreite und ohne kinematische Änderungen an der Achsaufhängung montiert werden kann. Für diese neu entwickelten Räder sind Freigabeprüfungen erforderlich, die in Abstimmung mit dem Radhersteller und dem OEM-neutralen Partner am Fraunhofer LBF durchgeführt wurden.

Funktionale Sicherheit und Durchführung von FMEA

Wesentliches Ziel dieser Teilaufgabe sind die Durchführung von ASIL (Automotive Safety Integrity Level)- und FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einfluss – Analyse)-Bewertungen an den Frecc0-Komponenten. Hierzu wurde ein Gesamtentwicklertreffen mit allen an dem Demonstratorfahrzeug beteiligten Gruppen veranstaltet. Dabei wurde in der Gesamtgruppe die Risikobeurteilung nach den normativen Vorgaben der ISO DIS 26262 erstellt. Im Weiteren wurden FMEA-Analysen durchgeführt, deren Bezugsrahmen das Antriebssystem des Demonstratorfahrzeugs waren. Beispielhaft ist in Bild 6 ein Ausschnitt aus der Systemstruktur des Frecc0 2.0 dargestellt, aus welchem die einzelnen Komponenten und (Software-) Funktionen hervorgehen.

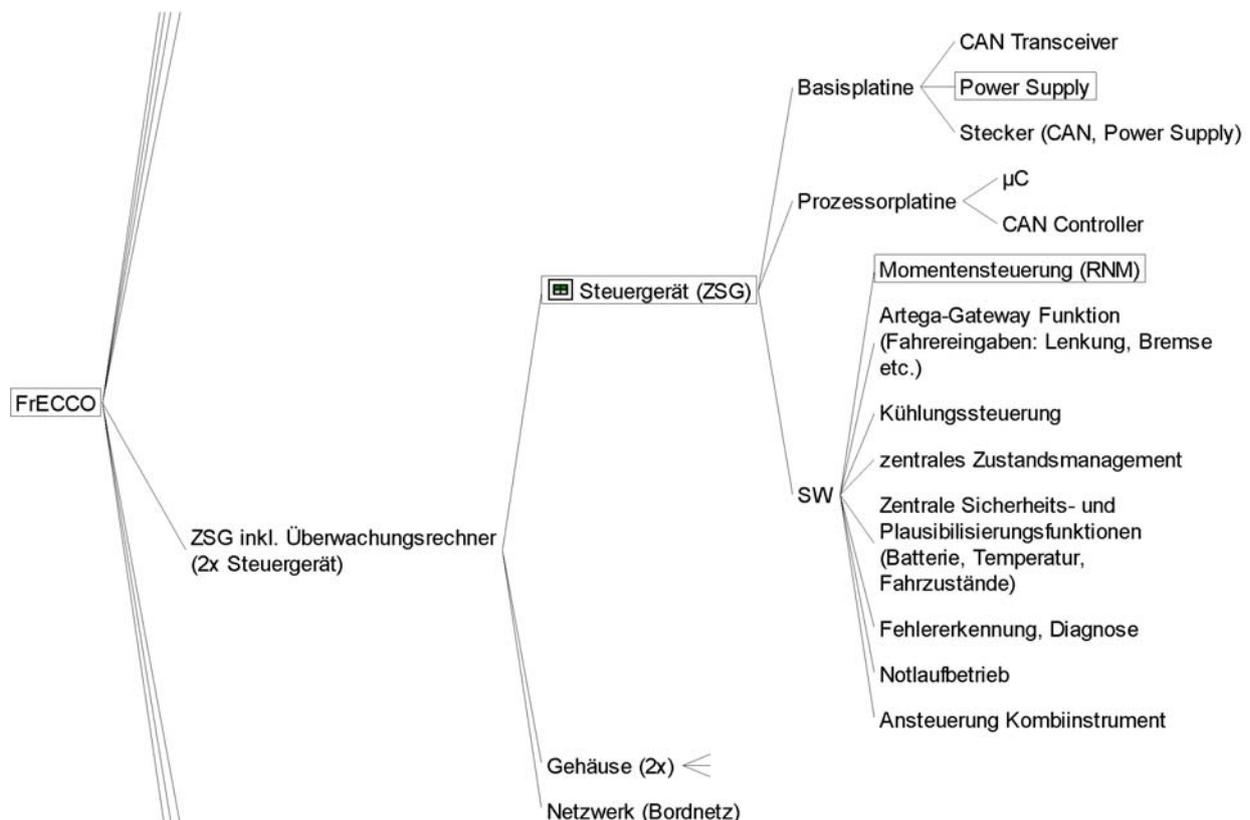


Bild 6: Ausschnitt aus der Systemstruktur des Frecc0 2.0

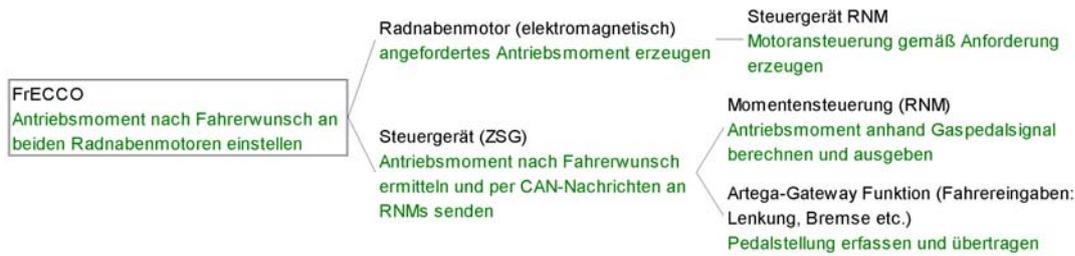
So erfolgte eine detaillierte Fehleranalyse zum Zentralsteuergerät in mehrtägigen Analysesitzungen unter Beteiligung des Fraunhofer ESK und LBF. Dergleichen erfolgte in Zusammenarbeit zwischen Fraunhofer IFAM und LBF im Bezug auf den Radnabenmotor sowohl in Anwendung auf die mechanischen als auch auf elektrische bzw. elektronische Sachverhalte. Im Rahmen methodischer Betrachtungen der im System implementierten Anforderungen und Funktionen, sowie im Bezug darauf anzunehmende Abweichungen durch Spezifikationsfehler und Fehlzustände von Komponenten im Betrieb verhalfen zu einer Vergewisserung bezüglich der gewählten Systemdetaillierung und zeigte für manche Sachverhalte Änderungs- bzw. Abstimmungsbedarf auf. Zusätzlich ergab sich aus der systematischen Überprüfung von Entdeckungsmöglichkeiten ein Beitrag der notwendigen Kriterien und Strategien, um bei der Systemintegration dessen korrekte Funktion nachzuweisen.

Formblatt-Editor VDA 96 / VDA 06: Steuergerät (ZSG) (FSEM FrECCO [System])										
Fehlerfolge	B	K	Fehlerart	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	V/T
zu starkes Beschleunigen	10		zu hohe Drehmomente an RNMs übermittelt (asymmetrisch)	zu hohes Antriebsmoment berechnet	Maßnahmenstand - Anfang: 23.09.2010					
Beschleunigung um Hochachse (Gieren des Fahrzeugs)	10				Maßnahmenstand: 23.09.2010			10	1000	
					Berechnung anhand von Gaspedalstellung	3		10	(300)	Heinrich 15.01.2011 Simulationsprototyp alle Funktionsblöcke <input type="checkbox"/> in Umsetzung
					CRC-Prüfsumme					
					Nachrichtenzähler zur Überwachung der Nachrichtenaktualität durch RNMs					
					Maßnahmenstand: 23.09.2010					
					Verifikationstests der Motoransteuerung	3		3	(90)	Heinrich 31.03.2011 Einzelkomponentenintegration <input type="checkbox"/> in Umsetzung
					Maßnahmenstand: 23.09.2010					
					Plausibilisierung durch diversitär aufgebaute SW in Überwachungsrechner	2	Test durch Fehlereinbau: Wirksamkeit der Fehlervermeidung durch Überwachungsrechner	2	(40)	Langer 31.03.2011 Einzelkomponentenintegration <input type="checkbox"/> in Umsetzung
					Maßnahmenstand - Anfang: 23.09.2010					
				unterschiedliche Momente für RNMs herausgegeben				10	1000	

Bild 7: Formblatt zur FMEA-Durchführung

Wesentliches Ergebnis dieser systematischen Betrachtungen ist die Auflistung kritischer Fehlerfälle in den einzelnen Komponenten des Demonstratorfahrzeugs FrECCO und die sich daraus ergebenden Folgen für den Benutzer des Fahrzeugs. Ebenso werden auch Maßnahmen zur Fehlererkennung und zur Vermeidung des Auftretens erfasst (siehe Bild 7). Daraus resultieren dann sowohl detaillierte Funktionsbeschreibungen wie auch Darstellungen der auftretenden Fehlermöglichkeiten. In Bild 8 ist ein Funktionsnetz am Beispiel der Berechnung und Einstellung des Antriebsmomentes an den Radnabenmotoren sowie ein Fehlernetz bei Auftreten eines Moments um die Hochachse des Fahrzeugs beispielsweise in Folge unterschiedlich eingestellter Antriebsmomente an beiden Radnabenmotoren dargestellt.

Funktionsnetz – Antriebsmoment einstellen



Fehlernetz – Gieren des Fahrzeugs um die Hochachse



Bild 8: Beispiele für Funktions- und Fehlernetze

FMEAs wurden für die Komponenten Zentralsteuergerät und Radnabenmotor einschließlich dessen Steuergeräte mit Leistungselektronik durchgeführt. Als Ergebnis liegen die FMEA-Datenbestände vor. Ebenso existieren Gefährdungsanalysen und -klassifikationen (ASIL-Klassifizierung) für das Gesamtfahrzeug einschließlich des Batteriesystems und der Ladeelektronik bzw. -elektrik.

Hochvolt-Anschlussbox mit integrierter Zwischenkreisvorladung

Die Spezifikation der Anschlussbox wurde gemeinsam vom Fraunhofer IISB und dem Fraunhofer IFAM erarbeitet. Wesentliche Aufgabe der Anschlussbox ist die sichere Bereitstellung des Hochvolt-Bordnetzes mit einer Betriebsspannung von 400 V im Demonstratorfahrzeug Frecc0 2.0. Insbesondere war es erforderlich, in die Anschlussbox eine Zwischenkreisvorladung zu integrieren, die während des Aufstartvorgangs des Fahrzeugs eine geordnete und sichere Vorladung der Zwischenkreiskondensatoren in den einzelnen Komponenten ermöglicht. Entsprechend dieser Spezifikation wurde die Hochvolt-Anschlussbox durch das Fraunhofer IISB konstruiert, aufgebaut und getestet. Der Montageraum sowie die Befestigungspunkte wurden abgestimmt.

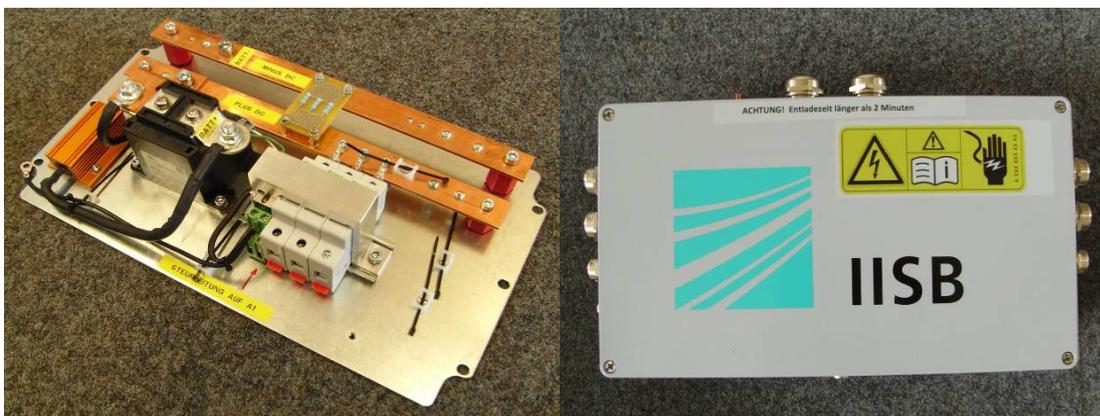


Bild 9: Montageplatte mit aufgebauten Komponenten (links), Gehäuse in einbaufertigem Zustand (rechts)

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Wesentliche Herausforderung für die beteiligten Fraunhofer-Institute und die Komponenten zuliefernden FSEM-Teilprojekte war, nicht nur isoliert eine einzelne Komponente in quasi idealer Umgebung (z.B. auf einem Prüfstand) in Betrieb zu nehmen und die Funktion zu demonstrieren, sondern insbesondere auch das komplexe Zusammenwirken im Systemzusammenhang eines fahrenden Fahrzeugs zu beherrschen. Hierfür waren speziell angepasste Lösungen erforderlich, die den Komplexitätsgrad technischer Lösungen im Rahmen von üblichen Forschungsarbeiten übertrafen.

Gerade die im Rahmen der Projektbearbeitung gewonnen Erkenntnisse und die erzielten Innovationen bieten jedoch ideale Voraussetzungen für die gemeinsame Bearbeitung von Forschungsprojekten sowohl mit nationalen wie internationalen Industriepartnern als auch in öffentlich geförderten Projekten auf dem Themengebiet der Elektromobilität. In diesem Sinne konnte das mit der Demonstration des Zusammenwirkens von Fraunhofer-Komponenten in einem Fahrzeug gesteckte Ziel für die Demonstratoren sehr gut erreicht und am fahrenden Fahrzeug demonstriert werden. Die Fahrzeuge selbst bieten mit dem erreichten Stand eine hervorragende Grundlage für die Nutzung in weiteren Projekten. Mögliche Themenstellungen liegen beispielsweise in der weiteren Bearbeitung elektrischer Antriebslösungen, der weiteren Detaillierung und praktischen Erprobung der Kritikalität und Beherrschbarkeit von Fehlerzuständen (z.B. ungleiche Drehmomentenverteilung bei Mehrmotorenantrieben, siehe Schwerpunkt »Funktion, Zuverlässigkeit, Prüfung u. Realisierung« Teilprojekt »Sicherheit und Zuverlässigkeit«) oder der weiteren Erhöhung von Zuverlässigkeit und Sicherheit von Komponenten für Elektrofahrzeuge.

Beispielhaft seien hier weitere Forschungsprojekte sowie Dienstleistungen aufgeführt, deren Beantragung und Umsetzung von den beteiligten Partnern vorangetrieben wurde bzw. wird:

- EU-Projekt »Smart Vehicle to Grid« (Projektstart Juni 2011)
- Antragsskizze für STROM2 »Sichere und Zuverlässige Elektroantriebe« (geplanter Projektbeginn Q1 2012)
- Antragsskizze für STROM2 »Energieeffizientes Daten-Bordnetz« (geplanter Projektbeginn Q1 2012)
- Antragsskizze für IKT für Elektromobilität »IKT für Elektroautos« (Abgabe noch offen)
- Antragsskizze für STROM 2 – Ausschreibung: »ZuSiEL – Zuverlässige und sichere Leistungselektronik für die Elektromobilität«. (geplanter Projektbeginn Q1 2012)
- Projekte zur Industrierberatung im Bereich FMEA / ASIL. Zeithorizont. Ist bereits während des laufenden Projekts erfolgt und ist ab sofort möglich.

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurden auf unterschiedlichen Messen und Präsentationen verschiedene Demonstratorfahrzeuge mit Elektroantrieb von der Automobilindustrie aber auch von anderen Forschungsstellen sowie von Universitäten vorgestellt. Ein Beispiel sind die Elektrofahrzeug-Prototypen aus dem Volkswagen Konzern (e-Up, Golf e-motion), der BMW-Gruppe (BMW i3 / i8) oder das MUTE der TU München. Diese Fahrzeuge zielen jedoch in eine (völlig) andere Richtung (z.B. klarer Fokus auf Serienanwendungen), als es die Demonstratoren der Fraunhofer-Gesellschaft darstellen.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11 NKBF.

- [1] Busse, M., Wöstmann, F.-J., Horch, F.: »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität«. Tagung 2. Deutscher Elektro-Mobil Kongress, Bonn, Juni 2010 (2010)
- [2] Horch, F.: »Fahrzeugkonzepte der FSEM: Frecc0 und AutoTram«, KONGRESS – Forum ElektroMobilität, Berlin, November 2010 (2010)
- [3] Nuffer, J.: »Systemzuverlässigkeit und funktionale Aspekte in der Elektromobilität«. Tagung Safe e-Mobility, Stuttgart, 2011 (2011)
- [4] Rauschenbach, M.: Bewertung von Sicherheit und Systemzuverlässigkeit durch ASIL und FMEA, Roadshow Forum Elektromobilität e.V., Darmstadt, 2011 (2011)
- [5] Rauschenbach, M.: Schwerpunkt »Funktion, Zuverlässigkeit, Prüfung u. Realisierung« Teilprojekt »Sicherheit und Zuverlässigkeit«: »Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen«, Sitzung des Industriebeirats der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität, Frankfurt Main, 2011 (2011)
- [6] 13.+14.10.2010: Präsentation der Projekt-Zwischenergebnisse bei der 4. VDI-Tagung »Baden-Baden Spezial«
- [7] 08.04.2011: Vortrag beim BiccNet Innovation Forum Embedded Systems 2011 »Elektrofahrzeuge – Eine neue Herausforderung für die E/E Architektur«
- [8] 28.09.2011: Roadshow »Forum E-Motion« bei der Fraunhofer ESK
- [9] 12.+13.10.2011: Präsentation der Projekt-Ergebnisse beim 15. Internationalen Kongress »Elektronik im Kraftfahrzeug« (VDI, Baden-Baden)



Teilprojekt

»Demonstrationsfahrzeug AutoTram«

Teilnehmende Fraunhofer-Institute: IVI, IISB, IML, IPK, ISC, IWM, IWS, LBF

Teilprojektleiter: Dr. Matthias Klingner

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

I. Zusammenfassende Darstellung

1. Aufgabenstellung

Die gegenwärtige Entwicklung von Hybridtechnologien aus elektrischen und verbrennungsmotorischen Antrieben stellt einen ersten, notwendigen Zwischenschritt des Übergangs zu vollelektrischen Antriebsträngen dar. Die durch Rekuperation von Bremsenergie erreichbare Kraftstoffeinsparung erweist sich in der automobilen Anwendung derzeit als eher gering und wird durch das Mehrgewicht der Fahrzeuge über längere Fahrstrecken häufig vollständig kompensiert. Anders in den Fahrzeugen des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), wo Haltepunkte und Kreuzungen zu häufigerem Abbremsen zwingen, wo auf vorgegebenen Streckenprofilen ein auf das Kennfeld des Motors abgestimmtes Energiemanagement deutlich höhere Kraftstoffeinsparungen ermöglicht und wo durch schnelle Nachladung der Energiespeicher an den Haltepunkten ein vollelektrischer Fahrmodus über längere Distanzen gewährleistet ist.

Eine derartige Zielstellung erfordert die Entwicklung von Traktionsspeichersystemen, die im Vergleich zur automobilen Anwendung eine größere Leistungsdichte aufweisen. Ein Entwicklungspfad beruht auf Dualspeichern, die sich aus Superkondensatoren (für Rekuperation und Schnellladevorgänge) sowie Lithium-Ionen Batterien (für Traktionsanwendungen) zusammensetzen. Besondere Demonstrationsziele bestehen in innovativen Technologieentwicklungen zu

- seriellen Hybridsystemen mit kompakten Antriebskomponenten in straßen- und schienengebundenen Nutzfahrzeugen,
- oberleitungsfreien, elektrischen BusBahnen für Personen- und Gütertransport,
- MicroCarriers für einen emissionsfreien Lieferverkehr auf der letzten Meile,
- hybriden elektrostatischen / elektrochemischen Energiespeichern für Traktionsanwendungen im Bereich schwerer straßen- und schienengebundener Nutzfahrzeuge,
- elektrostatischen Traktionsenergiespeichern mit höchster Leistungsdichte und Zyklfestigkeit,
- Schnellladetechnologien für Traktionsenergiespeicher,
- Dockingspeichersystemen für die Schnellladung von elektrostatischen Traktionsenergiespeichern,
- Kontaktsystemen für die galvanische Hochstromübertragung,
- GPS-basiertem Energiemanagement zur optimalen Nutzung der bordseitigen Energiespeicherressourcen,
- Magnetorheologischen Kupplungen für gesteuerte Drehmomentenübertragung und Schwingungsdämpfung in seriellen Hybridantrieben.

Szenarien für erfolgreiche Elektromobilitätsanwendungen lassen sich zudem für den innerstädtischen Lieferverkehr entwickeln. Auch hier gilt es, relativ kurze Transportdistanzen in einem bekannten Terrain möglichst emissionsfrei zu bewältigen. Die Zielstellung umfasst die Schnellladung der Energiespeicher während des Warenumschsags und erschließt damit den Einsatz derartiger Technologien für den elektrischen Lieferverkehr auf der »Letzten Meile«.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Planung: *vergleiche Berichtsteil »Präambel«*

Ablauf:

Folgende Abbildung stellt den zeitlichen Ablauf dieses Teilprojektes dar.

	2009			2010				2011	
	2.Q.	3.Q.	4.Q.	1.Q.	2.Q.	3.Q.	4.Q.	1.Q.	2.Q.
AP1 Spezifikation									
AP2 Ausbau/Integrationsarbeiten									
AP3 Sicherheitskonzept und -überwachung									
AP4 bis 11 Fraunhofer interne Technologie und Komponentenentwicklung									
AP12 Integration Micro-Carrier - AutoTram									
Betrieb und Unterhalt der AutoTram									
AP13 Demonstrator/Öffentlichkeitsarbeit									

Innerhalb dieses Teilprojektes bestanden die Meilensteine M1 (Monat 3): »Spezifikation« ist abgeschlossen« sowie der zentrale Meilenstein MZ (Monat 14): »Teiltechnologien soweit entwickelt, dass Umsetzung des Demonstrators realistisch ist«. Beide wurden nach den gegebenen Kriterien erfüllt.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Dass wesentliche Migrationspfade der Elektromobilität die Fahrzeugtechnologien des ÖPNV sowie der innerstädtischen Logistik einschließen, begründen nicht allein technische, sondern vor allem auch wirtschaftliche und ökologische Aspekte. So erweisen sich Investitions- und Betriebsaufwand beispielsweise für oberleitungsgebundene Schienenfahrzeuge als so erheblich, dass sich bereits heute die Einführung von speicherbasierten vollelektrischen Bussen auf geeigneten innerstädtischen Linien wirtschaftlich rechnet, zumindest wenn sich aus Gründen des Umweltschutzes dieselbetriebene Busse verbieten. Auch in der Bahntechnik deutet sich das Potenzial an, mit bordseitigen Hochleistungsenergiespeichern die Energieeffizienz leichter Stadt- und Straßenbahnen erheblich zu verbessern.

Der Aufbau des systemintegrierenden Technologieträgers und Demonstrators AutoTram® dient in erster Linie

- der wissenschaftlich-technischen Erprobung sowohl einzelner Komponenten als auch
- kompletter Systemlösungen zur Elektromobilität unter praxisrelevanten Einsatzbedingungen
- der koordinierten Entwicklung von Systemlösungen unter Beachtung konkreter Anwendungsaspekte, sowie
- der öffentlichkeitswirksamen Demonstration und Präsentation der Ergebnisse des Vorhabens.

Das Teilprojekt trägt darüber hinaus auch einen eigenständigen Bezug zu den förderpolitischen Zielen der Elektromobilitätsforschung. Auch wenn Leistungsanforderungen und Traktionsenergiebedarf in der Nutzfahrzeugtechnik in der Regel deutlich über denen der Automobiltechnik liegen, erweisen sich in den Nutzfahrzeugklassen die Beschränkungen bezüglich volumetrischer und gravimetrischer Leistungs- und Energiedichten der elektrischen Antriebsaggregate und Traktionsenergiespeicher als vergleichsweise gering. Die Implementierung von leistungsfähigen Brennstoffzellen- oder Batteriespeichersystemen in Transportfahrzeuge, Flurfördersysteme, Busse oder leichte Stadtbahnen beginnen sich daher bereits vielfach zum Stand der Technik zu entwickeln.

4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Während des Vorhabens wurden kontinuierlich Informationsrecherchen im Sinne Nr. 6.1 NKBF 98 durchgeführt.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

Die technische Spezifikation des Demonstrators einschließlich der Planung des Umbaus sowie der schrittweisen Erprobung erfolgte im AP 1 in Kooperation aller am Projekt beteiligten Fraunhofer-Institute. Alle sicherheitsrelevanten Veränderungen am Fahrzeug wurden durch externe autorisierte Ingenieurunternehmen und Fahrzeughersteller durchgeführt. Die fahrzeugseitige Implementierung und Erprobung der an den einzelnen Fraunhofer-Instituten entwickelten Technologien erfolgte in enger Kooperation zwischen den beteiligten Entwicklerteams.

Als Demonstratorfahrzeug diente die AutoTram (Bild 1) der praktischen Umsetzung und Darstellung der unterschiedlichen Teilaufgaben. Neben den Arbeitspaketen 1,2,3,10 und 13 die sich unmittelbar mit der Systemintegration und dem Ausbau der AutoTram zur Fraunhofer-Technologieplattform befassen, gliedert sich die Projektarbeit in diesem Teilprojekt in die weitgehend voneinander unabhängigen Arbeitsgruppen unter Beteiligung der genannten Institute:

- Arbeitsgruppe »Leistungselektronik« IISB,IVI (AP4)
- Arbeitsgruppe »Magnetorheologische Kupplung« ISC, LBF, IWM, IVI (AP5)

- Arbeitsgruppe »schnellladefähige Traktionsenergiespeicher« IWS, IVI (AP6,7,8,9)
- Arbeitsgruppe »MicroCarrier Systeme für die e-logistic« IPK, IML, IVI (AP11,12)

Daneben bestand eine intensive Kopplung mit Schwerpunkt »Energiespeichertechnik« Teilprojekt »Batteriesysteme«. Dieser Zusammenarbeit entsprangen Komponenten für den Lithium-Ionen Traktionsenergiespeicher der AutoTram.



Bild 1: Fraunhofer Technologieplattform AutoTram

II. Erweiterte Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis im Einzelnen

Das in zahlreiche Teilarbeitspakete gegliederte Forschungsvorhaben brachte eine Reihe innovativer ingenieurtechnischer Lösungen hervor, von denen hier insbesondere die Hochstromübertragung, ein Hochleistungswandler, neuartige Superkondensatoren, eine magnetorheologische Kupplung sowie ein Disponentenarbeitsplatz Eingang finden:

Dockingsystem für Schnellladevorgänge im ÖPNV-Linienverkehr

Die Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (FSEM) befasst sich mit elektrisch betriebenen Fahrzeugen, deren Energiespeicher aus einer Energieinfrastruktur »betankt« werden. Das »Andocken« und »Betanken« als ein schnelles und weitgehend **automatisiertes Nachladen des Fahrzeugenergiespeichers** während kurzer Halte an einer wegseitigen Nachlademöglichkeit erweist sich für alle Arten von Elektrofahrzeugen mit Energiespeichern als interessant. Insbesondere im ÖPNV, also z.B. bei Elektrobussen, bietet sich hierfür die Aufenthaltszeit an Haltestellen besonders an (vgl. Bilder 2 und 3).

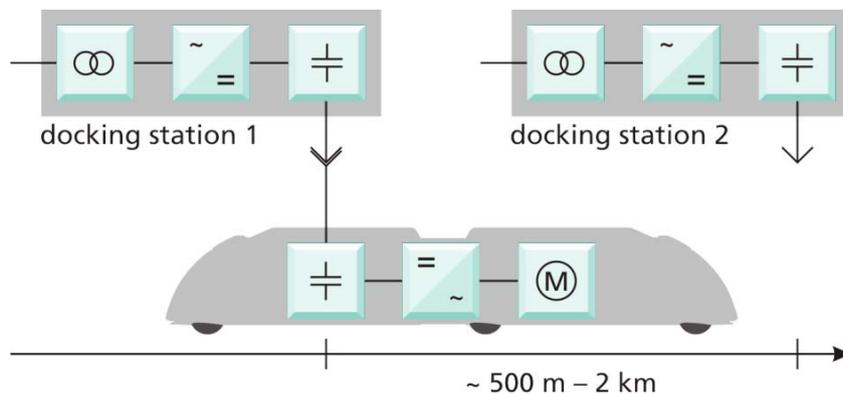


Bild 2: Dockingsystem für Schnellladevorgänge im ÖPNV-Linienverkehr

Als derzeitiger technischer Stand gilt im PKW- und Kleinbus-Bereich ein Nachladen von Fahrzeug-Traktionsbatterien während längerer Standzeiten, vorrangig über Nacht und mit geringen Strömen. Im Bereich des ÖPNV stellt eine kontinuierliche Energieversorgung über eine Oberleitung bei Straßenbahnen und Oberleitungsbussen den Stand der Technik dar. Dieses System ist jedoch nicht für den Betrieb im Fahrzeugstillstand ausgelegt und birgt bereits heute bei wachsendem Leistungsbedarf der Fahrzeuge im Stillstand erhebliche Probleme. Aufgrund der geforderten kurzen Ladezeiten (z. B. während eines gewöhnlichen Fahrzeughalts an Haltestellen oder Lichtsignalanlagen) und der für die Erfüllung der Traktionsaufgaben benötigten großen Energiemengen muss die Energieübertragung mit hoher Leistung und mit hohen Strömen erfolgen. Im Bereich des ÖPNV gelten hierfür Ströme von bis zu 1000 A und Übertragungszeiten von maximal 20 Sekunden als relevant.



Bild 3: Anfahrt der AutoTram an Dockingstation mit mobilem Unterwerk

Das Ziel des Demonstrationsvorhabens bestand in der Nachladung von Doppelschichtkondensator-Speichern (Bild 4) in straßengebundenen Nutzfahrzeugen an entsprechend ausgestatteten Haltepunkten **innerhalb kürzester Zeit von 20 bis 30 Sekunden**.



Bild 4: Doppelschichtkondensator-Module als Speicher mit hoher Leistungsdichte in AutoTram

Die für den Schnellladevorgang benötigte elektrische Infrastruktur entlehnt sich hierbei dem Stadtbahnstromversorgungsnetz und wurde durch ein mobiles Unterwerk realisiert.

Das für den Schnellladeprozess ausgelegte Kontaktsystem (Bilder 5 und 6) ließ sich derart realisieren, dass es alle technischen und sicherheitsrelevanten Anforderungen insbesondere hinsichtlich Strom-, Spannungs- und Temperaturfestigkeit sowie ausreichendem Berührungsschutz während des Übertragungsvorgangs im Fahrzeugstillstand erfüllt. Das fahrzeugseitige Gegenstück des Kontaktsystems integriert sich passgenau in den Versuchsträger.

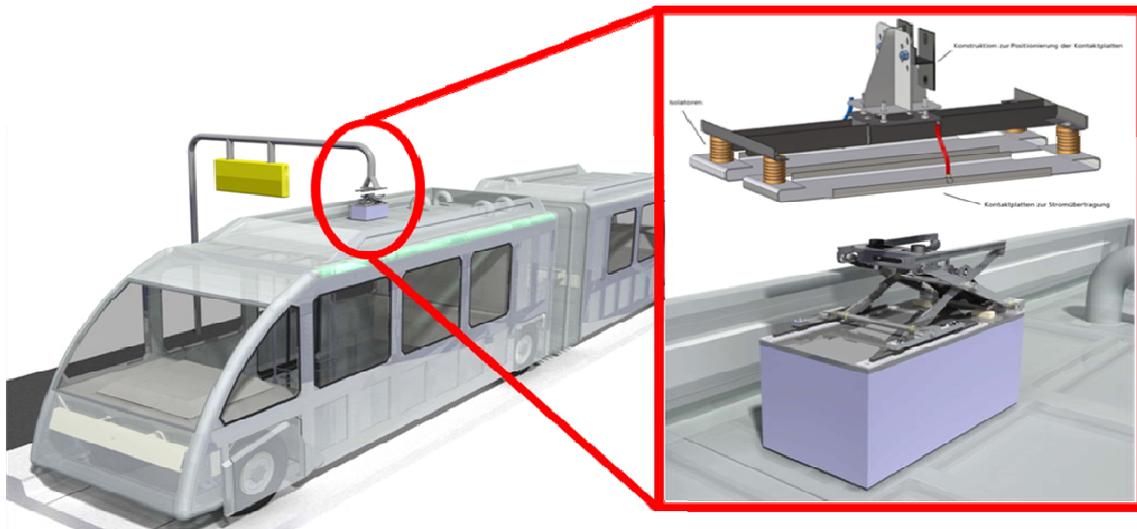


Bild 5: Koppelmechanismus zur Energieübertragung an Haltestellen

Ein derartiges Kontaktsystem unterliegt enormen elektrischen wie mechanischen Beanspruchungen. Durch geschickte Materialkombination bei der Beschichtung der Oberflächen mit Hilfe moderner PVD-Verfahren lassen sich praxistaugliche Kompromisse aus Widerstand, Korrosionsbeständigkeit und Abriebsbeständigkeit erzielen. Die zahlreich ausgeführte Testreihen belegen den erforderlichen Fleiß und Ausdauer zur erfolgreichen Lösung der Forschungsaufgabe. Bild 7 gestattet einen Einblick in den Beschichtungsprozess, Bild 8 zeigt beschichtete Proben.

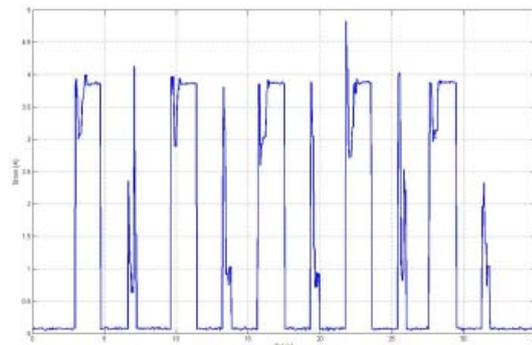


Bild 6: Prototypische Realisierung des Stromabnehmers (links), Motorstromaufnahme bei Belastungstest (rechts)

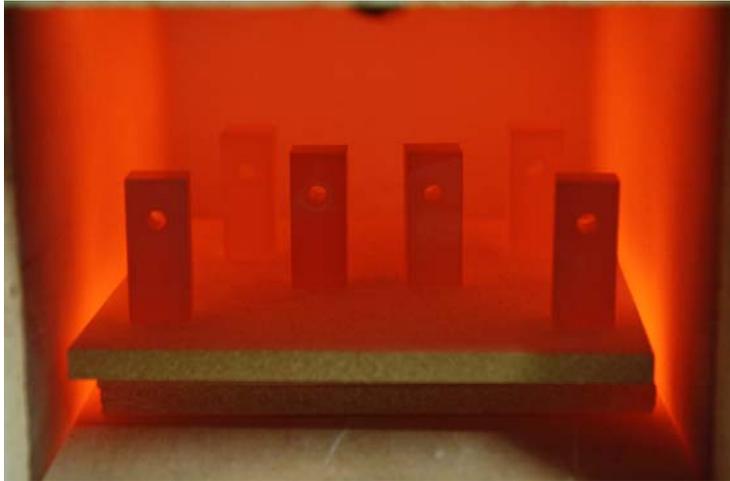


Bild 7: Beschichtungsverfahren für Hochstromkontakte



Bild 8: Kontaktfläche einer TiN-beschichteten Stahl-Proben nach einem Stromfluss von 300 A (a; leichte Verfärbung) und 400 A (b), TiN-beschichtete Aluminium-Probe (c)

Ein GPS-basiertes Energiemanagementsystem dient der AutoTram einerseits als Fahrerassistenzsystem bei der Anfahrt an Halte- und Ladepunkte. Andererseits erfordert das multivalente Energiespeicherkonzept Algorithmen zur optimalen Verteilung der Leistungsflüsse auf die einzelnen Speicher. Bild 9 zeigt eine Umsetzung auf dem Fahrzeugsteuerrechner der AutoTram.

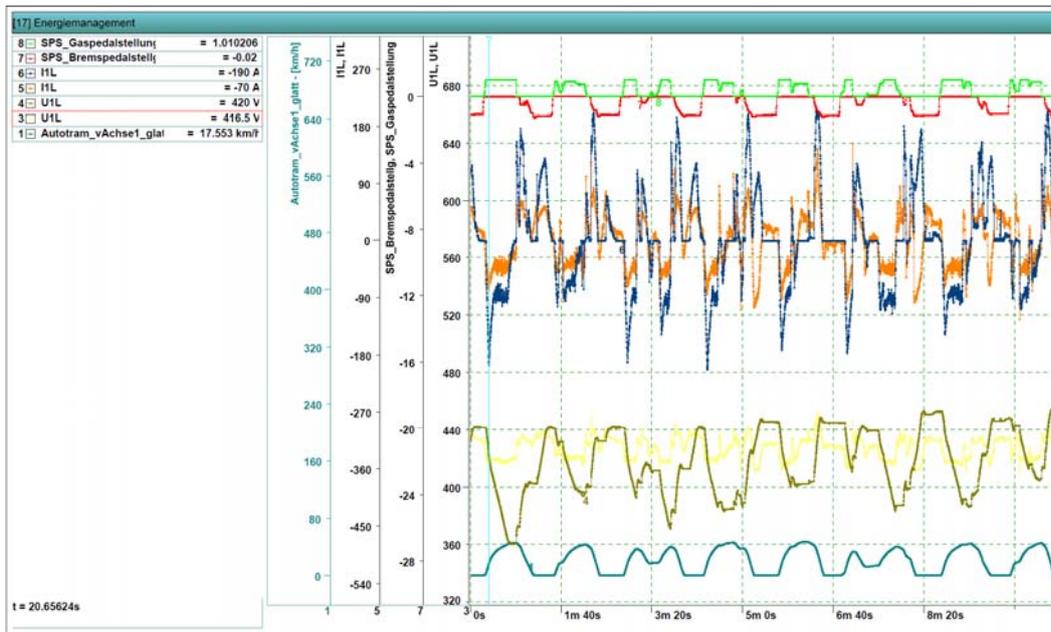


Bild 9: GPS-basiertes Energiemanagement für Traktionsenergiespeicher der AutoTram

Nachdem die wegseitig bereitgestellte Energie das Fahrzeug über das Kontaktsystem erreicht, sind elektrische Anpassungen erforderlich, bevor sie in den fahrzeugseitigen Speicher gelangt. Hierzu dient ein hochstromfähiger, bidirektionaler DC/DC-Wandler, ebenfalls eine im Rahmen der FSEM entwickelte innovative Systemkomponente.

Schnellladefähiger Hochleistungs-DC/DC-Wandler

Der Gleichspannungswandler erlaubt Ladeströme von 1200 A bei einer Leistung von 600 kW im Spannungsbereich von 500 bis 800 V. Durch den Einsatz von schnellen 1200 V IGBTs in Verbindung mit 1200 V Siliziumcarbid-Dioden ließ sich bei einer Schaltfrequenz von 17 kHz über einen weiten Leistungsbereich ein Wirkungsgrad von 98 % erzielen. Dank der 6-phasigen Auslegung, von denen 3 Phasen im Fahrbetrieb abschaltbar sind, liegt der hohe Wirkungsgrad über einem weiten Betriebsbereich sowohl beim Laden als auch Entladen der Superkondensatoren vor (Bild 10).

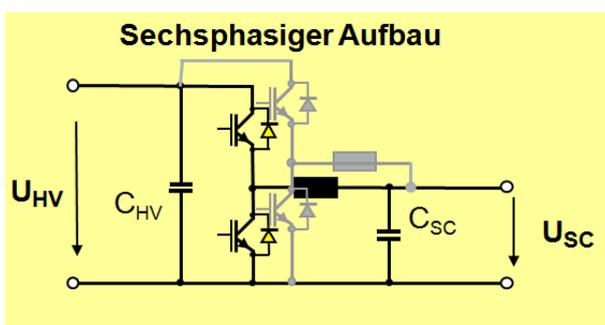


Bild 10: Struktur des Hochleistungs-DC/DC-Wandlers

Diese **Schnellladetechnologie** erlaubt somit den Verzicht auf teure Oberleitungsinfrastruktur, da die benötigte Energiezufuhr zyklisch während des Zu- und Ausstiegs der Fahrgäste an den Haltestellen erfolgt. Im Fahrbetrieb steht die gespeicherte Energie mit 200 kW Leistung der Antriebseinheit zur Verfügung. Ebenso problemlos gestaltet sich die Rekuperation der

Bremsenergie, wodurch sich wiederum der Gesamtverbrauch des Fahrzeuges und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen reduzieren.

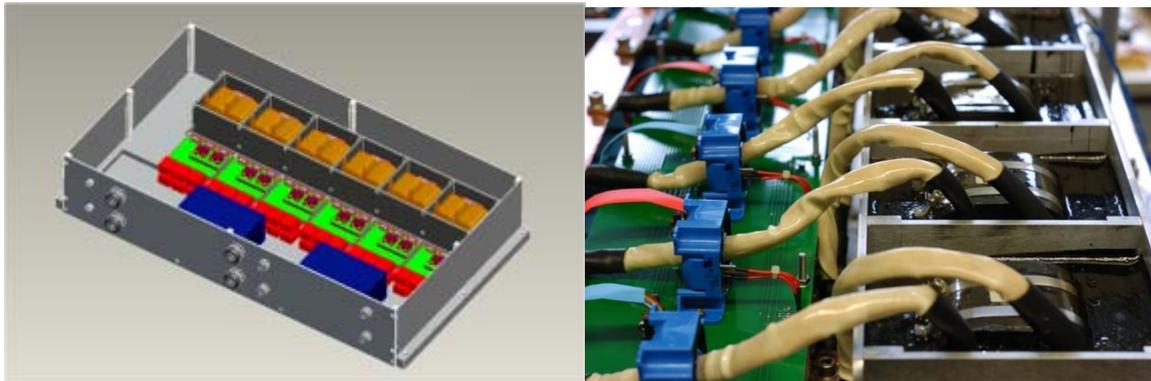


Bild 11: Konstruktiver Aufbau des Hochleistungs-DC/DC-Wandlers

Die Spezifikation des bidirektionalen 1200 A DC/DC-Wandlers für den Einsatz in AutoTram wurde in enger Zusammenarbeit zwischen den Fraunhofer-Instituten IVI und IISB erarbeitet. Auf dieser Grundlage wurde ein Spannungswandler mit 1200V Leistungsmodulen, aufgebaut aus Silizium IGBTs und Siliziumcarbid Dioden, ausgelegt (Bild 11). Die induktiven und kapazitiven Energiespeicher wurden berechnet und die optimale Stromverschiebung zur Reduzierung der Stromwelligkeit wurde untersucht. Für die Ansteuerung des Wandlers wurde die Schaltung einer Analog-Digital-Ansteuerplatine mit FPGA und Mikrocontroller entwickelt, sowie die Leiterplatte entflochten. Die Programmierung der Ansteuerung und der Kommunikation mit dem Fahrzeug wurde durchgeführt. Mit einem ersten Versuchsaufbau des Leistungsteils des Spannungswandlers konnten erste Versuche und Wirkungsgradmessungen durchgeführt werden. Dabei konnte die Auslegung elektrisch und thermisch verifiziert werden. Bei der Messung des Wandlerwirkungsgrads im Hoch- und Tiefsetzbetrieb zwischen der Hochspannungsseite mit 600 V und der Niederspannungsseite mit 300 V konnte ein sehr guter Wert von bis zu 97,5 % erreicht werden.

Die nutzbare Energiemenge beschränkt sich unmittelbar durch die eingesetzten Speicherelemente. Dass auch hierin ein enormes Effizienz- wie Forschungspotenzial steckt, bewiesen die Entwicklungen zu neuen Superkondensator-Materialien.

Superkondensatoren einer neuen Generation

Für die Elektromobilität nehmen Superkondensatoren neben den Batterien eine Schlüsselfunktion als Energiespeicher ein. Die hohe Leistungsdichte und Zyklenstabilität stellen ideale Voraussetzungen für die Leistungsbereitstellung beim Starten und Beschleunigen sowie bei der Rekuperation von Bremsenergie dar. In der Kombination mit Batterien erlauben Superkondensatoren durch die Aufnahme und Abgabe von Leistungsspitzen eine **höhere Lebensdauer bzw. eine kleinere Dimensionierung** der Speichereinheit.

Im Vergleich zu Batterien erweisen sich die Energiedichten von Superkondensatoren als recht gering, wodurch sich deren Einsatzmöglichkeiten erheblich einschränken. Neue Materialkonzepte sind gefordert, um die Superkondensatoren leistungsstärker zu machen. Poröse Kohlenstoffe finden in den Elektroden Einsatz. Ihre spezifische Oberfläche, sowie die Porengeometrie bestimmen maßgeblich die Leistungsparameter der Zellen. Eine große Oberfläche führt zu einer hohen Kapazität. Offene Poren mit Durchmessern > 2 nm ermöglichen einen schnellen Stofftransport für Elektrolytionen beim Lade- und Entladevorgang. Materialien, die diese Bedingungen außerordentlich gut erfüllen, stellen sog. geordnete, mesoporöse, aus

Carbiden gewonnene Kohlenstoffe (OM-CDC) dar. CDCs lassen sich durch die Chlorierung von Carbiden (z.B. Siliziumcarbid) bei Temperaturen $> 600^{\circ}\text{C}$ herstellen. Durch die Extraktion von Silizium als SiCl_4 bleibt ein hochporöser Kohlenstoff mit Mikroporen (Durchmesser $< 1\text{ nm}$) und Oberflächen $> 1000\text{ m}^2/\text{g}$ zurück. Durch Anwendung des OM-CDC Material ließen sich sowohl die Energiedichte (proportional zur Kapazität) als auch die Leistungsdichte deutlich steigern.

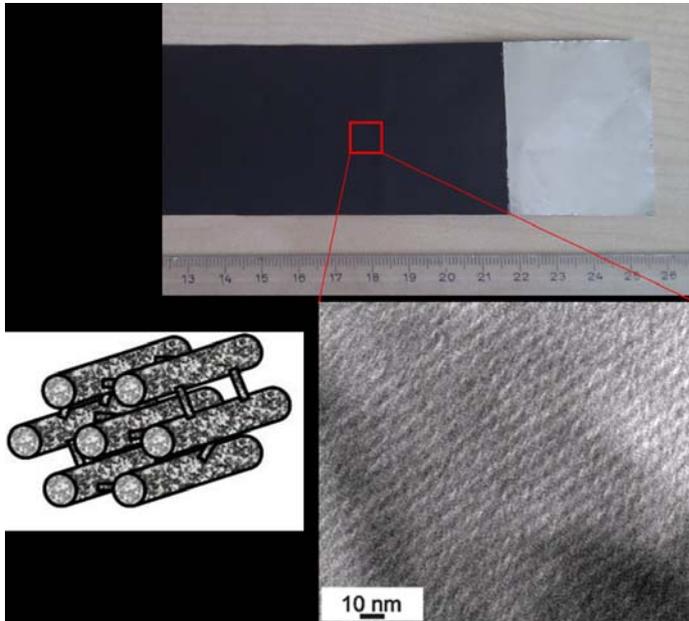


Bild 12: Elektrode, Schema und transmissions-elektronenmikroskopische Aufnahme des OM-CDC-Materials

Magnetorheologische Kupplungen

Viele physikalische Prinzipien der Grundlagenforschung warten auf ihren praktischen Alltagseinsatz. Ein Beispiel dafür stellt der magnetorheologische Effekt dar, bei dem eine geeignete magnetorheologische Flüssigkeit (MRF) ihre Viskosität aufgrund eines angelegten Magnetfeldes innerhalb kürzester Zeit verändert. Diese Eigenschaft lässt sich für den Einsatz in einer **schnell schaltenden Kupplung** vorteilhaft nutzen. Im Teilprojekt erfuhr dies in mehreren Varianten eine praktische Umsetzung (vgl. Bild 13).

So greift eine derartige magnetorheologische Kupplung in den seriellen Hybridantrieb der AutoTram ein. Das Ziel dabei besteht darin, eine variable Kupplung zwischen Verbrennungsmotor und elektrischem Generator zu verwenden, um kurzzeitige mechanische Lastspitzen schonend für den Verbrennungsmotor aufzufangen. Magnetorheologische Kupplungen eignen sich für solche Anwendungsfälle sehr gut, da sich das übertragene Drehmoment zwischen den beiden Antriebspartnern über ein variables magnetisches Feld gezielt steuern lässt. Die MRF geht bei ihrer Aktivierung durch das magnetische Feld von einem flüssigen in einen nahezu festen Zustand über und sorgt so für eine variable »Haftung« zwischen den Kupplungsplatten. Dieser Effekt erweist sich als sehr gut und schnell steuerbar, reversibel und nahezu wartungsfrei. Neben der geschickten elektromechanischen Konstruktion der Kupplungen besteht die Ingenieurskunst im Suchen und Finden einer geeigneten Zusammensetzung der MRF.

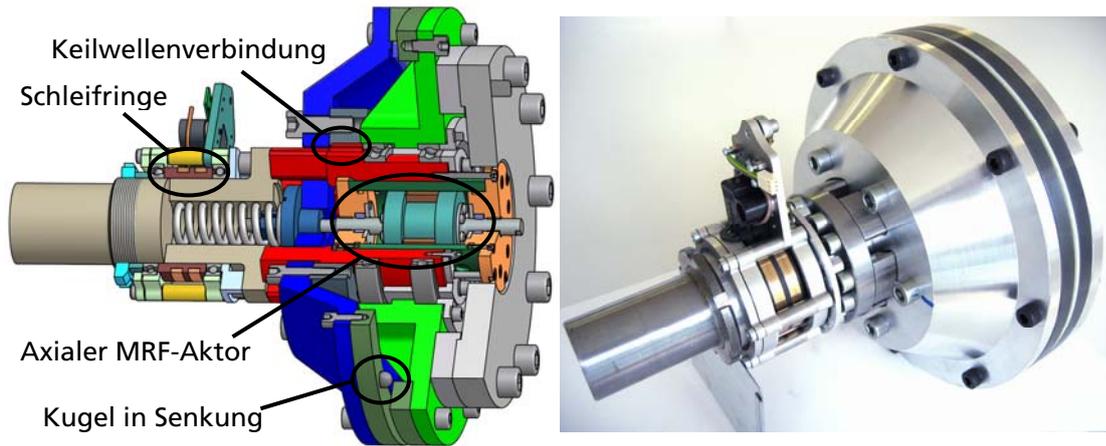


Bild 13: Schnittansicht und Bild der MRF-Kugelpkupplung

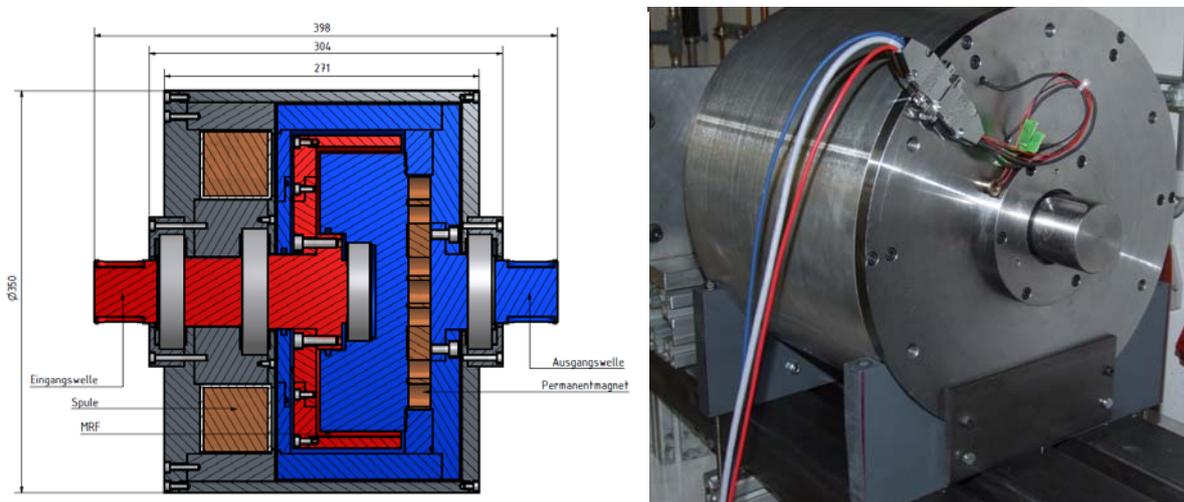


Bild 14: Schnittansicht und aufgebaute axiale MRF-Kupplung

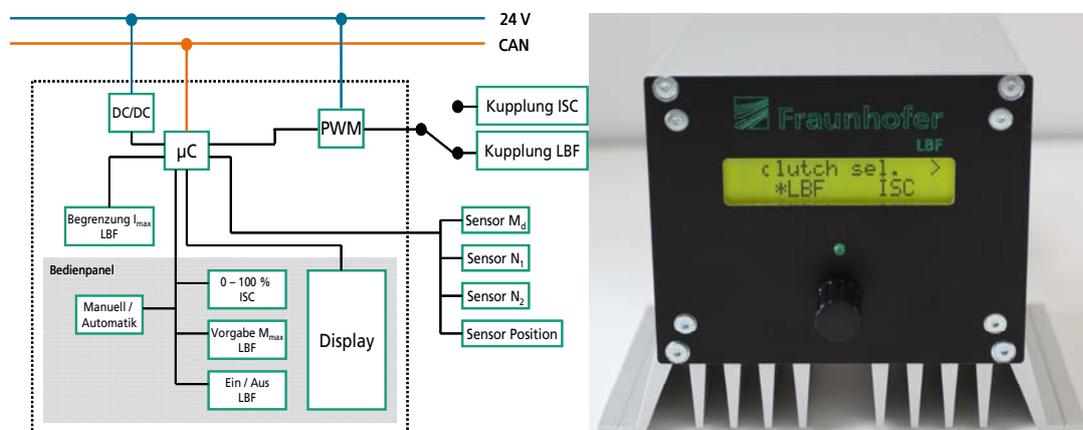


Bild 15: Einbindung in AutoTram und Steuergerät für Kupplungen

Zur Messung von möglichen Verschleißeffekten innerhalb der MRF und zwischen MRF und Oberfläche des Kupplungsmaterials sowie um topografische Effekte auf das übertragbare Moment festzustellen wurde für ein vorhandenes Tribometer ein Versuchsaufbau entwickelt und an den Prüfstand adaptiert (Bild 16).

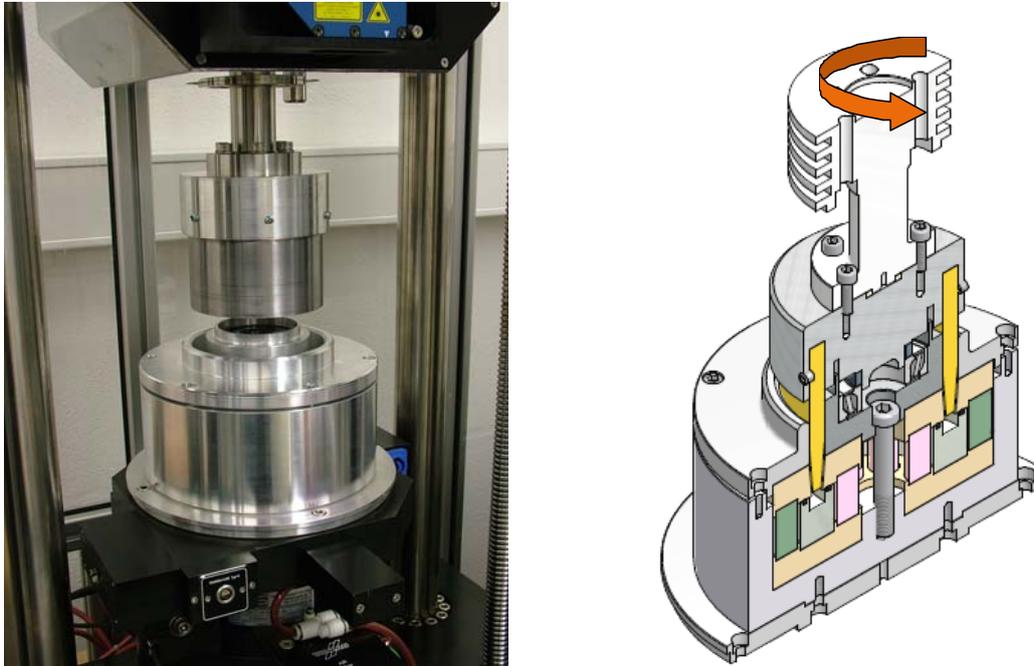


Bild 16: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Verschleiß

Um die Magnetisierung der Eisenpartikel zu beschreiben, wurde ein Modell aus der Literatur implementiert und mit den Experimenten verglichen (Bild 17). Im nächsten Schritt wurden die Modellparameter an die experimentelle Magnetisierungskurve angepasst, um auch die Suszeptibilitäten im Bereich kleiner Feldstärken gut wiederzugeben.

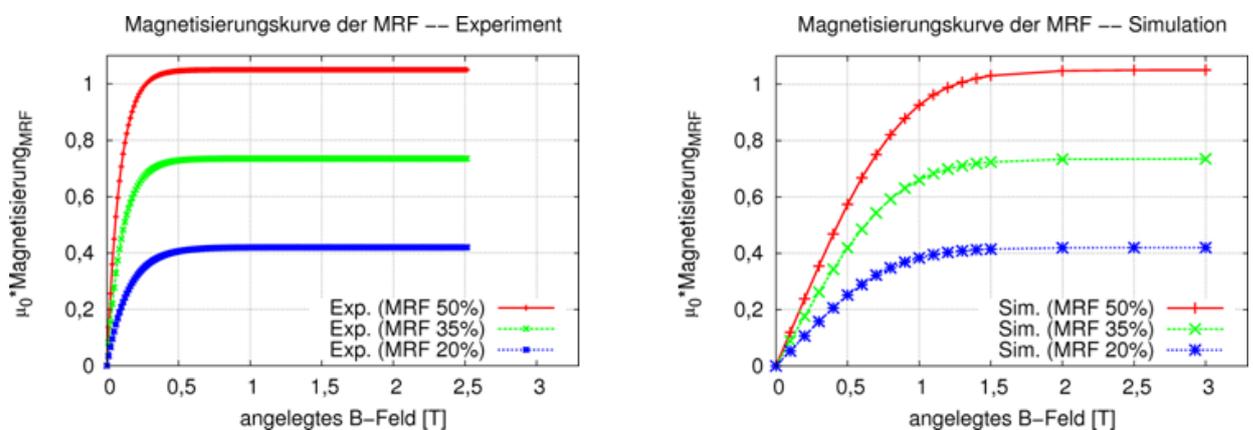


Bild 17: Magnetisierungskurve der MRF

Disponentenarbeitsplatz und MicroCarrier

Dass neben handfesten konstruktiven Entwicklungen auch viel Kreativität in strukturierte Programmierfähigkeit einfließt, zeigt dieses Teilthema. Das Projekt **Disponentenarbeitsplatz** steuert im Rahmen der FSEM eine dynamische Tourenplanung für Hybrid- oder Elektrofahrzeuge bei, (vgl. Bilder 18 und 19). Durch zunehmend eingeschränkte Zufahrtsmöglichkeiten, u. a. durch Umweltzonen in Innenstädten, ergeben sich für urbane Lieferverkehre neue Herausforderungen. Stellenweise besteht für Dieselfahrzeuge bereits ein Einfahrtverbot in Innenstadtbereiche. Mit Hilfe eines Software-Demonstrators ließ sich daher ein neues Konzept für eine flexible und umweltfreundliche Paketzustellung in Innenstädten mit Einsatz von Hybrid- oder Elektroverteilerfahrzeugen umsetzen.

Die Fahrzeugdisposition erfolgt von einem geschulten Mitarbeiter am sogenannten Disponententisch. Ihm obliegt die Möglichkeit, Pakete zu disponieren, Routen zu planen und sich gleichzeitig per GPS über die Position des Fahrzeugs zu informieren. Das Kernstück stellt die **dynamische Tourenplanung** für die Hybrid- oder Elektroverteilerfahrzeuge dar. Abhängig von der Position und dem übermittelten Ladezustand und Leistungsprofil der Batterie lassen sich die Touren gemäß den Anforderungen jederzeit um- und neuplanen, weitere Haltepunkte hinzufügen und auslassen oder tageszeitabhängige Zufahrtsbeschränkungen in Innenstädten wie Citymaut berücksichtigen.

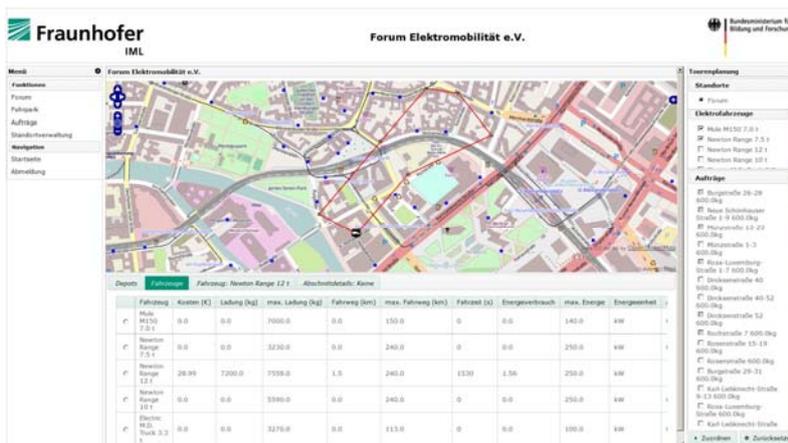


Bild 18: Ausschnitt Disponentenarbeitsplatz

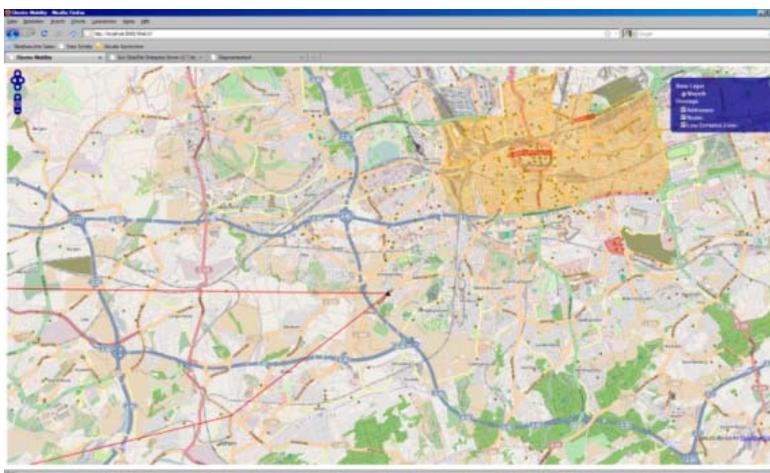


Bild 19: Nutzung von verbessertem Kartenmaterial und Lauffähigkeit der Routing-Software im Browser

Ziel der Arbeiten des IPK war der Aufbau eines **MicroCarrier** Demonstrators zur Darstellung der technologischen und logistischen Wirkpotentiale batterieelektrisch angetriebener Nutzfahrzeuge im Wirtschaftsverkehr. Dabei soll die operative Systemkette aus Betreibersicht so dargestellt werden, dass der Nutzen erkennbar wird und die geeigneten Lösungsansätze industriell umgesetzt werden können.



Bild 20 : Systemübersicht Demonstrator Wirtschaftsverkehr

Zur Containerübernahme und innerstädtischen Feinverteilung entstand im Projektrahmen ein MicroCarrier-Fahrzeug. Entwicklungsschwerpunkte bildeten das gesteuerte, spurfehlerfreie Lenken im Zugverbund, das auf dem Fahrzeugversuchsträger implementiert wurde. Es erfolgte eine Abstimmung mit dem Hersteller einer Ladesäule hinsichtlich funktionaler und kommunikationstechnischer Erweiterungen, die für die Demonstration von Bedeutung sind und über den Stand der Technik hinausgehen. Es sind zwei Möglichkeiten der Systemerweiterung vorgesehen: entweder der Hersteller übernimmt Funktionserweiterungen oder aber Fraunhofer erhält Zugang, um eigene Erweiterungen als Demonstrator zu implementieren. Als Energieanbieter bietet sich SGE an, die im Rahmen der Berliner Modellregion als Energieversorger für die Versuchsfahrzeuge im Nutzfahrzeugbereich tätig sind und elektrische Energie aus rein nachhaltigen Quellen in eigenen Energieparks gewinnen.

Das Fahrzeugmonitoring benötigt fahrzeugseitig technische Geräte, die die Fahrzeugdaten messen und an einer drahtlosen Schnittstelle für das Online-Monitoring bereitstellen. Auf der Grundlage von Vorarbeiten des IPK wurde eine solche Monitoring-Box für die Messung hoher Fahr- und Ladeströme von E-Fahrzeugen erweitert. Die Monitoring-Box erfasst Strom und Spannung in zwei Kreisen, Fahrdynamik (Beschleunigung, Steigungen) und liefert ein präzises Ortungssignal für genaues Tracking und Tracing. Eine Monitoring-Software auf einem mobilen Endgerät (iPhone) ist realisiert, die alle Messgrößen in Echtzeit darstellt, einen lokalen Datenspeicher bereitstellt und zeitliche Verläufe der Messgrößen ausgibt.



Bild 21: Prototypische Realisierung des MicroCarriers

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

Die Marktpotentiale für jede einzelne im Systemforschungsprojekt entwickelte Komponente des Demonstrators sind unterschiedlich zu bewerten. Während Energiespeicher, Leistungs- und Motorentechnik weite Anwendungsspektren auch über die Nutzfahrzeuge hinaus aufweisen, sind die Fahrzeugkonzepte hinsichtlich ihrer Marktpotentiale sehr dezidiert zu bewerten. Da das Fahrzeugkonzept der AutoTram® im Rahmen eines »Innovativen regionalen Wachstumskerns« weiterentwickelt und künftig auch kommerziell vermarktet werden soll, kann der durch das vorliegende Projekt erreichbare Zuwachs an Marktpotential konkret bewertet werden. Da die Lebenszykluskosten (LCC) der AutoTram 30 bis 50% unter denen vergleichbarer konventioneller Straßenbahnsysteme (LRT) liegen, wird zunächst ein entscheidender Wettbewerbsvorteil gegenüber diesen derzeit wieder stark nachgefragten Verkehrssystemen erreicht. Allein in Europa wird bis zum Jahr 2020 in etwa eine Verdopplung der gegenwärtigen Streckennetzlänge (ca. 8.000 km) und eine 50%ige Steigerung der derzeitigen Anzahl an LRT Systeme (ca. 170) erwartet. Für den Absatz der AutoTram® ist weniger der Markt der Systemerweiterungen, d.h. die Errichtung neuer Linien in einem bereits bestehenden Straßenbahnnetz oder die Verlängerung einzelner Linien interessant, sondern der Neubau von Straßenbahnsystemen in Städten, die bisher keine LRT – Systeme betrieben haben, interessant. In Europa sind derzeit 18 derartige Systeme mit einer Gesamtstreckenlänge von 354 km im Bau und 41 Systeme mit einer Gesamtstreckenlänge von 662 km in der Planung. Pro Linie (mittlere Linienlänge 16 km) werden bei einer angenommenen Reisegeschwindigkeit von 28 km/h etwa 6 bis 8 Züge benötigt.

Allein die Ausstattung einer dieser 41 Linien pro Jahr mit der AutoTram® würde ausreichen, die Zielstellung der Verwertungsstrategie zu erfüllen. Allerdings müsste sich derzeit der Akquisitionsschwerpunkt auf die westeuropäischen Länder konzentrieren, da in den neuen Mitgliedsländern der Schwerpunkt der Investitionstätigkeit noch auf der Erneuerung und

Ertüchtigung der bestehenden LRT Systeme und weniger in der Neuinstallation liegt. Dies wird sich jedoch ebenfalls in den kommenden Jahren ändern und entsprechende Marktpotentiale auch in Osteuropa bzw. in den neuen Beitrittsländern allgemein eröffnen. Mit dieser Strategie soll in summa nach internen Schätzungen mittelfristig in den nächsten zehn bis fünfzehn Jahren ein Marktpotential von mindestens 40 AutoTram®-Systemen pro Jahr erschlossen werden. Das entspricht einem Jahresumsatz von 35 bis 45 Mio €. Vergleichbare Umsatzzahlen der französischen Lohr Ltd. bezüglich des wesentlich teureren und hinsichtlich der Infrastruktur deutlich aufwendigeren TRANSLOHR Systems bestätigen diese Annahmen. Unter der Annahme, dass die in dem vorliegenden Projekt entwickelten Technologien zur Elektromobilität in der AutoTram® zum Einsatz kommen, kann vor allem in Europa das Marktpotential in etwa verdoppelt werden, da mit einem vollelektrischen Betrieb gegenüber dem bisher vorgesehenen hybriden diesel-elektrischen Betrieb auch sensible, derzeit hoch belastete Innenstadtbereiche mit der AutoTram® alternativ zu Bussystemen erschlossen werden können. Der Absatz der AutoTram® könnte damit einen jährlichen Zuwachs um 15 bis 20 Mio. € erreichen.

Neben den allgemeinen wirtschaftlichen Marktchancen für elektrische Nutzfahrzeugtechnik im ÖPNV wie auch im innerstädtischen Lieferverkehr bieten die fahrzeug- und antriebstechnischen Forschungs- und Entwicklungsleistungen des Projektes wichtige Anknüpfungspunkte für gegenwärtige aber auch zukünftige wissenschaftlich-technische Fragestellungen. Dies betrifft einerseits die allgemeinen verkehrswissenschaftlichen Problemstellungen wie

- wirtschaftlich effiziente und ökologisch nachhaltige Verkehrssystemtechnik für den Umlandverkehr
- Verkehrskonzepte für oberleitungsfreien Bahnverkehr auf aufgelassenen Nebenstrecken der Deutschen Bahn bei rückgebautem Gleiskörper
- flexible an das Fahrgastaufkommen anpassbare, hochkapazitive Transportsysteme
- hochkapazitive, elektrische Transportsysteme mit hoher Ausweichflexibilität und variablem Gestaltungsspielraum für die Streckenführung

Oder auch die speziellen ingenieurtechnischen Herausforderungen zu

- hochfesten Leichtfahrzeugkonstruktionen mit strukturintegrierten Funktions- und Sicherheitskomponenten,
- kompakte, in Lenkachsen integrierbare Motortechnik,
- mobilem Einsatz von Hochleistungsenergiespeichern und
- Energiemanagementstrategien zur Steuerung von Hybridantrieben im Linienverkehr.

Die Entwicklung eines magnetorheologischen Kupplungssystems in der Größenordnung von 700 Nm mit Permanentmagneten zum energielosen Einkuppeln hat die Arbeitsgruppe am ISC in den Punkten Konstruktion und Magnetkreisdesign deutlich weitergebracht. Die neu erworbenen Kenntnisse fließen in zukünftige Entwicklungen mit ein. Eine Umsetzung eines Kupplungssystems mit Permanentmagneten für stromloses Einkuppeln und Auskuppeln mit zusätzlichem Elektromagnet ist für die Zukunft in den nächsten 5 Jahren geplant.

Während des Projektes wurde nach dem Vollprüfstandtest eine verbesserte Version der Kupplung zum fertigen Einbau in den Autotram-Demonstrator aufgebaut. Diese steht für Folgeprojekte bereit zum Einbau und kann im Autotram-Demonstrator genutzt werden.

Auf Seite des Fraunhofer LBF wurde durch die Entwicklung der MRF-Kugelpkupplung die Funktion dieses neuen Kupplungskonzepts bestätigt. Im nächsten Schritt muss das Problem des

Kriechens des MRF-Aktors gelöst werden. Danach ist ein Einbau in die AutoTram ebenfalls möglich.

Erste Anfragen aus der Industrie bestätigen das Potential der Kupplung. Potentielles Einsatzgebiet des MRF-Kugelpkupplungsprinzips ist neben der aktuellen Anwendung als Sicherheitskupplung in der Motor-Generator-Einheit der AutoTram auch die Nutzung als Auslinkkupplung im Lenksystem der AutoTram zum gezielten An- und Abkoppeln des Lenkrads während des manuellen und autonomen Fahrbetriebs. Weitere Anwendungen mit anderen Drehmomentanforderungen sind durch die einfache Skalierbarkeit der Kupplung möglich.

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

./.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11 NKBF.

- [1] Jackel M., Matthias M., Seipel B.: »MRF-Ball-Clutch – A novel magnetorheological clutch design«; The 12th International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magnetorheological (MR) Suspensions; Philadelphia, PA, August 16-20, 2010 (2010)
- [2] Jackel M., Matthias M., Seipel B.: »MRF-Ball-Clutch – A novel magnetorheological clutch design«; Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Nov. 2011 (2011)
- [3] Jackel M., Klopfer J., Matthias M., Seipel B.: »MRF-Ball-Clutch – A novel magnetorheological clutch design«; Adaptronic Congress, Darmstadt, Sept. 2011 (2011)
- [4] Clausen, U., Schaumann, H.: Neue Herausforderungen urbaner Lieferketten, Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität, Pressemitteilung, September 2010 (2010)
- [5] Lager H. G., Peguiron J., Bierwisch C., Moseler M.: Magnetization models for particle-based simulations of magnetorheological fluids (2011), (Coupled Problems 2011) (2011)
- [6] Fraunhofer-Gesellschaft e. V.: Rollendes Labor. Presseinformation, URL: <http://www.fraunhofer.de/presse/presseinformationen/2010-2011/21/rollend-labor-autotram.jsp> (Stand: 20. September 2011), München, 2. September 2011 (2011)
- [7] Bartholomäus, R., Klingner, M.: Prädiktives Energiemanagement in Hybridfahrzeugen. 1st Commercial Vehicle Technology Symposium Kaiserslautern.
- [8] Klingner, M.: Fraunhofer-Technologieträger AutoTram für e-mobility Demonstrationen im Nutzfahrzeugbereich. Forum Elektromobilität.
- [9] Klingner, M., Potthoff, U.: The AutoTram: A System Integration Platform of Multiple Energy Storage and Transfer Concepts. VDE-Kongress »E-Mobility«, Leipzig.
- [10] Potthoff, U.: Technologiedemonstrator AutoTram. 33. Verkehrsplanerisches und Verkehrsökologisches Kolloquium, TU Dresden.



Teilprojekt
»Forum Elektromobilität«

Teilnehmende Fraunhofer-Institute: Fraunhofer-Gesellschaft, IAO, IPK, IBP, IML

Teilprojektleiterin: Katja Okulla

Fraunhofer-Gesellschaft, Fraunhofer-Forum Berlin

I. Zusammenfassende Darstellung

1. Aufgabenstellung

Dieses Teilprojekt verfolgte das Ziel der Errichtung eines Forums Elektromobilität in Berlin zum Zwecke der gesellschaftspolitischen Einbindung und Darstellung des technologischen Fortschritts der Elektromobilität. Hier wird der Öffentlichkeit das komplexe System Elektromobilität vorgestellt und erläutert; besondere Schwerpunkte liegen dabei auf der energietechnischen Integration und den praktischen Herausforderungen von Elektrofahrzeugen.

Neben der breiten Öffentlichkeit sollten durch das Forum die Wirtschaft wie die Automobil- und Zulieferindustrie, die Verkehrs- und Energiewirtschaft aber auch die Politik als relevante Partner gezielt adressiert werden. Mit der Gründung eines Vereins sollte eine Plattform zur Kommunikation für alle beteiligten Akteure geschaffen werden, die den wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskurs zur Förderung der Elektromobilität vorantreibt.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

- Meilenstein M1 (Monat 12): Das Forum Elektromobilität ist etabliert.
- Meilenstein M2 (Monat 17): Der Verein zur Förderung der Elektromobilität ist gegründet und das Forum Elektromobilität organisiert gemäß seiner Mission den wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskurs.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Für die Durchführung des Vorhabens »Forum Elektromobilität« war die Nutzung bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte nicht notwendig.

4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Während des Vorhabens wurden kontinuierlich Informationsrecherchen im Sinne Nr. 6.1 NKBF 98 durchgeführt.

Verwendete Fachliteratur: keine

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

Im hier dargestellten Teilprojekt wurde gemäß der integrativen Zielsetzung mit allen Schwerpunkten, der übergeordneten Hauptkoordination und der Projektleitung eng zusammengearbeitet. Seit seiner Gründung im August 2009 hat der Verein »Forum

Elektromobilität« in Kooperation mit den FSEM-Teilprojektleitern den fachlichen Dialog bzw. die Gremienarbeit in zahlreichen Workshops und mit zwei Kongressen zur Elektromobilität organisiert und gestaltet.

Im Teilprojekt wurde auch die FSEM Presse- und Öffentlichkeitsarbeit sowie die Präsentation des Verbundprojekts auf Messen koordiniert (HMI 2010 und 2011).

Ein weiterer Schwerpunkt der außerordentlich intensiven Zusammenarbeit mit sämtlichen Teilprojekten des Verbundvorhabens war die komplexe inhaltliche Abstimmung zur interaktiven Ausstellung »Antrieb Zukunft« im Forum Elektromobilität, in der analog zum systemischen Ansatz der FSEM die Forschungs- und Entwicklungserfordernisse umfassend vorgestellt wurden. Die aktive Auseinandersetzung mit den Fragestellungen und Lösungsansätzen der Fraunhofer-Forschung erfolgt dabei eingebettet in eine ganzheitliche Vermittlungsstrategie. Die Besucher werden Schritt für Schritt selbstgeleitet in das Thema eingeführt und erhalten so ein umfassendes Kontextwissen. Damit bietet die Ausstellung einer überaus heterogenen Zielgruppe einen umfassenden und passgenauen Einstieg in die Thematik und ermöglicht darüber hinaus eine gezielte Wissensvertiefung.

II. Erweiterte Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis im Einzelnen

Die im Antrag gesetzten Ziele des Teilprojekts wurden sämtlich vollständig erreicht.

- a) Der Verein »Forum Elektromobilität e.V.«
- Gründung des Vereins im August 2009
 - Eröffnungsveranstaltung am 9. September 2009
 - Aufbau und Betrieb der Geschäftsstelle ab Oktober 2009 im FFB
 - Gewinnung der Verbände BDEW, VDA, VDMA und ZVEI für das Kuratorium
 - Aufbau der Web-Community www.forum-elektromobilitaet.de im April 2010
 - Gewinnung von Prof. Lehold und Dr. Wittenstein als Mitglieder des Vorstands des Vereins im Mai 2010
 - seit 2010 laufen eine Reihe von Workshops, die von der Geschäftsstelle organisiert und von den FSEM-Schwerpunkt-/Teilprojektleitern inhaltlich durchgeführt werden; bisher Workshops zu Batterieentwicklung, Batteriesystemtechnik, Elektromobilität im ÖPNV, Netzintegration und Ladeinfrastruktur, Testen und Prüfen, Batteriesicherheit und -zuverlässigkeit
 - seit Juli 2010 Roadshows des Vereins bei den Mitgliedern DIN, TÜV Süd, Wittenstein AG und German E-cars
 - zwei Kongresse »Forum Elektromobilität« im November 2010 und im Mai 2011; Planung für 3.Kongress im Mai 2012
 - weiteres Arbeitsfeld des Vereins: Ermittlung des Ausbildungsbedarfs der Elektromobilität und Entwicklung eines Ausbildungsangebots
 - Kommunikation mit den Aktionsbündnissen im Bereich der Elektromobilität, z.B. mit der Nationalen Plattform Elektromobilität sowie mit den einschlägigen Verbänden
- b) Planung und Ausbau eines Forum Elektromobilität
- Der (bauliche) Ausbau des Forums fand in der Bewilligung des FSEM-Vorhabens keine Berücksichtigung. Der Ausbau einer geeigneten Fläche wurde auf Beschluss des Vorstands der Fraunhofer-Gesellschaft durch die Fraunhofer-Gesellschaft mit eigenen Mitteln in Höhe von 750 T€ realisiert.
 - Anbindung an das Fraunhofer-Forum Berlin (FFB) im SpreePalais am Dom
 - Erarbeitung eines baulichen Konzepts in Kooperation mit Architekten und Fachplanern
 - Eröffnung im November 2010

- c) darüber hinaus: Konzeption und Herstellung einer interaktiven Ausstellung in Kooperation mit einer Agentur für Wissenschaftskommunikation
- unter Berücksichtigung verschiedener Besuchergruppen
 - mit dem Schwerpunkt auf der Fraunhofer Systemforschung
 - Finanzierung der Realisierung durch alle beteiligten FSEM-Institute
 - Eröffnung im Mai 2011

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

Die Ergebnisse des Teilprojekts »Forum Elektromobilität« sind für die gesamte Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität von Nutzen. Das Forum Elektromobilität verstetigt mit der Vereinsarbeit den ganzheitlichen, disziplin- und branchenübergreifenden Vernetzungsansatz des Verbundvorhabens. Ziel ist, diese Plattform für einen nachhaltigen Dialog aller Akteure der Elektromobilität zu nutzen und weiter auszubauen. Dies schließt auch eine öffentlichkeitswirksame Präsentation der Forschungsergebnisse und -erfordernisse durch die Ausstellung »Antrieb Zukunft« ein.

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine wesentlichen Arbeiten Dritter bekannt, die sich mit dem Teilprojektthema (bzw. dessen Umfeld) beschäftigt haben.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11 NKBF.

Es gibt keine angemeldeten Schutzrechte aus dem Teilprojekt.



Teilprojekt

»Untersuchung von Gesamtkonzepten und Gestaltungsoptionen«

Teilnehmende Fraunhofer-Institute: ISI, IPK, IML, IAO, IBP, IZM, UMSICHT

Teilprojektleiter: Dr. Claus Doll

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

I. Zusammenfassende Darstellung

1. Aufgabenstellung

Dieses Teilprojekt verfolgte eine Reihe von Zielen um die Fragestellung der Nachhaltigkeit und erfolgreichen Implementierung der Elektromobilität zu untersuchen. Zunächst wurde aus den Blickwinkeln des Personenverkehrs und des urbanen Wirtschafts- und Lieferverkehrs der Frage nachgegangen, welche Formen von Fahrzeugen und Nutzungskonzepten auf Akzeptanz stoßen sowie wirtschaftlich sinnvoll sind. Dazu wurden ökonomische und psychologische Ansätze mit Marktanalysen verbunden, um geeignete Erstmärkte zu identifizieren.

In einem zweiten Block wurde die Nachhaltigkeit der Elektromobilität auf ökonomischer und ökologischer Ebene im Rahmen von Lebenszyklusanalysen breit untersucht. Spezifisch war hierbei die Verknüpfung von Verfahren zur ganzheitlichen Bilanzierung mit der Ressourcenknappheit seltener Erden und der Recyclingfähigkeit von Komponenten von Elektrofahrzeugen. Einbezogen wurden dabei die Komponenten Batterie, Leistungselektronik und Elektromotoren.

Abschließend widmete sich das Teilprojekt der Frage, mit welchen Instrumenten die Elektromobilität effizient und sinnvoll gefördert werden kann, um selbsttragende Erstmärkte zu etablieren. Untersucht wurden in diesem Schritt sowohl einzelne Anwendungsgebiete im Personen- und Lieferverkehr, wie auch verschiedene Instrumente der Verkehrs- und Fiskalpolitik. Ziel war die Aufstellung eines möglichen Szenarios einer elektromobil geprägten, urbanen Mobilität nebst der notwendigen Schritte, um dieses Ziel zu erreichen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

Die vorgesehene Laufzeit des Teilprojektes entsprach der Gesamtlaufzeit von FSEM. Die einzelnen Arbeitspakete wichen dem entgegen hiervon ab, um gegen Projektende die Konzentration der Ressourcen auf die Entwicklung einer Gesamtübersicht von Stand und Optionen der Elektromobilität zu ermöglichen. Der ursprünglich vorgesehene Ablauf ist in nachfolgendem Diagramm wiedergegeben. Im Projektverlauf wurden lediglich in geringem Umfang Änderungen der Arbeitspakete (AP) notwendig:

- [1] AP1: Kostenneutrale Verlängerung bis 31.12.2010
- [2] AP2: Kostenneutrale Verlängerung bis 31.12.2010
- [3] AP5: Kostenneutrale Verlängerung bis 31.7.2011 im Zuge der gesamten Laufzeitverlängerung des Gesamtvorhabens.

Arbeitspaket	II/2009	III/2009	IV/2009	I/2010	II/2010	III/2010	IV/2010	I/2011	II/2011
AP1: Parameter für die Marktdurchdringung und Mobilitätskonzepte im Personenverkehr				M1	M2				
AP2: Parameter der Marktdurchdringung und Dienstleistungskonzepte im Lieferverkehr									
AP3: Anreizmodelle für optimierte Energie-Systemintegration									
AP4: Ressourcenverfügbarkeit und ökologischer Nachhaltigkeit								M3	
AP5: Bewertung und Implementierung von Gesamtszenarien der Elektromobilität in Städten									

Im Teilprojekt wurden drei Meilensteine definiert. Diese definierten jeweils die Verfügbarkeit wichtiger Teilergebnisse zur Ausarbeitung der Gesamtszenarien in AP5:

Meilenstein	AP	Bezeichnung	Beschreibung	Fällig	Status
M1	1	Akzeptanz- und Nutzeranalysen	kritisch für Mobilitäts- und Marktszenarien	3/2010	erreicht 9/2010
M2	2	Lieferketten und Firmenverhalten	kritisch für logistische Konzepte	3/2010	Berichte in Arbeit
M3	4	Ressourcenverfügbarkeit und Ökobilanzen	kritisch für Gesamtbewertung	3/2011	erreicht 3/2011, Bericht in Arbeit

Die zentralen Meilensteine und Laufzeiten der AP wurden im Wesentlichen eingehalten.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Für das Vorhaben wurden keine Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte genutzt. Die Forschungsarbeiten setzen jedoch auf Vorarbeiten der beteiligten Institute sowie wissenschaftlich anerkannten Methoden zu folgenden Themenfeldern auf:

- [1] AP1 bis AP3: Die Arbeiten setzten auf bekannten methodischen Elementen von Marktanalysen, Nutzerbefragungen und der Durchführung von Fokusgruppen auf, wurden aber spezifisch für die Bedürfnisse und Fragestellungen von FSEM angepasst. Die hieraus generierten inhaltlichen Forschungen bildeten speziell für FSEM erarbeitete neue Elemente.
- [2] AP4: Bewertung kritischer Rohstoffe. Die Arbeiten des Fraunhofer ISI setzten auf Berichten an das BMWi und die EU-Kommission auf. Unter Verwendung des hier generierten methodischen Gerüsts wurden speziell für die Elektromobilität wichtige seltene Erden neu beleuchtet.
- [3] AP4: Verfahren und Datenbank zur Ökobilanzierung und zum Recycling von Fahrzeugen von Fraunhofer IBP, IZM und UMSICHT. Die bestehenden Datenbanken wurden wesentlich erweitert und auf zentrale Komponenten von Elektrofahrzeugen adaptiert.
- [4] AP5: Methodik und Datengrundlage zur Bewertung externer Effekte des Verkehrs. Ausgangspunkt bildeten Studien des Fraunhofer ISI für den

Internationalen Bahnverband (UIC) und die EU-Kommission. Wesentliche Anpassungen waren die Eigenschaften von Elektrofahrzeugen sowie Umwelt- und Sicherheitswirkungen nach Ortslagen.

4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Während des Vorhabens wurden kontinuierlich Informationsrecherchen im Sinne Nr. 6.1 NKBF 98 durchgeführt.

Verwendete Fachliteratur (Auszug):

- [1] Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider, F. Scharp, M.: »Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien«. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung und Fraunhofer-Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Karlsruhe und Berlin, (2008)
- [2] Cocron, P., Bühler, F., Neumann, I., Franke, T., Krems, J. F., Schwalm, M., Keinath, A.: Methods of evaluating electric vehicles from a user's perspective –the MINI E field trial in Berlin. In: IET Intelligent Transport Systems. Syst. 5 (2011)
- [3] NHTSA: Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger vehicles. Technical Report, DOT HS 811 204.
- [4] Rogers, E. M.: Diffusion of innovations. 5th edition. Free Press: New York (2003)
- [5] The UMICORE Process: Recycling of Li-ion and NiMH batteries via a unique industrial closed loop. Wissenschaftliche Verfahrensbeschreibung auf www.umicore.com (2011). Letzter Zugriff: 15. June 2011
- [6] Truffer, B., Harms, S., Wächter, M.: Regional experiments and changing consumer behaviour: The emergence of integrated mobility forms. In: R. Cowan & S. Hultén (Eds.), Electric vehicles. Socio-economic prospects and technological challenges. Ashgate, Aldershot, 173-204 (2000)
- [7] Wallentowitz: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen. Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden (2009)
- [8] Wellings, T., Binnorsley, J., Robertson, D., Khan, T.: Interfaces in Low Carbon Vehicles – Market Trends and User Issues. In: Low Carbon Vehicle Technologies Project: Workstream 13 (2011)

- [9] Follmer, R., Gruschwitz, D., Jesske, B., Quandt, S., Lenz, B., Nobis, C., Köhler, K., Mehlin, M.: »Mobilität in Deutschland 2008: Ergebnisbericht Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends«. Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.. Studie beauftragt vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Bonn und Berlin (2010)
- [10] Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., van Essen, H.P., Boon, B.H., Smokers, R., Schroten, A., Doll, C., Pawlowska, B. und Bak, M. »Handbook on estimation of external costs in the transport sector«, Studie »Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT) « im Auftrag der Europäischen Kommission. Infrac, CE Delft, Fraunhofer-ISI, Universität Danzig. Zürich, Delft, Karlsruhe und Danzig (2008)

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

AP1: Informationsaustausch und Aufnahme relevanter Aspekte und Informationen zu Fahrzeugkonzepten (TP 1), Infrastruktur (TP 2) und Geschäftsmodellen (TP 2) für Workshops mit potentiellen Nutzern sowie die Online-Befragung in der Bevölkerung.

AP2: Diskussion und Übernahme der Fragebogensystematik des Fraunhofer ISI aus AP1 (für PKW) soweit nutzbar für den Wirtschaftsverkehr; Abstimmung mit der Systematik der Auswirkungsanalyse des Modellversuchs Berlin-Potsdam (Außerhalb der FSEM).

AP3: Zum Abgleich von Infrastrukturkosten, technischen Optionen der Ladeinfrastruktur und sonstiger wirtschaftlicher Parameter wurden die Arbeiten in AP3 in enger Kooperation mit dem Schwerpunkt 2 (Energiesysteme) durchgeführt.

AP4: Im Arbeitspaket 4 fand die direkteste Zusammenarbeit mit den technischen Bereichen des FSEM-Konsortiums statt:

- Ökobilanz (IBP-GaBi): Datenaufnahme und Informationsaustausch zu Technologien und antriebsspezifischen Komponenten: Batteriesystem (Fraunhofer ICT, ISE, Umsicht), Radnabenmotor und Fahrzeugkonzeption (Fraunhofer IFAM), Ladegeräte und Leitungselektronik (Fraunhofer IZM, IISB, ISE), Abstimmung der Rahmenbedingungen der Szenarien (Fahrzeugkonfiguration, Strommixentwicklung, Nutzungsprofile (Fraunhofer ISI)).
- Akustik-Fragebogen bei Probandenversuch des Fraunhofer ISI mit eingebunden. Beschaffung/-Ausleihe eines E-Fahrzeugs (Fraunhofer IISB) für Messungen. Das Fraunhofer IBP (Akustik) war auch im Teilprojekt »Ganzfahrzeugprüfstände« vertreten.
- Leitungselektronik (Fraunhofer IZM): Für die Bewertung der in FSEM entwickelten integrierten Leistungselektronik wurde mit dem FSEM-Teilprojekt »Leistungselektronik« zusammengearbeitet. Aufbau, Materialzusammensetzung der Leistungselektronik für Radnabenmotor.

AP5: Keine Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten; nur interne Zusammenführung der erarbeiteten Teilergebnisse.

II. Erweiterte Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis im Einzelnen

AP1: Akzeptanzfragen im Personenverkehr

Fahrzeugdesign und Nutzungskonzepte

Um die Anforderungen potenzieller Nutzer an Elektrofahrzeuge und deren Integration in den heutigen Verkehr vertieft zu analysieren, führte das Fraunhofer ISI Experteninterviews zu relevanten Einflussfaktoren für die Nutzerakzeptanz der Elektromobilität, einen Expertenworkshop zu aussichtsreichen Zielgruppen, vier Fokusgruppen mit potentiellen privaten Nutzern in Berlin, Stuttgart, Freiburg und München sowie eine breite Online-Befragung in der Bevölkerung durch. Darin zeigte sich, dass trotz einer grundsätzlichen Skepsis bezüglich des baldigen Marktdurchbruchs die Einstellung der befragten Personen positiv ist, und bei Privatpersonen mit zunehmender Auseinandersetzung mit dem Thema sogar steigt. Gefragt sind kleine, umweltfreundliche und leise Fahrzeuge, wobei die Nutzung im Car-Sharing oder in Firmenflotten als Option offen steht. Die größte Rolle für die Kaufentscheidung spielt insgesamt die Einschätzung, wie sehr ein Elektroauto zum eigenen Lebensstil und zu persönlichen Gewohnheiten und Bedürfnissen, sowie zur Persönlichkeit und eigenen Einstellungen passt. Weiterhin beeinflussen wahrgenommene Kosten und die Umweltauswirkungen sowie Fahreigenschaften die Kaufabsichten potenzieller Kunden.

Für die Nutzerakzeptanz der Elektromobilität ist somit wichtig, dass eine positive Umweltbilanz sichergestellt und transparent kommuniziert wird. Zudem sind bessere Testmöglichkeiten, welche aus Sicht von Nicht-Nutzern nur unzureichend vorhanden sind, wichtig, da sie eine effektive Möglichkeit sind, die Passfähigkeit von Elektroautos zum eigenen Alltag zu überprüfen. Vorgänge, in denen sich Elektroautos von konventionellen Fahrzeugen unterscheiden, wie Ladeprozesse oder Routenplanung, sollten so gestaltet und mit technischen Lösungen unterstützt werden, dass sie unkompliziert in der Handhabung sind und für die Nutzer leicht in den Alltag integriert werden können. Nicht zuletzt ist die weitere Kostenreduktion bzw. eine Umverteilung durch intelligente Geschäftsmodelle für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen von Bedeutung. Schließlich spielt auch die technische Weiterentwicklung der Fahrzeuge eine wichtige Rolle, um die noch vorhandenen Hemmnisse zu reduzieren.

Bedien- und Anzeigenelemente

Fokus der Arbeiten des Fraunhofer IAO lag auf der Erarbeitung von Konzepten zur Funktion und Gestaltung von Bedien- und Anzeigen in Elektrofahrzeugen. Im Rahmen eines Workshops mit potentiellen Käufern und Nutzern wurden deren Bedürfnisse im Hinblick auf Bedien- und Anzeigenkonzepte, sowie Informationsmanagement und Fahrerassistenz mittels Fokusgruppen, virtueller Realität und einem Elektro-Realfahrzeug untersucht. Die meisten Teilnehmer bevorzugten dabei Assistenzsysteme zum Lade- und Reichweitenmanagement, welche individuelle Bedürfnisse berücksichtigen und dennoch die Leistungsfähigkeit der E-Fahrzeuge maximieren. Diese Assistenzsysteme sollten neben einer dynamischen Routenberechnung auf Basis der Batterieladestände und Topographiedaten, Ladestationen mit ausgewählten Freizeitangeboten in die Route integrieren und bei einem kritischen Batterieladestand oder ineffizienten Fahrstil Strategien für eine Reichweitenverlängerung anbieten. Beim Ladevorgang bevorzugen die Teilnehmer Einstellungsmöglichkeiten zur Auswahl des Ladevolumens und der zeitlichen Planung des Ladevorgangs. Auch die Speicherung von Ladungseinstellungen wurde von den Teilnehmern als wichtig bewertet. Die Benutzung eines solchen Systems zum Laden sollte allerdings auch immer über Standardladeprogramme und Plug-in möglich sein. Die Bedienung und Informationsdarstellung eines solchen Fahrerinformationssystems im

Elektrofahrzeug stellen sich die Teilnehmer über ein Mittelkonsolendisplay mit Dreh-Drück-Regler oder Touch-Bedienung vor. Außerdem betonen alle Teilnehmer die Wichtigkeit der multimodalen Informationsvermittlung über visuelle und sprachliche Signale. Neben den klassischen Fahrzeuggeräuschen werden auch neue Signale, etwa über den Ladezustand oder zur Fußgängerwarnung, als wichtig eingestuft. Dabei haben einfache Sounds und bekannte Geräusche eine höhere Akzeptanz als »neue, unbekannte Geräusche«.

Mit den beschriebenen Arbeitsschritten wurden die im Antrag formulierten Ziele erreicht. Die Ergebnisdokumentation wird im Rahmen der Projektlaufzeit erfolgen und über die FSEM-Internetseite zugänglich gemacht werden.

AP2: Einführungsstrategien und Entscheidungsunterstützung im Lieferverkehr

Einführungsstrategien im Wirtschaftsverkehr

Mit dem Ziel, den CO₂-Ausstoß des Straßenverkehrs zu senken und damit den zunehmenden Anforderungen von Kunden und Politik zu begegnen, untersuchte das Fraunhofer IPK mögliche Einführungsstrategien elektrischer Lieferfahrzeuge, die Bedeutung der Fahrzeugkosten, die denkbaren Entwicklungen der Teilkosten (Sensitivitätsanalysen) und ordnungsrechtliche Maßnahmen zur Elektrifizierung des urbanen Lieferverkehrs. Durch Datenanalysen der gefahrenen Tonnenkilometer und Fachgespräche mit Flottenbetreibern wurden Betriebs- und Kostenmodelle zur Szenarienbewertung aufgestellt. Danach decken relativ kleine Batterien die Reichweitenanforderungen z.B. von Paketdiensten, in der Regel ab, eine Ladeinfrastruktur ist nur auf den Betriebshöfen erforderlich. Es überwiegt der einschichtige Betrieb, so dass Batteriewechselanlagen nicht zwingend erforderlich sind. Eine pilothafte Entwicklung dieser Handhabungstechnik für Batterien von 200 kg Gewicht für 12 t LKW ist trotzdem angeraten.

Batterien für Transporter und LKWs sind überproportional teurer als beim PKW und erst bei einer Batteriepreisreduktion auf 30 % ist ein rentabler Betrieb möglich. Zeitlich begrenzte Fördermaßnahmen zum Kauf von bis zu 20.000 € sowie langfristige Vorteile in Form von exklusiven Haltebuchten, Benutzung von Busspuren, Steuerbefreiung oder erweiterte Lieferzeitfenster erscheinen damit sinnvoll, wenn vor 2020 Erfahrungen mit elektrischem Lieferverkehr gewonnen werden sollen. Ferner kann die Belieferung auf der letzten Meile durch elektrische Kleinfahrzeuge ergänzt werden. Am 5.5.2010 konnte Herr Schallock (Fraunhofer IPK) diese Ergebnisse auf der Roadshow des Forum Elektromobilität e.V. vorstellen. Es wurde mit den Flottenbetreibern verabredet, die Kostenmodelle begleitend zum Modellversuch Berlin-Potsdam zu verifizieren.

Die Präsentation und die FSEM-Entwicklungsarbeiten am Microcarrier (Herr Schönewolf) führten auch zu einer verstärkten Einbindung des Fraunhofer IPK in die Workshopreihe »Innovationsforum Produktion eMobility (PROeMO)« der Innovationsgesellschaft fortschrittliche Produktionsverfahren (inpro) und des Automotive clusters Berlin-Brandenburg.

Dynamisches Routing im Lieferverkehr

Trotz der häufig angeführten Regelmäßigkeit und überschaubaren Länge täglicher Touren im städtischen Wirtschaftsverkehr benötigen Fuhrparkmanager Instrumente zur Abschätzung, ob elektrische Fahrzeuge eingesetzt werden können. Zu diesem Zweck entwickelte das Fraunhofer IML ein Computermodell mit digitalem, topographischem Straßennetz zur Routen- und Fahrzeugwahl. Hierzu wurden reale Sendungsdaten für Vergleichsrechnungen aufbereitet und Informationen zu aktuellen und zukünftigen Zufahrtsbeschränkungen digitalisiert. Ferner wurde eine Recherche von Leistungsprofilen der aktuell und zukünftig verfügbaren Hybrid- oder

Elektroverteilerfahrzeuge durchgeführt. Rahmenbedingungen und langfristige Flotten- und Infrastrukturaspekte wurden auf Fachtagungen vertieft. Im Ergebnis liefert das Modell Empfehlungen zur Eignung oder Anpassung von Routen zur Bedienung mit elektrischen Lieferfahrzeugen.

Mit den beschriebenen Arbeitsschritten wurden die im Antrag formulierten Ziele auch in diesem Arbeitspaket erreicht. Die Ergebnisdokumentation über die FSEM-Internetseite zugänglich gemacht werden.

AP3: Europäische Förderschemata

Internationaler Vergleich

Zur Beurteilung der nationalen Förderstrategie Elektromobilität hat das Fraunhofer ISI die Förderschemata für Kauf und Betrieb von Elektrofahrzeugen der Jahre 2008/2009 erfasst und systematisiert. Die Evaluation wurde entlang von Effektivität, Effizienz, Praktikabilität und Akzeptanz durchgeführt. Im Ergebnis zeigten sich nur in Dänemark und Norwegen Elektrofahrzeuge günstiger als vergleichbare Verbrennungsfahrzeuge. Während in Deutschland die Gesamtkosten für Verbrennungsfahrzeuge vergleichsweise günstig ausfallen, liegen die Kosten für Elektrofahrzeuge etwa im europäischen Schnitt.

Die Arbeiten wurden fristgerecht im geplanten Umfang abgeschlossen und dokumentiert.

AP4: Ressourcenverfügbarkeit und Umweltfragen

Ökobilanzen

Ziel der Ökobilanzuntersuchung war es, anhand ausgewählter Szenarien Informationen zur Bandbreite der potentiellen Umweltwirkungen verschiedener Elektrofahrzeugkonzepte (EV) zu erarbeiten und anhand dieser Ergebnisse die relevanten Einflussfaktoren und Schwerpunkte weiterer Forschungsarbeiten abzuleiten. Basierend auf dem Lebenszyklusgedanken der Ökobilanzmethode wurden alle Umweltwirkungen der Fahrzeugkonzepte entlang des Lebenswegs unter Berücksichtigung der Energiebereitstellungskette und der Materialherstellung erfasst.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass heutige EVs bei Verwendung des deutschen Netzstrommix in der Klimabilanz in einer vergleichbaren Größenordnung zu konventionellen Fahrzeugen liegen, wobei die Beiträge zu anderen Wirkungskategorien, wie z. B. dem Versauerungspotential durch die Herstellung der zusätzlichen Komponenten, insbesondere des Batteriesystems, signifikant zunehmen. Durch die Verwendung regenerativen Stroms (Windkraft) lassen sich jedoch schon heute deutliche Verbesserungen in der Klimabilanz erzielen. Nutzungsszenarien zeigen, dass der größte ökologische Nutzen der Elektrofahrzeuge (EV) derzeit durch hohe Fahrleistungen im Stadtfahrbetrieb erreicht wird. Durch die angestrebten Weiterentwicklungen der Batterietechnologien und einem zukünftig steigenden Anteil an regenerativen Energien im Netzstrommix kann das Umweltprofil zukünftiger EV weiter verbessert werden. Neben einer fortschreitenden Technologieentwicklung wird hierbei auch eine auf die Antriebe optimierte, innovative Vernetzung der zur Verfügung stehenden Mobilitätskonzepte einen hohen Stellenwert einnehmen.

Akustik und Innenraumemissionen

Ergebnisse aus ersten Befragungen potentieller Nutzer von Elektrofahrzeugen zeigen, dass beim E-Sound die Interpretation der verwendeten Deskriptoren (aus dem Erfahrungsbereich

herkömmlicher Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor) für die Befragten auf Grund eines unzureichenden Erfahrungshintergrunds schwierig ist. Ähnliches gilt auch für die Wahrnehmung bzw. Wahrnehmbarkeit – insbesondere für sehbeeinträchtigte Personen – bei geringen Fahrgeschwindigkeiten (»fremdartiger« Klang führt tendenziell zu einer Verunsicherung der Probanden). Hierzu erfolgte die akustische Begleitung von Experimentstudien der Universität Duisburg-Essen. Im Allrad-Rollenprüfstand mit Vorbeifahrt-Messhalle des Fraunhofer IBP wurden akustische Messungen im Umfeld und im Innenraum von E-Fahrzeugen durchgeführt. Eine Adaption des Pass-By-Messablaufs an geringe Geschwindigkeiten ermöglichte die Simulation eines Zebrastreifen-/Ampelstopps mit anschließender Beschleunigung im Prüfstand. Ergänzt wurden diese Prüfstandsmessungen durch weitere Messungen unter realen Bedingungen im Freien. Insgesamt konnte somit eine Datenbasis akustischer Messgrößen geschaffen werden, um weitere Probandentests mit Soundbeispielen vorzubereiten und Eingangsgrößen für Simulationsmodelle (z.B. Lärmkarten) zu erhalten.

Leistungselektronik

Die Leistungselektronik mit Fokus auf IGBT-Modul und Kühlkonzept wurde durch das Fraunhofer IZM exemplarisch für die Detailbetrachtung der Ressourcenverfügbarkeit und des Toxizitätspotenzials ausgewählt. Der am Fraunhofer IZM entwickelte »Ressource Availability Risk Indicator« (RARI) verbindet geologische, ökonomische und politische Faktoren in einem einzelnen Indikator. Im Ergebnis minimiert der AIN-Aufbau mit einer direkten Kühlung die Gesamtkritikalität bei gleichzeitig höherer Wärmeleitfähigkeit, vereinfachtem Aufbau und einer Gewichtsreduktion gegenüber dem Standardaufbau mit einer Al₂O₃-Keramik.

Recycling

Im Bereich des Recyclings wurden in diesem Arbeitspaket die heute bestehenden Möglichkeiten zum Recycling von Li-Ionen Traktionsbatterien recherchiert. Li-Ionen Batterien enthalten in hohen Anteilen wertvolle Metalle, z. B. Cobalt, Nickel und Kupfer, die bei einer entsprechenden Aufbereitung wieder in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden können. Eine der Ausgangsfragestellungen war, ob es auch heute schon möglich ist, das enthaltene Lithium zurückzugewinnen und somit im Kreislauf zu führen. Die Auswertung der bestehenden Recyclingverfahren zeigt, dass das Recycling von Li-Ionen Batterien heute bereits möglich ist, eine Verwertung des Lithiums allerdings nur eingeschränkt durchgeführt wird. Bei dem pyrometallurgischen Aufbereitungsverfahren der Firma Umicore wird das Lithium in der Schlacke eingebunden, die dann im Straßenbau als Sekundärbaustoff verwertet wird. Eine weitere Recyclingoption wird durch die Firma Xstrata Nickelwerk AS angeboten. Hier werden an Standorten in Kanada und Norwegen Kupfer, Cobalt und Nickel wiedergewonnen. Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Verfahrensschritten. Das für NiCd- und NiMH-Batterien eingesetzte Vakuumdestillationsverfahren (ebenfalls pyrometallurgisch) der Firma Accurec wird für den Einsatz von Li-Ionen Batterien weiterentwickelt. Es zeigt sich, dass in existierenden Anlagen Li-Ionen Batterien mitbehandelt werden können. Hierbei handelt es sich häufig um Verfahrenskombinationen aus pyro- und hydrometallurgischen Prozessen, teilweise mit mechanischen Vorbehandlungsstufen. Zukünftige Recyclingoptionen, die eine Rückgewinnung des Li-Anteils erlauben sowie die Rahmenbedingungen hierfür wurden im Schwerpunktthema »Energiespeichertechnik« der FSEM näher untersucht.

Rohstoffverfügbarkeit

Die Verfügbarkeit kritischer Metalle für die Produktion von Batterien und Elektromotoren wurde vom Fraunhofer ISI mittels systemdynamischer Modelle unter Einbezug von geologischen Reichweiten, Sekundärnutzung und Nachfrage aus allen Wirtschaftsbereichen untersucht. Hiernach ist für Lithium und Kupfer bis 2050 kein unmittelbarer Versorgungsengpass zu befürchten. Die Ausschöpfung der wirtschaftlich erschließbaren Vorkommen wird jedoch die Preise deutlich steigen lassen.

Die Arbeiten dieses Arbeitspakets wurden im Wesentlichen im geplanten Umfang abgeschlossen, einige Analysen zu seltenen Rohstoffen sind jedoch noch in Arbeit. Die Ergebnisdokumentation wird zeitnah auf der FSEM-Internetseite verfügbar gemacht.

AP5: Gesamtkonzepte und Gestaltungsoptionen

Integrationsstrategien

Der Grundgedanke elektromobiler Mobilitätsszenarien im städtischen Raum war zunächst, Elektrofahrzeuge in bestehende Flotten zu integrieren. Mit Hilfe umfangreicher Simulationen konnte gezeigt werden, dass dies z.B. im Car-Sharing-Betrieb durchaus wirtschaftlich möglich ist, die Fahrzeugzahlen jedoch mit den aktuellen Batteriekosten im einstelligen Prozentbereich bleiben. Sinnvoller erscheint hier der Einsatz im Wirtschaftsverkehr bei Paket- oder Sozialdienstleistungen auf Grund der planbaren Routen zu sein. Entscheidend für den Markterfolg sind direkte Kaufsubventionen, welche nach Maßgabe der externen Kosten der Elektromobilität bei max. €1500 liegen dürften, oder sonstige Vergünstigungen, etwa durch längere Lieferzeitfenster oder Parkgebühren.

Für relevante Marktanteile jenseits der für 2020 angestrebten eine Million Elektrofahrzeuge müssen jedoch noch eine Reihe von Herausforderungen auf technologischer Seite gelöst werden, insbesondere auf Seiten der Batterieentwicklung. Weiterhin sind förderliche Rahmenbedingungen und intelligente Mobilitätskonzepte für eine ökologische, wirtschaftliche und nutzerfreundliche Mobilität zu schaffen. Der Einsatz und die Verbreitung von Elektrofahrzeugen in gewissen Marktfeldern wie in Firmen- und Serviceflotten, im innerstädtischen Lieferverkehr sowie in aufgeschlossenen Privatkundensegmenten, welche eine hinreichende Fahrleistung aufweisen, erscheint realistisch, aber nicht selbstverständlich. Sinnvoll für den Einsatz in Megacities erscheinen neue Fahrzeugtypen wie elektromobile Kleinstfahrzeuge und Pedelecs sowie neue Mobilitäts-Konzepte, welche Elektrofahrzeuge in Car-Sharing-Flotten bzw. den öffentlichen Verkehr integrieren und so eine hohe Auslastung erreichen.

Die inhaltlichen Analysen im Rahmen des Arbeitspaketes sind im Wesentlichen abgeschlossen, die Dokumentation in Form eines Gesamtüberblicks zu den Gestaltungsoptionen ist jedoch noch in der Vorbereitungsphase.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

- Akzeptanzuntersuchungen (AP1: Fraunhofer ISI und IAO): Insgesamt bieten die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sowohl einen umfassenden Einblick in die aktuelle Wahrnehmung von Elektroautos durch verschiedene Konsumentengruppen als auch einen vertieften Einblick in die wahrgenommenen Vor- und Nachteile der Elektromobilität sowie die Nutzungsvarianten, Fahrzeugkonzepte und Mobilitätskonzepte, welche potenziellen Nutzern von Elektrofahrzeugen attraktiv erscheinen. Die Ergebnisse geben wichtige und konkrete Hinweise, in welche Richtung die Vorstellungen und Erwartungen potenzieller Nutzer von Elektrofahrzeugen gehen, und zeigen wichtige Ansatzpunkte zur Förderung der Nutzerakzeptanz auf. Die Dissemination der Ergebnisse erfolgt über Publikationen, Pressemitteilungen, Konferenzbeiträge und Projektberichte sowohl im wissenschaftlichen Bereich als auch in Politik und Öffentlichkeit.
- Ökobilanz (Fraunhofer IBP-GaBi): Im Rahmen der FSEM konnte ein umfangreiches Wissen zur Ökobilanz der antriebsspezifischen Komponenten und aktuellen Fragestellungen der Elektromobilität aus Sicht der Ökobilanz erarbeitet werden. Aufbauend auf den Arbeiten der FSEM sind bereits Zusammenarbeiten mit der Automobilindustrie entstanden. Für das Jahr 2011 wurden bereits weitere Angebote im Bereich Ökobilanz Elektromobilität und Energiespeichertechnologien (Batterie) erstellt.
- Akustik (Fraunhofer IBP): Durch Messungen im Rahmen von FSEM konnte eine Datenbasis an akustischen Daten verschiedener Elektro- und Hybridfahrzeuge gewonnen werden, die u.a. für Benchmark-Untersuchungen genutzt werden können.
- Leistungselektronik (Fraunhofer IZM): Antrag: Schlüsseltechnologien für Elektromobilität (STROM), »Begleitmaßnahme zu Technologiemonitoring im Gesamtsystem batteriebetriebener Fahrzeuge«, Oktober 2010.
- Vorstudie: »Studienkonzept für Rohstoffrückgewinnungspotentiale aus der Fahrzeugelektronik«, Bundesamt für Umwelt BAFU, Schweiz, 2011.
- Innenraumemissionen (Fraunhofer IBP): Messungen von Schadstoffemissionen im Fahrzeuginnenraum wiesen bei den gemessenen Fahrzeugen keine Auffälligkeiten auf. Bei hoher Materialdichte auf engem Raum, wie dies bei Fahrzeugen der Fall ist, besteht jedoch immer das Risiko der Freisetzung umweltschädlicher oder toxischer, reglementierter Substanzen aus Materialien und Systemkomponenten in Konzentrationen, die die normativ geregelten Grenzwerte überschreiten und in entsprechend hohen Konzentrationen Reizwirkungen, allergieauslösende oder verstärkende Eigenschaften, negative Wirkungen auf das Nervensystem oder gar kanzerogene, mutagene oder reproduktionstoxische Eigenschaften aufweisen können. Maßnahmen zur Risikobeurteilung und -minimierung erfordern eine entsprechende Emissionsüberwachung der geregelten Substanzen und Substanzgruppen. Die Emissionsüberwachung soll, wie auch schon im Bereich konventionell betriebener Fahrzeuge im Rahmen einer normativ geregelten Bemusterungsprüfung von Materialien und Werkstoffen sowie ganzer Bauteile und Systemgruppen, die sowohl im Innen- als auch Außenbereich von Fahrzeugen verbaut werden, entsprechend der Normenreihe DIN ISO 12219 als Dienstleistung angeboten werden.

Neue Forschungsprojekte, die eingeworben wurden:

- Sozialwissenschaftliche Begleitforschung der Modellregionen (BMVBS)
- Energiespeicher-MONITORing für die Elektromobilität (EMOTOR) (Ausschreibung »STROM« des BMBF)
- Wissenschaftliche Begleitforschung des Projektes »Wir machen Baden-Württemberg E-mobil« (EnBW)
- TAB Elektromobilität (Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag)

Laufende Anträge:

- Folgeprojekt zur Sozialwissenschaftliche Begleitforschung der Modellregionen (BMVBS)
- Kaufpotential für Elektrofahrzeuge bei sogenannten »early adopter« (BMW)
- ERA-NET Electromobility+ (EU ERA-NET)

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

AP 1: Befragungen in der Bevölkerung sind im Projektzeitraum auch von anderen Instituten (meist von Verbänden oder Beratungsunternehmen) durchgeführt worden. Diese konzentrieren sich vor allem auf Personen, die sich bisher kaum mit Elektroautos auseinandergesetzt haben. Unterschiede zwischen Gruppen mit unterschiedlichem Erfahrungsgrad werden nicht untersucht. Bei mangelndem Wissen und fehlenden Informationen richten Befragungsteilnehmer ihre Erwartungen aber stark an dem aus, was sie kennen. Dabei ist anzunehmen (und zeigen die Projektergebnisse), dass sich die geäußerten Erwartungen mit zunehmender Erfahrung deutlich ändern können. Die Methoden des Fraunhofer ISI befragen daher differenziert Zielgruppen, welche sich hinsichtlich ihrer Erfahrungen und ihrem Wissen zur Elektromobilität unterscheiden. Dabei stehen besonders aussichtsreiche Zielgruppen für Elektromobilität im Fokus. Befragungen von Nutzern im Rahmen der Feldtests wurden gegen Ende der Projektlaufzeit von verschiedener Seite durchgeführt. Zum aktuellen Zeitraum liegen hier für den deutschsprachigen Raum nach unserem Wissen aber keine Publikationen vor. Mit Lösungen zu angemessenen Mensch-Maschine-Schnittstellen befasst sich auch eine Projektgruppe im Rahmen des Low Carbon Vehicle technology Project (LCVTP) in UK.

AP 4 »Ökobilanz (Fraunhofer IBP-GaBi)«: Vergleichbare Ökobilanzarbeiten im Bereich der Elektromobilität wurden unter anderem vom IFEU Institut, Ökoinstitut, der EMPA Schweiz und ESU Services durchgeführt. Die Untersuchungen der anderen Vorhaben kommen auf vergleichbare Ergebnisse bzw. Interpretationen und verstärken somit die Aussagekraft der in der FSEM erarbeiteten Erkenntnisse. (Aktuelle Ergebnisse sind auf der Webseite des »34. LCA Discussion Forum: Electromobility« zum Download bereit: <http://www.lcaforum.ch/Downloads/DF43/tabid/88/Default.aspx>). Auf dem Gebiet der Leitungselektronik und Innenraumemissionen sind keine wesentlichen anderen Projekte bzw. Arbeiten bekannt.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11 NKBF.

Im Rahmen des Teilprojektes wurden keine Schutzrechte angemeldet. Die entstandenen Veröffentlichungen sind im Folgenden nach Arbeitspaketen aufgelistet:

AP 1:

- [1] Melcher, V., Pawlowski, M., Widlroither, H.: Konzeption und Evaluation einer grafischen Benutzungsschnittstelle zur Ladungsassistenz eines Elektrofahrzeugs. Geplante Veröffentlichung (2011)
- [2] Melcher, V., Fried, F., Widlroither, H.: Design und Validierung eines Soundkonzepts für Elektrofahrzeuge. Geplante Veröffentlichung (2011)
- [3] Peters, A., Dütschke, E., Doll, C.: Consumer and user preferences towards electric mobility. Konferenzbeitrag zur World Conference of Transport Research (WCTR), Lissabon (2010).
- [4] Peters, A., Hoffmann, J.: Nutzerakzeptanz von Elektromobilität. Eine empirische Studie zu attraktiven Nutzungsvarianten, Fahrzeugkonzepten und Geschäftsmodellen aus Sicht potenzieller Nutzer. Ergebnisbericht im Rahmen der Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität. Fraunhofer-ISI, Karlsruhe (2011)
- [5] Peters, A., Popp, M., Agosti, R., Ryf, B.: Elektroautos in der Wahrnehmung der Konsumenten. Zusammenfassung der Ergebnisse einer Befragung in Deutschland. Arbeitspapier im Rahmen der Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität (FSEM). Fraunhofer-ISI, Karlsruhe (2011)
- [6] Peters, A., Agosti, R., Popp, M., Ryf, B.: Electric mobility – a survey of different consumer groups in Germany with regard to adoption. Proceedings to ECEEE Summer Study, June 2011, Belambra Presqu'île de Giens, France (2011)
- [7] Peters, A., Agosti, R., Popp, M. & Ryf, B. (2011): Elektroauto: ja oder nein? Mobility 2.0 – Nachhaltige Mobilität, 2/2011 (2011)
- [8] Peters, A. (2011). E-Auto sollte zum Lebensstil passen. Wirtschaftskurier, 7/2011 (2011)

AP 2:

- [9] Clausen, U. und Schaumann, H.: 3. Wissenschaftsforum Mobilität, »Elektromobilität und urbaner Wirtschaftsverkehr - eBase4Mobility«, 7. Juli 2011, Duisburg.

AP 3:

- [10] Kley, F., Wietschel, M.: Evaluation of European Electric Vehicle Support Schemes. Accepted Paper for the Workshop on »Governance on Innovation towards Sustainability: The global transport sector« to be held 16-17 September 2010. Stockholm (2010)
- [11] Kley, F.: E-Mobility in Germany – Current Activities and Future Businesses. Advanced Automotive Battery Conference, 2-5 February 2010. Mainz (2010)
- [12] Kley, F., Wietschel, M., Dallinger, D.: Evaluation of European electric vehicle support schemes. In: Paving the Road to Sustainable Transport: Governance and Innovation in Low-Carbon Vehicles, herausgegeben von M. Nilsson, K. Hillman, A. Rickne und T. Magnusson, Routledge Studies in Ecological Economics, Kap. 8. Routledge. ISBN 978-0-415-68360-9 (2012, in Druck)

AP 4:

- [13] Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Wendl, M. und Wietschel, M.: Lithium für Zukunftstechnologien. Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Projektergebnisse aus den Projekten Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (FSEM) und Innovationsallianz Lithium-Ionen-Batterie (LIB2015). Karlsruhe, 12/2009 (2009)
- [14] Angerer, G.: Kupfer für Zukunftstechnologien. Inanspruchnahme der geologischen Ressourcen unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Bericht im Rahmen der Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität (FSEM), Karlsruhe, April 2010 (2010)
- [15] Baumann, M.: Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Abbildung der Nutzungsphase von Elektromobilitätskonzepten in der Ökobilanz: Fraunhofer IBP, Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung, Stuttgart (2010)
- [16] Held, M., Baumann, M.: Assessment of the environmental impacts of electric vehicle Concepts, Life Cycle Management (LCM) Konferenz, Berlin, August 2011 (2011)
- [17] Baumann, M.; Held, M.: Development of a methodical approach for the description of the use phase of electric vehicle concepts in life cycle assessment. Life Cycle Management (LCM) Konferenz, Berlin, August, 2011 (2011)
- [18] Hengrasmee, C., Schischke, K., Ospina, J., Rifer, W., Köhler, A. R., Chancerel, P., Schlösser, A.: ReDesign – Reaping the Benefits of Making the Recycler’s Job Easier. In: Kühr, Rüdiger et.al (Hrsg.), Solving the E-Waste Problem (Arbeitstitel) (2011)
- [19] Nissen, N. F., Schlösser, A.: Ressourcenverfügbarkeit in der Automobilelektronik. In: Elektronik ecodesign, Sonderheft 8/2011 (2011)
- [20] Nissen, N. F., Wittler, O., Middendorf, A., Lang, K.-D.: »Eco-Reliability – Die Verknüpfung von GreenTech und HighTech«. 4. Fachkongress MicroCar 2011, Micro- und Nanowerkstoffe für Automobilelektronik, Elektromobilität und Clean Microtechnologies, Leipzig, 1.3.2011 (2011)
- [21] Teller, P., Brandstät, P.: Elektromobilität – neue akustische Herausforderung für Gesellschaft und Prüfstände, Fortschritte der Akustik - DAGA 2011, Düsseldorf, Seite 129 – 130 (2011)
- [22] Fuchs, R. A., Hartwig, B.: Krachmacher für leise Elektroautos? Internet-Beitrag Deutsche Welle: <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,6459010,00.html>, 4. April 2011 (2011)
- [23] Ziemons, A.: Ingenieure tüfteln am perfekten Geräusch für Elektroautos. Deutsche Welle-Wissenschaftsmagazin, <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,6497844,00.html>, 8. April 2011 (2011)
- [24] Mrotzek, A.: Identification and recovery of critical materials of secondary source. International Conference on Energy from biomass and waste, 26.-27.01.2011, London, UK (2011)
- [25] Mrotzek, A., Lohmann, H.: Identification and Recovery of Critical Materials of Secondary Sources (Example Li-Ion Batteries), 03.-07.10.2011, Sardinia (Vortrag mit Konferenzband) (2011)
- [26] Mrotzek, A., Lohmann, H.: Recyclingprozesse zur Aufbereitung von Li-Ionen-Akkumulatoren, waste to energy + recycling, Bremen 18.-19.05.2011 (Vortrag) (2011)
- [27] Lohmann, H., Mrotzek, A.: Recycling von Li-Ionen Batterien, Workshop mit Projektkonsortien zum Batterierecycling, 30.10.2010, Oberhausen (2010)

AP 5:

- [28] Doll, C., Gutmann, M., Wietschel, M.: Integration von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Flotten. Ergebnisbericht im Rahmen der Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität. Fraunhofer-ISI, Karlsruhe (2011)
- [29] Doll, C., Kley, F.: Infrastrukturen für Integrierte Elektromobilitätssysteme. Proceedings der Konferenz Ecomobil, 15.-16.11.2010, Offenburg (2011), (im Druck)
- [30] Doll, C., Schubert, K., Wietschel, M.: Externe Kosten der Elektromobilität im regionalen Kontext. Ergebnisbericht im Rahmen der Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität. Fraunhofer-ISI, Karlsruhe (2011), (in Vorbereitung)
- [31] Doll, C., Begon, C., Wietschel, M.: Integration von Elektrofahrzeugen in den öffentlichen Nahverkehr. Ergebnisbericht im Rahmen der Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität. Fraunhofer-ISI, Karlsruhe (2011), (in Vorbereitung)
- [32] Doll, C., Wietschel, M., Held, M.: Gesamtkonzepte der städtischen Mobilität unter Einbezug batterieelektrischer Fahrzeuge. Ergebnisbericht im Rahmen der Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität. Fraunhofer-ISI, Karlsruhe (2011), (in Vorbereitung)



Teilprojekt

**»Analyse von Wertschöpfungsarchitekturen, Kompetenz-
/Ressourcenprofilen und Geschäftsmodellen«**

Teilnehmende Fraunhofer-Institute: IAO, ITWM, ISI, IML, IISB

Teilprojektleiter: Florian Rothfuss

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

I. Zusammenfassende Darstellung

1. Aufgabenstellung

Elektromobilität stellt ein großes Potenzial für die Gesellschaft im Allgemeinen und die Automobilindustrie im Besonderen dar. Dieses Potenzial kann die deutsche Automobilindustrie jedoch nur dann heben, wenn sie auf den anstehenden Wandel zur Elektromobilität, der als disruptiv bezeichnet werden kann, vorbereitet ist. Dies gilt nicht nur für die großen OEMs, sondern insbesondere für die vielen Tausend Firmen, welche als Tier 1, Tier 2 oder Tier 3 Zulieferer für einen Großteil der in der Automobilindustrie Beschäftigten Verantwortung tragen.

Natürlich wird jedes Unternehmen letztlich unternehmensspezifische Strategien für den Umstieg auf die Elektromobilität ausarbeiten müssen. In diesem Teilprojekt werden allerdings die Grundlagen hinsichtlich einer Wissens- und Methodenbasis geschaffen, auf deren Basis unternehmensspezifische Strategien aufgebaut werden können. Hierzu wurden zum einen die entsprechenden Komponenten sowie deren Subkomponenten identifiziert und analysiert. Dabei wurden sowohl die Produktionsprozesse als auch Kostenkalkulationen für die Komponenten erstellt. Zum anderen erfolgte der Aufbau einer Simulationsumgebung für Produktion und Absatz einer (teilweisen) auf Elektromobilität basierenden Automobilindustrie. Es wurde das Ziel verfolgt, Einflussmöglichkeiten und Strategien zur Begegnung des Wandels durch die aufkommende Elektromobilität zu testen, um die Voraussetzungen für eine starke deutsche Automobilindustrie auch im Zeitalter der Elektromobilität zu schaffen.

Der im Rahmen des Teilprojekt aufgebaute Arbeitskreis »FutureCar« diente sowohl der Diskussion aktueller Entwicklungen im Rahmen des Projektes FSEM, als auch zur Erforschung der erfolgversprechenden Migrationspfade hin zur E-Mobility-Automobilindustrie über die Projektlaufzeit hinaus. Das Netzwerk verfolgte auch die Zielsetzung, Zulieferbetriebe bezüglich der Positionierung in einer elektromobilen Wertschöpfungsarchitektur zu unterstützen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

Das beantragte Teilprojekt hatte eine Laufzeit vom 01.05.2009 bis 31.07.2011. Die vorgesehene Laufzeit des Projektes entspricht der Gesamtlaufzeit der FSEM. Es erfolgte eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes zum 31.07.2011 im Zuge der gesamten Laufzeitverlängerung der FSEM. Im Folgenden ist ein Balkenplan mit den Laufzeiten der fünf Arbeitspunkte (AP) und der zentralen Meilensteine dargestellt.

	2009												2010												2011						
Arbeitspakete	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7			
Akzeptanzuntersuchungen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Analyse von Wertschöpfungsarchitekturen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Entwicklung und Simulation von B2B-Geschäftsmodellen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Ableitung von Handlungsempfehlungen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Verstetigung der Ergebnisse	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Meilensteine																															
Vorstellungen der Akteure aufgenommen											▲																				
Visualisierungsumgebung erstellt															▲																
Simulationsumgebung erstellt																	▲														
Szenarien zu Wertschöpfungsarchitekturen erstellt																			▲												
Szenarien getestet																					▲										
Innovationsnetzwerk gegründet																											▲				

Im Teilprojekte wurden sechs Meilensteine definiert. Die Meilensteine bezeichnen folgende kritischen Phasen des Projektes, bei deren Erreichung eine Überprüfung der Projektziele notwendig wird:

- Meilenstein 1: Vorstellungen der Akteure aufgenommen: Kritisch für Wertschöpfungs-szenarien
- Meilenstein 2: Visualisierungsumgebung erstellt: Kritisch für visuelle Darstellung der Wertschöpfungsarchitekturen
- Meilenstein 3: Simulationsumgebung erstellt: Kritisch für Evaluierung der Wertschöpfungs-szenarien
- Meilenstein 4: Szenarien für Wertschöpfungsarchitekturen erstellt: Kritisch für Evaluierung
- Meilenstein 5: Szenarien getestet: Kritisch für Handlungsempfehlungen
- Meilenstein 6: Innovationsnetzwerk gegründet: Kritisch für Verstetigung

Die definierten Meilensteine und Laufzeiten der Arbeitspakete wurden im Projektverlauf erreicht und eingehalten.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Für das Vorhaben wurden keine Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte genutzt. Die Forschungsarbeiten setzten jedoch auf Vorarbeiten der beteiligten Institute sowie wissenschaftlich anerkannten Methoden und Modellen auf. Ebenfalls wurde open-source Simulationssoftware eingesetzt.

- Im Rahmen des Teilprojektes wurde die Multi-Agenten-Simulationsumgebung »REPAST« (Recursive Porous Agent Simulation Toolkit) verwendet. Repast ist eine Java-Klassenbibliothek, die von der Social Science Research Computing der Universität Chicago (USA) entwickelt wurde. Mit Repast können agentenbasierte Simulationen mit Hilfe der Sprache Java durchgeführt werden. Es bietet eine Klassenbibliothek an, um eine agentenbasierte Simulation zu erzeugen, laufen zu lassen, anzuzeigen und Daten zu sammeln.
- Als Grundlage des produktionsseitigen Simulationsmodells wurde der Ansatz des »Value Networks« gewählt. Die Dynamik innerhalb des Systems wird hierbei durch das Zusammenspiel vom Absatz im Konsumentenmarkt und der erzielbaren Skaleneffekte bestimmt. Die Referenzwerte der eingesetzten Erfahrungseffekte orientierten sich an Größen der Automobilbranche, den in Referenzbranchen erzielten Werten und an ersten Abschätzungen für großformatige Lithium-Ionen-Zellen. Das Kostenmodell der Herstellungskosten orientierte sich unter anderem an den von Nelson et al. 2009, Kalhammer et al. 2009 und Lache et al. 2009 veröffentlichten Werten.
- Als Erklärungsmodell für den Aufbau möglicher Geschäftsmodelle diente Osterwalders Business Model Ontologie, wobei die »Value Proposition« durch die örtliche Verteilung von angenommenen Mark-Ups, die Wertschöpfungskettenintegration durch die Struktur des »Value Networks« und die finanzielle Perspektive durch die Kombination beider Umstände repräsentiert wurde. Monetäre Rahmenbedingungen und unterstützende Faktoren können im »Value Network« des Simulationsmodells direkt integriert werden. Der

Vorteil davon ist, dass der Effekt verschiedener Modelle der Bezuschussung an allen Stellen der Wertschöpfungskette erprobt werden kann.

Ebenfalls wurde auf Vorarbeiten der beteiligten Institute in den jeweiligen Bereichen aufgebaut. Beispielhaft sei hier das Fraunhofer IISB erwähnt, als einer der Koordinatoren der »Automotive Power Electronics Roadmap« des europäischen Industrienetzwerks ECPE. Auf Vorarbeiten aus diesen Roadmap-Aktivitäten konnte ebenfalls aufgebaut werden.

4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Während des Vorhabens wurden kontinuierlich Informationsrecherchen im Sinne Nr. 6.1 NKBF 98 durchgeführt.

Verwendete Fachliteratur (Auszug):

- [1] Kalhammer, F., Kopf, B., Swan, D., Roan, V., Walsh, M.: Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology - Report of the ARB Independent Expert Panel 2007, Prepared for State of California Air Resources Board Sacramento, California (2007)
- [2] Nelson, P., Santini, D., Barnes, J.: Factors Determining the Manufacturing Costs of Lithium-Ion Batteries for PHEVs, EVS24 Stavanger, Norway, May 13-16, (2009)
- [3] Lache, R., Galves, D., Nolan, P., Sanger, K., Kitaura, T., Gehrke, T., Toulemonde, G., Rokossa, T., Rana, S., Chang, S., Ha, V.: Electric Cars: Plugged In 2 - A mega-theme gains momentum, Deutsche Bank FITT Research (2009)
- [4] North, M.J., Howe, T.R., Collier, N.T., Vos, J.R.: The REPASt Symphony Development Environment. In Proceedings of the Agent 2005 Conference on Generative Social Processes and Mechanisms (2005)
- [5] Brownstone, D., Bunch, D.S., Train, K.: Joint mixed logit models for stated and revealed preferences for alternativ-fuel vehicles. In Transportation Research Part B 34 (2000) 315-338
- [6] Electrical and Electronics Technical Team Roadmap. FreedomCAR and Fuels Partnership, (2006)
- [7] Kamath, H., Burke, A.: Evaluation of Emerging Battery Technologies for Plug-in Hybrid Vehicles, Report for California Air Resources Board of the California Environmental Protection Agency (2009)
- [8] Lipman, T.: The Cost of Manufacturing Electric Vehicle Drivetrains, Report for California Air Resources Board (1999)
- [9] Diez, Willi: Automobil-Marketing: Navigationssysteme für neue Absatzstrategien; mi-fachverlag (2006)
- [10] Tesfatsion, Leigh: Agent-Based Computational Economics: Modelling Economics as Complex Adaptive Systems, Information Sciences (2003)

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

Es erfolgte in vielfältiger Weise ein Austausch bezüglich relevanter Aspekte und Informationen mit Instituten anderer FSEM-Teilprojekte. Dieser Austausch und die direkte Zusammenarbeit haben sehr zum Erfolg des Teilprojektes beigetragen. Beispielsweise sei hierfür genannt:

- Austausch mit dem Teilprojekt »Gesamtkonzepte und Gestaltungsoptionen« zum Transfer der Ergebnisse aus den Kundenakzeptanzuntersuchungen für die Initialisierung der Konsumenten-Agenten sowie Zusammenarbeit mit Teilprojekt »Gesamtkonzepte und Gestaltungsoptionen« zum Austausch und Diskussion von Modellierungsansätzen für das Konsumentenverhalten
- Eine enge Zusammenarbeit erfolgte auch mit den Teilprojekten »Radnabenmotor«, »Leistungselektronik/Antriebstechnik« und »Energieerzeugung/Netzintegration«, insbesondere mit Blick auf die Basisdaten (Bill-of-Materials) für Kostenanalysen, Prozessbeschreibungen, Ökobilanz- und Ressourcenverfügbarkeitsuntersuchungen.
- Kooperation mit weiteren Fraunhofer Instituten (Fraunhofer IAO, IISB) im Rahmen des Innovationsnetzwerks FutureCar zur Vervollständigung der technologischen Kompetenz im Bereich E-Maschine und Leistungselektronik

Selbstverständlich prägte auch eine intensive Zusammenarbeit und Kommunikation die Arbeit innerhalb des Teilprojektes. Durch diesen Austausch zwischen den unterschiedlichen Instituten, welche teilweise als »Lieferant« von Recherchedaten und Methoden sowie teils als »Übersetzer« dieser Daten und Methoden in Software auftreten, konnte eine vielseitige Simulationsumgebung unter Berücksichtigung der Anforderungen unterschiedlicher Disziplinen aufgebaut werden.

II. Erweiterte Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis im Einzelnen

Im Teilprojekt wurde untersucht, wie sich die Elektrifizierung des Antriebstrangs auf die Wertschöpfungsketten der Automobilindustrie auswirken wird. Zur Beschreibung dieser Auswirkungen fanden unter anderem eine qualitative, eine quantitative und eine simulative Analyse der Wertschöpfungswirkungen im Rahmen der definierten Arbeitspakete statt. Die Ergebnisse dieser, sowie die Erreichung der definierten Ziele werden im Folgenden beschrieben:

AP 1: Akzeptanzuntersuchungen

Akzeptanzuntersuchungen im Bereich Business-to-Business (B2B) lieferten eine Wissensbasis der Vorstellungen der OEMs und Zulieferer über eine auf Elektromobilität basierende Automobilindustrie bezüglich Wertschöpfungsverteilung, Ressourcen-/Kompetenzgefüge sowie mögliche Geschäftsmodellen. Die Vorstellungen und Bedürfnisse sind strukturiert und formalisiert in der Simulation und den Agentenmodellen abgebildet.

Diskussion im Industriearbeitskreis

Fraunhofer IAO und IISB haben den Arbeitskreis »FutureCar« zusammen mit aktuell 16 Projektpartnern aus der Zulieferindustrie (bspw. Bosch, Denso, ThyssenKrupp, Siemens, Alutec, EDAG, TÜV, Leoni, ZF, Veritas, ...) gegründet. Dieser Arbeitskreis dient sowohl der Diskussion aktueller Entwicklungen und identifizierter Trends im Rahmen des Projektes FSEM als auch der Erforschung der erfolgversprechenden Migrationspfade hin zur E-Mobility-Automobilindustrie über die Projektlaufzeit hinaus. Die Plattform ermöglichte es, neben der Forschung innerhalb Fraunhofer auch den Blick für die Bedürfnisse der Industrie zu wahren und einen Arbeitsstand oder erste Ergebnisse der FSEM in die Industrie zu bringen und hierzu Rückmeldung einzuholen.

Befragung externer Experten

Im Rahmen des Projektes wurden Akzeptanzuntersuchungen im Bereich B2B durchgeführt. Hierzu wurde ein Fragebogen erstellt und eine Auswertung der etwa 80 Rückläufer vorgenommen. Des Weiteren wurden Interviews mit 15 nationalen und internationalen Experten durchgeführt. Ziel der Befragung war die Aufnahme der Erwartungen von Industrie und Forschung bezüglich den Änderungen der Wertschöpfung in der Automobilindustrie auf dem Weg in die Elektromobilität. Wichtige erzielte Ergebnisse hieraus sind:

- Es ist eine hohe Sensibilisierung vorhanden
- Langfristig wird sehr hohes Potential in Elektromobilität gesehen; kurzfristig wenig Änderungen erwartet
- Aktivitäten bisher meist nur konzeptionell; Produktionskapazitäten, etc. bisher nur bedingt aufgebaut
- Innovative Zulieferer sind bereits jetzt stark aktiv, um sich zu positionieren

Des Weiteren wurden Experteninterviews zur Wertschöpfungsverteilung und Produktion geführt und ausgewertet. Fokussierungen hierbei waren:

- Kostenmodell der Batterieproduktion für große und kleine Produktionsvolumen
- Basisstruktur zur Analyse und Abbildung der heutigen Wertschöpfungsarchitekturen

- Diskussion von Migrationspfaden (Verbrennungsmotor => Elektromotor) hinsichtlich Wertschöpfungsschritten
- Chancen/ Risiken-Analyse für die Zulieferindustrie, aber auch notwendige Kompetenzen und Ressourcen

Mit den beschriebenen Arbeitsschritten wurden die im Antrag formulierten Ziele erreicht. Die Arbeiten wurden fristgerecht abgeschlossen und durch die Teilprojektpartner dokumentiert.

AP 2: Analysen von Wertschöpfungsarchitekturen

Analysen von Wertschöpfungsarchitekturen in einer E-Mobility-Automobilindustrie werden benötigt, um sichtbar zu machen, welche Kompetenzen/Ressourcen und Wertschöpfungsschritte in einer auf Elektromobilität basierenden Automobilindustrie benötigt werden. Diese Aufarbeitung erfolgt differenziert nach den unterschiedlichen Elektromobilitätskonzepten. Das erarbeitete Wissen stellt die Grundlage für die folgende formalisierte Konfiguration und Simulation von Geschäftsmodellalternativen für eine (teilweise) auf Elektromobilität basierenden Automobilindustrie dar.

Qualitative Analyse

In der qualitativen Analyse wurden die Herstellungsschritte für die Kernkomponenten des elektrifizierten Antriebstrangs aufgenommen. Dazu wurden die Kernkomponenten definiert und die nötigen Herstellungsschritte im Rahmen von Sekundärdatenanalysen sowie Experteninterviews und -workshops beschrieben. Im Anschluss wurden die für die Herstellung der Komponenten benötigten Qualifikationen identifiziert. Die qualitative Analyse der Herstellungsschritte von Komponenten des elektrifizierten Antriebstrangs gliederte sich damit in die folgenden Schwerpunkte:

- Basisstruktur zur Analyse und Abbildung der heutigen Wertschöpfungsarchitekturen
- Definition der zu untersuchenden Komponenten
- Erarbeitung der Herstellungsschritte der einzelnen Komponenten
- Analyse der benötigten Qualifikationen

Quantitative Analyse

In der quantitativen Analyse wurden Referenzfahrzeuge mit elektrifiziertem oder vollelektrischem Antriebsstrang definiert und die jeweils verbauten Komponenten herausgearbeitet sowie bezüglich ihrer Kosten abgeschätzt. Anschließend wurde eine Metastudie über die veröffentlichten Marktdiffusionsszenarien durchgeführt und ein Referenzszenario definiert. Basierend auf diesem Referenzszenario und den ermittelten Wertschöpfungsarchitekturen in den Fahrzeugen wurde herausgearbeitet, wie sich die Wertschöpfungsverteilung für die Fahrzeugindustrie bis zum Jahr 2020 entwickeln wird. Die quantitative Analyse der Wertschöpfungsveränderungen bezüglich der Komponenten des Antriebstrangs beinhaltete damit folgende Themenbereiche:

- Definition von Referenzfahrzeugen
- Entwicklung von Diffusions-Szenarios
- Abschätzung der Herstellungskosten der Komponenten
- Errechnung der Wertschöpfungsveränderungen für die jeweiligen Komponenten

Mit den beschriebenen Arbeitsschritten wurden auch in diesem AP die im Antrag formulierten Ziele erreicht. Die Arbeiten wurden fristgerecht abgeschlossen und durch die Teilprojektpartner dokumentiert.

AP 3: Entwicklung und Simulation von B2B-Geschäftsmodellen

Entwicklung und Simulation von B2B-Geschäftsmodellen für Elektromobilität wurden in der Visualisierungs- und Simulationsumgebung mit integrierten Agentenmodellen durchgeführt. Die Fokussierung der Umgebung erfolgte fokussiert auf den Anwendungsfall Elektromobilität. Neben dem Aufbau der Umgebung wurden erste Simulationsergebnisse der entwickelten Geschäftsmodelle ebenfalls im Rahmen des Projektes durchgeführt.

Simulative Analyse

Im Rahmen der simulativen Analyse wurde eine Simulationsumgebung implementiert, mit Hilfe derer die Auswirkungen einer fortschreitenden Verbreitung der Elektromobilität auf die Wertschöpfungskette in einem dynamischen System betrachtet werden kann. Hierbei wurden sowohl Produzenten- als auch Konsumentenagenten implementiert.

Im Simulationsmodell sind die relevanten Marktakteure als heterogene Agenten mit ihrem jeweils typischen Entscheidungsverhalten abgebildet. Zentrale Modellkomponente ist der Wettbewerb verschiedener Antriebstechnologien und deren vorgelagerte Produktionsprozesse. Die Differenzierung der Technologien erfolgte hinsichtlich ausgewählter technischer und ökonomischer Attribute, deren Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit durch einschlägige Literatur gestützt wurde. Zur Abbildung der Kaufentscheidungen der Konsumentenagenten dient ein multinomiales Logit-Modell, das neben technischer und ökonomischer Eigenschaften der Antriebstechnologien speziell auch lokalen Informationsfluss und demografische Faktoren in den Entscheidungsprozess der Konsumenten mit einbezieht. Um diese weichen Faktoren der Kaufentscheidung im Modell zu integrieren, wurde eine virtuelle Welt in Form eines Grids als Aktionsradius der Konsumenten hinterlegt. Unter Verwendung empirischer Verteilungen des Mikrozensus zu Mobilitätsbedürfnissen unter verschiedenen Urbanitätsgraden wurden heterogene Wohnregionen definiert, in denen die Konsumenten unter lokalem Einfluss hinsichtlich Verbreitungsgrad und Infrastruktur der Technologien stehen.

Die Wertschöpfungskette der einzelnen Antriebstechnologien kann in der Simulationsumgebung mit detaillierter Produktions- und Kostenstruktur für unterschiedliche technische Varianten der Produktion hinterlegt werden. So können Größeneffekte und deren Auswirkung auf die Kostenstruktur einzelner Produktionsschritte innerhalb der Wertschöpfungskette sowie der Antriebstechnologien selbst simuliert werden. Weiterhin können die Verwendung alternativer Produktkomponenten im Herstellungsprozess sowie Produkt- und Prozessinnovationen leicht abgebildet und analysiert werden. Ebenso wurden über den Aufbau der Fahrzeugproduktion nach dem sogenannten Value-Network-Konzept die Prozessschritte und Kosten für die jeweiligen Komponenten der Fahrzeuge beschrieben. Dieses Netzwerk bildet das Abbild einer möglichen Konstellation der Wertschöpfungsketten, die in verschiedene Fahrzeugtypen münden. Über eine graphische Oberfläche kann die Struktur nach Belieben verändert werden. Bild 1 zeigt das aufgebaute Value Network der Batterieproduktion in der Visualisierungsumgebung des Simulationstools. Jeder Knoten im System ist mit den entsprechenden Produktionskosten und Margen sowie den erreichbaren Skaleneffekten hinterlegt. Diese Änderungen erlauben es, die Wertschöpfungsverteilung innerhalb der Simulation an ein gegebenes Kompetenzprofil oder Geschäftsmodell anzupassen. Durch die zusätzliche Anwendung von finanziellen Anreizen, die derzeit im Zentrum der politischen Diskussion rund um Elektromobilität stehen, können Effekte auf den Absatz simuliert und visualisiert werden.

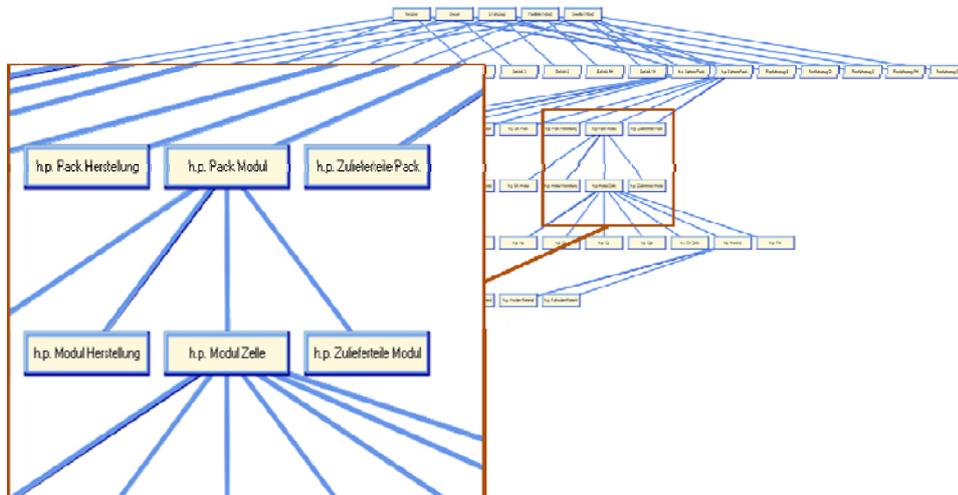


Bild 1: Value Network der Batterieproduktion in der Visualisierungsumgebung des Simulationstools

Der Hauptvorteil dieses zusammenhängenden Modells von Konsumenten- und Produzentenseite ist, dass in der Simulation des zukünftigen Fahrzeugabsatzes über die Zeit entsprechende Kostensenkungspotentiale mit einfließen können. Dies erlaubt die Bewertung der Attraktivität verschiedener Geschäftsmodelle, Änderungen in der Kompetenzlandschaft von Unternehmen oder technischer Alternativen. Zusammenfassend lässt sich der Aufbau der Simulationsumgebung zur simulativen Analyse der Wertschöpfungswirkungen wie folgt charakterisieren:

- Beschreibung multinominales Logit-Modell als Modell für Entscheidungsverhalten (inkl. Attribute zur Entscheidung und Gewichtung)
- Beschreibung der Prozessschritte und Kosten für die jeweiligen Komponenten der Fahrzeuge
- Simulation Entwicklung des Fahrzeugabsatzes über die Zeit

Mit den beschriebenen Arbeitsschritten wurden auch in diesem AP die im Antrag formulierten Ziele erreicht. Die Arbeiten wurden fristgerecht abgeschlossen und durch die Teilprojektspartner dokumentiert.

AP 4: Ableitung von Handlungsempfehlungen

Dieser AP beinhaltete die Ableitung von Handlungsempfehlungen auf makro- und mikroökonomischer Ebene, basierend auf den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen und Simulationen. Die Inhalte beziehen sich dabei auf die Gruppe der Zulieferindustrie, hinsichtlich Forschung und Entwicklung, erfolgversprechender Geschäftsmodellansätze und Migrationsstrategien, als Vorarbeit zur unternehmensspezifischen Ausarbeitung.

Auswertung der Analysen

Kritische Gestaltungsparameter der Komponentenproduktion wurden identifiziert und analysiert. Daraus wurden die wichtigsten Implikationen für die Wertschöpfungsarchitektur und entsprechende Geschäftsmodelle analysiert. Zusammenfassend lässt sich als Ergebnis aus den Analysen festhalten:

- Die Herstellungsprozesse der Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs unterscheiden sich grundlegend von den Prozessen der heutigen Komponenten in Anlagentechnik und Qualifikation.
- Bis auf das Hybridgetriebe, welches im Vergleich zum konventionellen Getriebe einen Komplexitätszuwachs erfährt, wird sich der Herstellungsaufwand im Vergleich zu den konventionellen Komponenten reduzieren und stark automatisiert ablaufen.
- Heute im industriellen Bereich eingesetzte Komponenten wie Elektromotoren oder Leistungselektronik sind nicht einsatztauglich für die Großserien-Automobilproduktion. Ebenfalls sind die heutigen Herstellungsprozesse im industriellen Bereich massiv an die Anforderungen der Automobilindustrie anzupassen.
- Bis 2020, dem Betrachtungshorizont der Analyse, wird der größte Zuwachs an Wertschöpfung in den Effizienztechnologien für den Verbrennungsmotor liegen. Erst auf dem 2. Platz folgt die Traktionsbatterie.

Die Batterie als zentrale Systemkomponente mit hohem Potenzial zur Wertschöpfung wurde detailliert aufgeschlüsselt und analysiert:

- Im Jahr 2020 wird die Traktionsbatterie mit rund 30-40% Wertschöpfungsanteil die zentrale Komponente im Elektrofahrzeug darstellen.
- Die notwendigen Skaleneffekte für eine massenmarktaugliche Batterieproduktion sind aktuell schwer zu erreichen. Es besteht ein erheblicher Bedarf, die Produktion hinsichtlich einer durchgängigen Automatisierung zu optimieren. Dominierende Entwicklung wird die Erreichung von Skaleneffekten sein. Dabei könnte sich die Zahl für Standard-Batteriezellhersteller auf deutlich unter 10 Anbieter weltweit reduzieren.
- Diese werden in räumlicher Nähe zu den OEM ihre Produktionszentren aufbauen, da der Transport von fertigen Batteriezellen, Modulen und Systemen weitreichenden Sicherheitsauflagen unterliegt und teuer ist. Für Automatisierungsanbieter mit Know-how in der Prozesstechnik, Reinraumtechnologie, Befüllungstechnologie, Schneidetechnologie, Wickeltechnik sowie im Handling von Rollenware und Handling von Zellen, Modulen und Systemintegration kann sich ein großer Markt entwickeln.
- OEM und wenige »Giant-Supplier« haben die Chance, die Integration von Standardzellen auf Systemebene und evtl. auf Modulebene zu übernehmen und hierbei große Wertschöpfungsanteile zu sichern. Themen der Fahrzeugintegration auf Systemebene, wie z.B. Kühlung, sind für mittlere bis große Zulieferer interessant, insbesondere in diesem Feld sind Kooperationen, mit derzeit noch branchenfremden Akteuren, abseits der Zellproduzenten zu erwarten.
- Vorerst ist eine Differenzierung durch Zellchemie nicht zu erwarten. Bei Zelltechnologien der nächsten Generation ist dies jedoch nicht auszuschließen. Dann können kleine Hersteller mit potentiellen Substitutionstechnologien evtl. durch Venture Capital oder Aufkauf ab 2020 am Markt auftreten. Ankäufe durch OEMs sind jedoch nicht zu erwarten, dies wird eher seitens der Batteriehersteller oder Zulieferer passieren.

Mit den beschriebenen Arbeitsschritten wurden auch in diesem AP die im Antrag formulierten Ziele erreicht. Die Arbeiten wurden fristgerecht abgeschlossen und durch die Teilprojektpartner dokumentiert.

AP 5: Verstetigung der Ergebnisse

Die Arbeiten zur Analyse der elektromobilitätsinduzierten Wertschöpfungswirkungen im Industriearbeitskreis wurde im Rahmen des Innovationsnetzwerkes FutureCar weitergeführt und sind damit verstetigt. Neben der Diskussion von Forschungsansätzen und Ergebnissen, werden die Zulieferbetriebe bezüglich der Positionierung in einer elektromobilen Wertschöpfungsarchitektur unterstützt. Im Rahmen des Industriearbeitskreises erarbeiten die Fraunhofer Institute auf Basis von Technologie-Screening, Trendstudien, Szenarien und Roadmaps, die aus dem Wandel zur Elektromobilität resultierenden Auswirkungen sowie Chancen und Risiken für die Zulieferindustrie. Damit kann die unternehmensspezifische Strategieentwicklung auf eine belastbare Basis gestellt und unternehmensübergreifenden Produktentwicklungen der Weg geebnet werden.

Das Innovationsnetzwerk FutureCar wurde als industriefinanzierte Weiterentwicklung des Industriearbeitskreises konzipiert, in welchem das Fraunhofer IAO und das Fraunhofer IISB die leitende und gestaltende Rolle einnehmen. Die methodische Kompetenz und die Erfahrung der Institute als neutrale wissenschaftliche Instanz werden genutzt, um die sich aus dem Systemwechsel zur Elektromobilität ergebenden Chancen für die Zulieferindustrie zu identifizieren, zu evaluieren und Strategien zu deren Erschließung durch die Projektpartner abzuleiten. In regelmäßigen Projektmeetings und Workgroups können die Projektpartner aktiv an der inhaltlichen Ausrichtung und Fokussierung mitwirken.

Das kooperative Grundverständnis des Verbundes kann einen entscheidenden Beitrag leisten, den Innovationsprozess zu forcieren und in der gemeinsamen praktischen Umsetzung von Forschungserkenntnissen bewusste und zielgerichtete Akzente zu setzen. Die unterschiedlichen Erfahrungen und Perspektiven der beteiligten Unternehmen sorgen in Verbindung mit Spitzenforschung für eine enorme Schubkraft bei der breit angelegten Realisierung neuartiger Konzeptionen und Lösungen. Das bewährte Modell einer vorwettbewerblichen Verbundforschung ermöglicht es, durch die gemeinsame Finanzierung der Forschungs- und Entwicklungsarbeit Fragestellungen ganzheitlich und in einer ausreichenden Tiefe und Breite zu erforschen und bietet damit entscheidende Vorteile gegenüber isolierten Forschungsaktivitäten einzelner Unternehmen.

Mit den beschriebenen Arbeitsschritten wurden auch in diesem AP die im Antrag formulierten Ziele erreicht. Die Arbeiten wurden fristgerecht abgeschlossen und durch die Teilprojektpartner dokumentiert.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

Die Voraussetzungen für eine über den Zeitverlauf begleitende Analyse der Auswirkungen und möglichen Ausprägungsformen einer E-Mobility-Automobilindustrie, insbesondere für die deutsche Zulieferindustrie, sind mit den erhobenen Daten und der Integration in die Simulationsumgebung geschaffen. Die Verwertbarkeit der Ergebnisse ist wie folgt geplant:

Angebotene Dienstleistungen

Folgende weitere Dienstleistungen können Dank des Verbundvorhabens von den projektbeteiligten Instituten angeboten werden:

- Analyse der Auswirkung der Elektromobilität auf das Produktportfolio, die Produktion sowie die Arbeitsplätze (Qualität und Quantität) in Unternehmen der Automobilindustrie. (Fraunhofer IAO)
- Entwicklung von Innovationsstrategien für die Zuliefererindustrie zur Positionierung in einer elektromobilen Automobilindustrie. (Fraunhofer IAO)
- Durchführung von Studien für Länder und Regionen zur Analyse der Auswirkung der Elektromobilität auf den Wirtschaftsstandort. (Fraunhofer IAO)
- Vergleichende Kostenanalysen für verschiedene elektrische Antriebsstrangvarianten; Durchführung von Studien zu den Kosteneffekten, z.B. von der Wahl der Traktionsbordnetzspannung, von Bordnetz- und Schaltungstopologien sowie von unterschiedlichen Bauelemente-, Aufbau- und Entwärmungstechnologien. (Fraunhofer IISB)
- Darüber hinaus wird das Fraunhofer IISB die Ergebnisse insbesondere im Rahmen der Aus- und Weiterbildung nutzen (DRIVE-E Akademie, Vorlesung »Elektromobilität« an der Universität Erlangen, Studienmodul »E-Traktion« an der Volkswagen AutoUni, etc.). (Fraunhofer IISB)

Eingeworbene Forschungsprojekte

- Das Verbundforschungsprojekt »Innovationsnetzwerk FutureCar« wurde als industriefinanzierte Weiterführung des Arbeitskreises FutureCar konzeptioniert und analysiert die elektromobilitäts-induzierten Wertschöpfungswirkungen für Zulieferfirmen. Ziel des Innovationsnetzwerks FutureCar ist die gemeinsame Erforschung und Beantwortung von Fragestellungen, die mit dem Wandel zur Elektromobilität verbunden sind und die Grundlage für die Ausarbeitung einer unternehmensspezifischen Strategie darstellen. Mit aktuell 16 beteiligten Firmen ist das Konzept auf großes Interesse in der Industrie gestoßen. (Fraunhofer IAO, IISB)
- Das Forschungsvorhaben »ELAB –Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung« geht von einer besonderen Bedeutung des Wandels zur Elektromobilität für bestehende automobiler Produktionswerke im Aggregatbereich aus. Insbesondere werden Wirkungen auf Beschäftigung, auf Personal- und Arbeitspolitik, auf Unternehmenskonzepte sowie auf die automobiler Wertschöpfungskette erwartet. Im Rahmen der Forschungsarbeit ist die zentrale Fragestellung zu beantworten, welche Beschäftigungswirkungen in qualitativer wie quantitativer Hinsicht aus dem Trend zu alternativen Antriebskonzepten in einem idealtypischen Automotive-Aggregatewerk resultieren. Die Bearbeitungszeit des Projektes wird voraussichtlich in der ersten Hälfte des Jahres 2012 abgeschlossen. (Fraunhofer IAO)

Laufende Anträge

- Im Rahmen des Innovationsfelds Produktion im Cluster: »Elektromobilität Süd-West – road to global market« (BMBF- Hightech-Strategie 2020) wurde der Antrag »Epromo - Entwicklung eines prozessmodularen Fertigungskonzepts für die E-Motorenfertigung« gestellt. Im Mittelpunkt dieses Projekts steht deshalb die Entwicklung eines Fertigungskonzeptes für die Leitkomponente Elektromotor. Der Fokus des Projekts liegt auf der Elektromotoren-Montage, jedoch unter Berücksichtigung der vorangestellten Teilefertigung. (Fraunhofer IAO)
- Durch das aufgebaute Know-how wurde ein Verbundantrag namens »Elektromobile Urbane Wirtschaftsverkehre« im Rahmen der Modellregion Rhein-Ruhr eingereicht. Ziel des Projektes ist es, den Einsatz von elektrischen Nutzfahrzeugen bei Auslieferungsverkehren im Nahbereich zu nutzen. (Fraunhofer IML)

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

- Kostenanalysen: Es wurden mehrere Forschungsarbeiten und -berichte zum Thema Kostenanalysen identifiziert. Hierbei seien insbesondere folgende Forschungseinrichtungen genannt: Electric Power Research Institute (EPRI); National Renewable Energy Laboratory (NREL): Insgesamt konnte eine Vielzahl an Forschungspapieren gefunden, ausgewertet und berücksichtigt werden. Zu beachten ist, dass die Kostenfunktionen allerdings meist nur komponentenbezogen oder über mathematische Kostenfunktionen für Produkte beschrieben worden sind. Eine Analyse der Kosten basierend auf den Produktionsprozessen unter Berücksichtigung der eingesetzten Faktormittel, Vorprodukte sowie der fixen und variablen Kosten der Prozessschritte (wie diese im Teilprojekt angesetzt ist) konnte nicht identifiziert werden. Des Weiteren publizierten mehrere Beratungsfirmen ebenfalls ihre Einschätzung zu Herstellkosten auf Komponentenbasis.
- Absatzmarktsimulation: VECTOR21, ein vom Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart entwickeltes ComputermodeLL, ermöglicht es, die Konkurrenzsituation von Fahrzeugtechnologien und Fahrzeugkomponenten unter den Kriterien Energie, Emission und Herstellbarkeit bewertbar zu machen und Szenarien zur zukünftigen Marktdurchdringung von Fahrzeugantrieben und Kraftstoffen zu modellieren. Auf diese Weise können zukünftige Fahrzeugszenarien prospektiv behandelt und wissenschaftlich bewertet werden, um daraus relevante Handlungsrichtungen für Politik und Wirtschaft abzuleiten. Vector21 (DLR) beschäftigt sich allerdings mit reinen Absatzmarktszenarien. Hierbei wird die Produktion von Fahrzeugen und Komponenten nicht betrachtet. Produzentenagenten existieren in diesem Tool nicht, daher sind auch keine Variationen auf Produzentenseite (hinsichtlich Prozessen, Geschäftsmodellen, etc.) möglich.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11 NKBF.

Im Rahmen des Teilprojektes wurden keine Schutzrechte angemeldet. Die entstandenen Veröffentlichungen sind im Folgenden aufgelistet

- [1] Spath D.; Voigt, S.; Rothfuss, F.: FutureCar - Innovationschancen für die Zulieferindustrie auf dem Weg zur elektromobilen Gesellschaft. In: Mit Ideen zum Erfolg, Technologiemanagement in der Praxis: Forschen und Anwenden, IAO, Stuttgart (2011)
- [2] Spath, D.; Rothfuss, F.; Sachs, C.: Hybride Produktionssysteme -Integration elektromobiler Antriebskonzepte in automobile Produktionssysteme. Beitrag im Rahmen des 23.HAB-Forschungsseminar (2010)

- [3] Rose, H.; Rothfuss, F.: Veränderungen der automobilen Wertschöpfungskette. In: HZwei - Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen (2010), 07, 32-33.
- [4] Rose, H.; Rothfuss, F.: E-mobility meets customer, CTI Symposium Innovative Automotive Transmissions Hybrid & Electric Drives (2010)
- [5] Rothfuss, F.; Voigt, S.: The Electromobile Value Architecture – Elektromobility-induced Value Migration, In: IAMF, Genf, (2010)
- [6] Ackermann, H.; Cahn, F.; Dawid, H.: An agent-based Approach of Modelling the Diffusion of Electric Vehicles, Computational Economics. Geplante Veröffentlichung (2011)
- [7] Ackermann, H.; Cahn, F.; Dawid, H.: Dokumentation des Simulationsmodells des FSEM TP4E (2010)
- [8] Lerch, C.; Mattes, K.: Abschlussbericht zur Transferleistung, FhG ISI, Karlsruhe (2011)
- [9] Kern, M.; Kürümlüoglu, M.: F&E-Potentiale der elektromobilen Wertschöpfungskette (2011)
- [10] Vastag, A.; Lytschkowski, C.: Einsatzszenarien der Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr. Geplante Veröffentlichung (2011)
- [11] Schaumann, H.; Lytschkowski, C.: Anforderungen der Nutzfahrzeuge in der urbanen Mobilität. Geplante Veröffentlichung (2011)
- [12] Lytschkowski, C.; Schaumann, H.: Marktentwicklung - Wo geht die Reise hin? / Profile von Nutzern und die Anforderungen an die Elektromobilität (2011)



Teilprojekt »Projektkoordination«

Teilnehmende Fraunhofer-Institute: LBF

Teilprojektleiter: Prof. Dr. Holger Hanselka

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

I. Zusammenfassende Darstellung

1. Aufgabenstellung

Die Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität verfolgte einen ganzheitlichen und übergreifenden Ansatz. In diesem Sinne war es von wesentlicher Bedeutung, dass die fünf Schwerpunkte und deren Teilprojekte nicht als Einzelvorhaben konzipiert und praktiziert werden. Vielmehr war für den Systemansatz unabdingbar, dass eine übergreifende Verknüpfung der Themenschwerpunkte und ein gemeinschaftliches Management der Arbeiten realisiert wurden. Die hierfür notwendigen Arbeiten wurden durch dieses Teilprojekt »Projektkoordination« direkt adressiert.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen des Teilprojekts wurden folgende Aufgaben durchgeführt:

- Management und Koordination der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität im Sinne Kosten, Zeit und übergeordnete Inhalte
- Koordination des Aufstockungsantrags für den neuen Schwerpunkt »Funktion, Zuverlässigkeit, Prüfung und Realisierung«
- Projektseitige Kommunikation mit den entsprechenden FhG-internen und externen Stellen, inkl. Anfragen des BMBF und des Projektträgers
- Zusammenstellung und Bereitstellung von Informationsmaterial für den Industriebeirat, Diskussion und Austausch mit dem Industriebeirat
- Ausbau und Pflege einer internen Plattform zum Informations- und Dokumentenaustausch der Partner (Livelink-Basis)
- Organisation von übergeordneten Projektmeetings
- Pflege der deutschen und englischen Web-Präsenz: www.elektromobilitaet.fraunhofer.de, www.electromobility.fraunhofer.de
- Koordination des Berichtswesens
- Unterstützung des Aufbaus des Forums Elektromobilität e.V.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Für die Durchführung des Teilprojekts war die Nutzung bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte nicht notwendig.

4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Während des Vorhabens wurden kontinuierlich Informationsrecherchen im Sinne Nr. 6.1 NKBF 98 durchgeführt.

Verwendete Fachliteratur: keine

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

vergleiche Berichtsteil »Präambel« und Berichtsteil »Aufgabenstellung«

II. Erweiterte Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis im Einzelnen

Die im Antrag gesetzten Ziele des Teilprojekts wurden vollständig erreicht (vgl. Planung und Ablauf des Vorhabens).

Im Sinne der Öffentlichkeitsarbeit wurde das Gesamtvorhaben »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität« in einer Reihe von Veröffentlichungen der Öffentlichkeit vorgestellt (vgl. »Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11 NKBF«).

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

vergleiche Berichtsteil »Präambel«

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die erfolgreiche Umsetzung des Systemansatzes war eine übergreifende Verknüpfung der Themenschwerpunkte und ein gemeinschaftliches Management der Arbeiten wesentlich. Die hierfür notwendigen Arbeiten wurden im hier dargestellten Teilprojekt geleistet.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

- entfällt -

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

- entfällt -

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11 NKBF.

- [1] Jöckel, M. & Hanselka, H.: Elektromobilität aus Sicht der Systemforschung. Übergänge und Lösungen. Für eine Nachhaltige Mobilität der Zukunft. pp.93-108. ISBN: 978-3-515-09885-4. Stuttgart: Steiner (2011)
- [2] Hanselka, H. & Jöckel, M.: Elektromobilität aus dem Blickwinkel des betriebsfesten Leichtbaus. Handbuch Elektromobilität. EW Medien (2011)
- [3] Jöckel, M. & Höhne, K.: Sichere und zuverlässige Elektrofahrzeuge. Jahresbericht 2010 des Fraunhofer LBF Darmstadt (2011)
- [4] Jöckel, M. & Hanselka, H.: Elektromobilität – Aspekte, Chancen und Herausforderungen. Tagungsband des 26. Jahrestreffens der Kaltmassivumformer am 02./03.03.2011 in Düsseldorf, veranstaltet vom VDI Wissensforum (2011)
- [5] Jöckel, M.: Elektromobilität - Herausforderungen und Chancen. In: Wirtschaft in Ostwürttemberg, Nr.10, S. 4-7 (2010)
- [6] Hanselka, H., Jöckel, M. & Höhne, K.: Sicherheit und Zuverlässigkeit von Elektrofahrzeugen. In: Mobility 2.0, Nr.1, S. 64-65 (2010)
- [7] Hanselka, H. & Jöckel, M.: Elektromobilität – Elemente, Herausforderungen, Potenziale. In: acatech diskutiert. Elektromobilität – Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen. ISBN 978-3-642-16253-4, Springer (2010)