



FS AUTOMOTIVE

COmpetence in MObility

COMO II

Range Extender

Antriebsstrang

Elektromobilität & E-Fahrzeug

Verbundprojekt im
Forschungsschwerpunkt Automotive

1. September 2011 - 31. Dezember 2015

**Otto-von-Guericke-Universität
Magdeburg**

Präambel

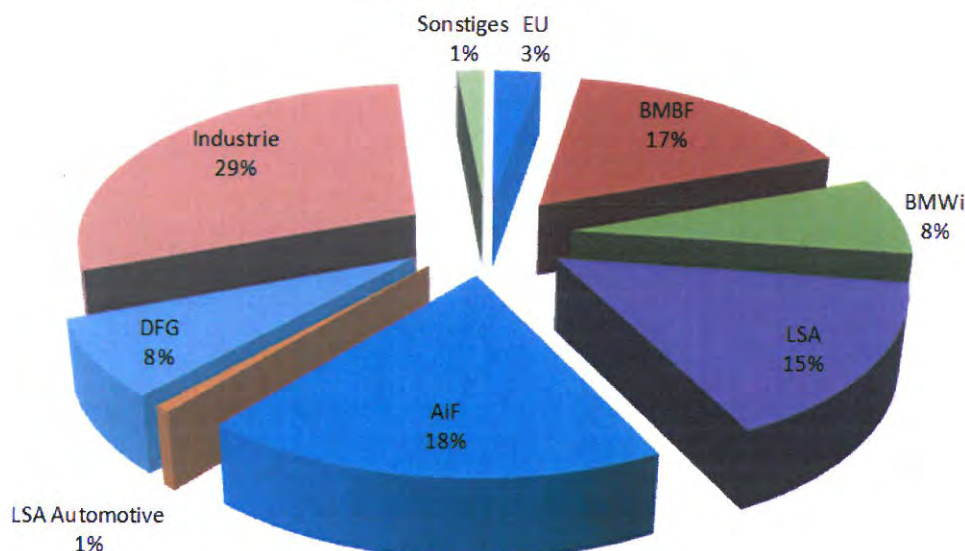
Seit seiner Gründung im Jahr 2005 hat sich der Forschungsschwerpunkt Automotive sehr erfolgreich entwickelt und wichtige Beiträge zur angewandten Forschung sowohl im Bereich der Automobiltechnik als auch im übergeordneten Bereich der Mobilität geliefert. Das angestrebte Ziel, die am Standort Magdeburg verfügbaren Kompetenzen und Ressourcen im Bereich Automotive zu bündeln und zu koordinieren und damit die Leistungsfähigkeit und Sichtbarkeit des Standorts zu steigern, konnte in einigen Punkten bereits erreicht werden. Insgesamt über 80 Wissenschaftler aus 4 Fakultäten der Otto-von-Guericke-Universität (OvGU), dem Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) sowie dem Institut für Automation und Kommunikation (ifak) erarbeiten gemeinsam neue Lösungen im automotiven Umfeld in über 90 Projekten teils mit öffentlicher Förderung, teils mit privatwirtschaftlichen regionalen und überregionalen Partnern.

Automotive Projekte

- Ergänzende Drittmittel: 90 Projekte (in 3,5 Jahren) ohne COMO, Volumen 10,7 Mio. €
- Förderung COMO (01.09.07 – 30.06.10), Volumen 5,7 Mio. €

Drittmittelanteil der Forschungsvorhaben im Bereich Automobiltechnik an der OVGU von 2007 – 1. HJ 2010

AUSSERHALB COMO



Neben vielfältigen Einzelprojekten und kleinerer Verbünde hat sich der Teilbereich „Sicherheit und Komfort“ mit seinen Kompetenzen auf den Gebieten der Mechatronik, der Mikrointegrationstechnik, der Kommunikation, der Akustik und der Werkstoffe in eine Transregio Initiative eingebracht, die sich momentan in der Antragstellung befindet. Verstärkt durch Wissenschaftler der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg und des DLR Instituts für Strukturmechanik in Braunschweig sollen neuartige Health-Monitoring Konzepte für aktive Leichtbaustrukturen erforscht und entwickelt werden, die gerade vor dem Hintergrund der Elektromobilität von wachsender Bedeutung im Bereich Automotive sind.

In der Lehre wurden zur weiteren Qualifizierung des Nachwuchses zwei Studiengänge mit stärkerer automotiver Prägung eingerichtet. Im jetzt anlaufenden **Master Mechatronik** ist das **Anwendungsfachgebiet Automotive** verankert, um den Nachwuchs in diesem für das zukünftige Auto immer wichtiger werdenden Gebiet zu sichern. Sowohl im **Bachelor-** als auch im **Master-Studiengang Maschinenbau** stellen **Automotive Systems** bereits eine sehr beliebte **Studienrichtung** dar, die mit über 100 Studierenden eine deutliche Spitzenstellung in der Beliebtheitsskala einnehmen.

Weiterhin konnten wichtige Eckpfeiler der **Strukturentwicklung** und der **Verstetigung** des Forschungsschwerpunkts durch die Realisierung wichtiger Schlüsselprofessuren im Bereich **Automotive** gesetzt werden:

- **Autonome Fahrzeugsysteme und mobile Roboter** (FMB, IMS) (Ruf erteilt),
- **Mobile Antriebssysteme** (FMB, IMS) (Ruf erteilt) und
- **Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen** (FMB, IMS) (Ruferteilung steht kurz bevor).

Die Ansiedlung der drei Professuren im neu gegründeten **Institut für Mobile Systeme IMS** (FMB) verstärkt die bereits vorhandene Kompetenz im Bereich Mechatronik und erweitert den bisherigen Bereich Kolbenmaschinen strukturkonform zu **Energiewandlungssystemen für mobile Anwendungen** speziell in Richtung Elektromobilität. Flankierend laufen weitere Berufungsverfahren, die eine substantielle Stärkung des Forschungsbereichs bewirken und teilweise bereits in diesen integriert sind:

- **Werkstofftechnik** (FMB) (Ruf erteilt),
- **Fügetechnische Fertigungsverfahren** (FMB) (Ruf angenommen) und
- **Elektrische Antriebssysteme** (FEIT) (Ruf erteilt).

Insbesondere die Fakultät Maschinenbau (FMB) hat durch die Neugründung des **Instituts für Mobile Systeme (IMS)** und die Berufung von insgesamt 5 automotiv ausgerichteten Professuren ihre langfristige Strategie klar auf den Forschungsschwerpunkt **Automotive** abgestimmt.

Durch die Gründung des **Instituts für Kompetenz in AutoMobilität (IKAM)** im Jahr 2009 und die damit verbundenen beachtlichen Investitionen von 34,5 Mio €, die bis Ende 2011 realisiert werden, steht in Zukunft eine ausgezeichnete Infrastruktur für die grundlagen- und anwendungsorientierte automotive Forschung in Magdeburg zur Verfügung, die wichtige Alleinstellungsmerkmale im Bereich der Antriebstechnik, des Energiemanagements, der Akustik sowie der Produktionstechnik ermöglicht. Bereits im Vorfeld der IKAM Gründung gibt es eine intensive Zusammenarbeit u.a. mit Volkswagen als einem der größten Automobilhersteller weltweit, als auch mit der Ingenieurgesellschaft für Auto und Verkehr IAV einem der größten europäischen automotiven Ingenieurdienstleister.

Mit Volkswagen konnte bereits ein Kooperationsvertrag auf dem Gebiet der Aggregatentwicklung und der Fahrzeugantriebe geschlossen werden. Mit der IAV laufen entsprechende Gespräche über ein Kooperationsabkommen, um die bislang schon sehr guten Verbindungen weiter zu festigen und auf eine dauerhafte Basis zu stellen.

Qualitätssicherung

Neben den beachtlichen Drittmittelwerbungen, die bereits eine starke Anerkennung des Forschungsschwerpunkts sowohl durch öffentliche Fördermittelgeber als auch durch privatwirtschaftliche Kooperationspartner belegen, wurden die Leistungen des Forschungsschwerpunkts im Rahmen der **Formativen Qualitätssicherung der Ingenieurwissenschaften** im September 2010 gründlich analysiert und bewertet. Dabei beurteilten zwei hochrangig besetzte Gutachtergruppen einmal die Stellung des Forschungsschwerpunktes Automotive innerhalb der Ingenieurwissenschaften der OVGU und zum anderen direkt die Forschungsergebnisse sowie die Struktur und die Ausbauziele des Forschungsschwerpunkts. In beiden Fällen erhielt der Forschungsschwerpunkt **sehr positive Beurteilungen verbunden mit einer klaren Empfehlung zum weiteren Ausbau.**

Das in der Begutachtung vorgestellte Konzept der Weiterentwicklung des Standorts in Richtung **Elektromobilität** mit den Schwerpunkten **Energieeffizienz/CO₂ Reduktion** und **Virtual Engineering** wurde im Kern voll bestätigt und angeregt, die an der OVGU vorhandenen Kompetenzen im Bereich Energie wie geplant einzubinden ansonsten einer strengen Fokussierung zu folgen. Die größten Potentiale wurden von den Gutachtern in der Entwicklung eines **Range Extenders**, dessen Einbindung in einen energieeffizienten **Antriebsstrang** sowie die Integration der **Elektromobilitätskonzepte** im **E-Fahrzeug** gesehen.

Eine weitere wichtige Empfehlung betraf die **Vernetzung und Kooperation mit dem IKAM**, denen aus Sicht der Gutachter eine Schlüsselrolle bei der Weiterentwicklung und Sichtbarkeit des Forschungsschwerpunkts zukommt. Dadurch solle gleichermaßen die Attraktivität des Forschungsschwerpunkts bei der angewandten Forschung mit der Wirtschaft als auch im Bereich der Grundlagenforschung, z.B. bei der DFG, wirksam gesteigert werden. Als kritisches Element wurden ein schneller Anlauf und das Zusammenwachsen der Infrastruktur IKAM und des Forschungsschwerpunkts als Wissensträger gesehen.

Strategische Ausrichtung

Vor dem Hintergrund der bereits angestoßenen Strukturmaßnahmen im Bereich der Lehre, der Institutsneugründungen- und -umstrukturierungen, der Berufungen sowie der IKAM Gründung, sieht der Forschungsschwerpunkt seine primäre Aufgabe darin diese getätigten beachtlichen Investitionen effektiv zu nutzen und intelligent zu vernetzen, um Alleinstellungsmerkmale des Standorts stärker herauszuarbeiten und insgesamt dessen nationale und internationale Sichtbarkeit zu erhöhen.

Diese für den Standort einzigartige Chance soll in der nächsten Förderperiode genutzt werden, um die im Augenblick im Aufbau befindlichen Einrichtungen (Versuchshallen, Labore, Prüf- und Testeinrichtungen, Produktionsmaschinen) des IKAM für die weitere Stärkung des automotive Standorts Magdeburg in Betrieb zu nehmen und für grundlagen- und Anwendungsforschung nutzbar zu machen.

Aufbauend auf das in der Begutachtung bestätigten inhaltlichen Konzepts soll dies in den drei Bereichen

Range Extender	3.900 T€
Antriebsstrang	1.500 T€
Elektromobilität & E-Fahrzeug	3.200 T€

im Rahmen einer gezielten Projektförderung erfolgen, welche die bereits getätigten Investitionen nutzt und die Neuberufungen wirkungsvoll einbindet. Die Mittelverteilung entspricht der in der Begutachtung erarbeiteten Gewichtung der einzelnen Bereiche. Für Organisation und Steuerung werden zusätzlich 300 T€ geplant.

Das primäre Ziel im Bereich **Range Extender** besteht in der **Steigerung der Attraktivität für Kooperationen mit Unternehmen und im Technologietransfer** gerade auch für die regionale Zulieferindustrie. Diese Entwicklung wird stark durch Volkswagen unterstützt, das mehrere modifizierte Mustermotoren ihrer zukünftigen Hybridgeneration kostenlos als Basis bereitstellt. Dadurch erhält der Forschungsschwerpunkt die Möglichkeit wichtige Grundlagenentwicklungen bis hin zu Prototypen durchzuführen, was in diesem hoch kompetitiven Umfeld einen ganz entscheidenden Vorteil, weit über dieses Projekt hinaus bedeutet. Die regionale Zulieferindustrie kann so frühzeitig eingebunden werden und dadurch ihre Wettbewerbssituation bei einer Kernkomponente zukünftiger Fahrzeuge deutlich verbessern.

Das wichtigste Ziel auf der Seite der universitären Forschung besteht in der **Steigerung der DFG Präsenz** einmal durch die Erhöhung des über die DFG insgesamt eingeworbenen Drittmittelanteils, insbesondere durch das Einwerben einer **Forschergruppe** oder eines eigenen **Sonderforschungsbereichs**, der bislang in den Ingenieurwissenschaften der OVGU nicht existiert. Hierzu hat sich der Forschungsschwerpunkt in den Bereichen **Antriebsstrang** sowie **Elektromobilität & E-Fahrzeug** durch mehrere DFG starke und erfahrene Wissenschaftler deutlich verstärkt und bildet auf dem Gebiet des Antriebs- und Energiemanagements bereits einen sehr guten Kern für eine geplante Initiative. Stark unterstützend kommt an dieser Stelle hinzu, dass zukünftig über IKAM ein für dieses Forschungsfeld hervorragend geeigneter **Antriebsstrangprüfstand** zur Untersuchung unterschiedlichster Antriebskonfigurationen mit einem Investitionsvolumen von über 3 Mio € zur Verfügung steht, der der Initiative ein **experimentelles Alleinstellungsmerkmal** sichert.

Fazit

In seiner ersten Förderperiode hat sich der Forschungsschwerpunkt Automotive bereits sehr erfolgreich entwickelt, was durch ein beachtliches Drittmittelaufkommen sowie eine sehr positiv verlaufene Begutachtung mit deutlicher Förderempfehlung sichtbar unter Beweis gestellt wird. Die angestoßenen Strukturmaßnahmen (Institutsgründung, 6 Berufungen) sowie die IKAM Investitionen bieten eine Infrastruktur, mit der der Forschungsschwerpunkt erfolgreich in neue Felder vorstoßen kann. Die zweite Förderperiode soll konsequenterweise dazu genutzt werden die Vernetzung und die Zusammenarbeit auf der Basis dieser Infrastruktur auf die neu gestellten Herausforderungen im Zuge der Elektromobilität zu befördern und die nationale und internationale Sichtbarkeit des automotive Standorts Magdeburg auszubauen und langfristig zu sichern.

1. Motivation und Zielsetzung

Um die hoch gesteckten Ziele zur Reduktion umweltrelevanter Emissionen, insbesondere des Gesamt-CO₂ Ausstoßes, bei gleichzeitiger Schonung begrenzter Energiereserven ohne Einbußen bei der Mobilität von Personen und Waren erreichen zu können, weist die Elektromobilität einen aktuell stark favorisierten Weg [1,2,3]. Große nationale und internationale Programme mit starker politischer und wirtschaftlicher Unterstützung belegen diese Priorisierung [4]. Allerdings birgt dieser Weg immense wissenschaftliche, technische und ökonomische Risiken. Mit einem elektrifizierten Fahrzeugantriebsstrang erfahren entscheidende Kernkompetenzen heutiger Automobiletechnik drastische Veränderungen. Entscheidende Basiselemente wie Energiewandler und Energiespeicher sind nicht auf einem Entwicklungsstand verfügbar, wie es für eine zeitnahe und großflächige Nutzung der Elektromobilität erforderlich wäre. Ihre Weiterentwicklung ist mit sehr hohen technischen und ökonomischen Risiken verbunden, da weder von der Wissenschaft noch von der Wirtschaft eine belastbare Roadmap für die Erreichbarkeit der für einen wirtschaftlichen Einsatz wichtigen Eckdaten geliefert werden kann [5,6].

Aufgrund dieser Unsicherheiten beobachtet man heute ein weites Feld auf dem zukunfts-trächtige Antriebs- und Fahrzeugkonzepte für die Elektromobilität entwickelt und erprobt werden. Das Spektrum reicht von Fahrzeugen mit Parallel-Hybridantrieb, die im Schlepptau von Toyota heute von jedem namhaften Automobilhersteller angeboten werden und bereits eine hohe technische Reife erreicht haben, bis hin zu reinen Elektrofahrzeugen, die initiiert von kleinen Start-Ups wie Tesla, langsam auch in das Angebot großer Automobilhersteller eindringen. Beide Konzepte weisen jedoch gravierende Einschränkungen auf.

Parallel-Hybridfahrzeuge weisen generell ein höheres Gewicht und einen höheren Komplexitätsgrad auf, was in Folge zu höheren Herstellungskosten und zu einem höheren Energieverbrauch führt. Weiterhin ist das Energieeinsparpotential begrenzt, da die Reichweite rein elektrischen Fahrens aufgrund kleiner Batteriespeicher sehr begrenzt bleibt. Auf der anderen Seite benötigen reine Elektrofahrzeuge zum Erreichen praktikabler Reichweiten sehr große, sehr schwere und sehr teure Batteriespeicher mit stark begrenzter Lebensdauer und diffizilen Einsatzrandbedingungen. Einen Kompromiss stellen Fahrzeuge mit einem Seriell-Hybridantrieb oder mit einem Range Extender, in Verbindung mit einer Plug-In Batterieaufladung, dar. Sie nutzen bereits die Vorteile eines rein elektrischen Fahrantriebsstrangs, benötigen jedoch nur eine Batterie mittlerer Größe für eine rein elektrische Reichweite zwischen 50 und 100 km. Ein thermischer oder elektrochemischer Energiewandler liefert zusätzliche Elektroenergie und komplettiert den Antriebsstrang, wodurch die Reichweite konventioneller Fahrzeuge erreicht wird.

Als Energiewandler/Range Extender wird heute ein breites Spektrum von Otto- und Diesel- über Wankelmotoren bis hin zu Gasturbinen (in Kombination mit einem elektrischen Generator) und Brennstoffzellen erforscht. Ein wichtiger Aspekt dieses Antriebskonzepts sind zwei strikt voneinander getrennte Energiewandlungssysteme, die beide jeweils im optimalen Betriebspunkt gefahren werden können. Auf der anderen Seite schlägt eine zusätzliche Energiewandlungsstufe, behaftet mit Wirkungsgradverlusten, negativ zu Buche. Die optimale Aus-

legung des Antriebsstrangs, seiner Komponenten sowie des Energie- und Fahrbetriebsmanagements sind Gegenstand aktueller Forschung. Offen ist ebenfalls die Frage, ob sich künftig ein Zentralantrieb mit den konventionellen mechanischen Übertragungselementen wie Getriebe und Differential oder ein Radnabenmotor als Direktantrieb durchsetzen wird. Zentralantriebe haben durch die Verwandtschaft zur „üblichen“ Antriebstechnik bereits einen fortgeschrittenen Entwicklungsstand erreicht, erlauben jedoch nicht die Flexibilität eines Radnabenantriebs, der perspektivisch durch geringere Wandlungsverluste und die Realisierung eines Einzelradantriebs deutliche Vorteile verspricht.

Auf der Basis dieser Situationsanalyse und der Ergebnisse der Evaluierung des Verbundprojektes COMO I (siehe Protokoll WZW vom 7.10.2010) wird für COMO II die Synergie der Komplexe Automotive und Energie am Standort Magdeburg mit einer Konzentration auf die Arbeitsfelder Elektromobilität, CO₂- Reduzierung und Virtual Reality / Virtual Engineering vorangetrieben. Unter Einbindung des neuen Institutes für Kompetenz in AutoMobilität (IKAM) soll in Magdeburg ein herausragender Standort der Elektromobilität entstehen.

2. Forschungsbereiche

Ausgehend von den vorhandenen Kompetenzen und Vorarbeiten im Forschungsschwerpunkt Automotive (COMO I) mit dem Ziel einer klaren Fokussierung und dem Ausbau von Alleinstellungsmerkmalen, werden aus den oben genannten Arbeitsfeldern drei Schwerpunkte herausgegriffen.

Der erste Schwerpunkt **Range Extender** widmet sich der effizienten Energiewandlung für eine ausreichende km-Reichweite. Dies ist ein Kernelement zukünftiger Elektrofahrzeuge in dem die widersprüchlichen Forderungen der Mobilität, der Energieeffizienz und der Umweltverträglichkeit zusammentreffen. Als Antriebsstrangkonfiguration wird ein radnabengetriebenes Plug-In Elektrofahrzeug mit einem Range Extender zur Reichweitenverlängerung ausgewählt. Dieses Konzept vermeidet hohe Batteriekosten bei Fahrleistungen, die mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbar sind, wobei in bestimmten Bereichen, z.B. innerorts, rein elektrisches Fahren über eine Strecke von 50-100 km möglich ist. Durch das Laden an der Steckdose und dem Betrieb des Range Extenders nahe dem Wirkungsgradoptimum, lässt sich der Verbrauch signifikant senken. Die Frage nach dem „optimalen“ Range Extender ist nicht eindeutig zu beantworten, weil z.B. Fahrzeuggröße und Einsatzbereich die Konzepte maßgeblich beeinflussen. Als Ergebnis einer Vorstudie wird der Fokus sowohl auf eine optimierte Verbrennungskraftmaschine (mittel- bis langfristige Lösung) als auch auf die Brennstoffzelle (langfristige Lösung) gerichtet. Für den ausgewählten verbrennungsmotorischen Range Extender werden Brennverfahren, Einsatz unterschiedlicher Kraftstoffe, Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrads durch die Reduktion der Reibung untersucht. Besondere Aufmerksamkeit verdient die akustische Einbettung des Range Extenders in den elektrischen Antriebsstrang. Aktive und passive Maßnahmen zur Schall- und Schwingungsdämpfung stellen sicher, dass das durch den Elektroantrieb erreichte sehr niedrige Geräusch- und Schwingungsniveau erhalten bleibt.

Der zweite Schwerpunkt befasst sich mit dem **Antriebsstrang** bestehend aus einer Batterie als Energiespeicher, den Radnabenmotoren als Fahrtrieb und Rekuperator sowie der erforderlichen Leistungselektronik zur Steuerung der Komponenten und der Energieströme. Neben den Grundfunktionen dieser Komponenten steht ihr Zusammenwirken im System Antriebsstrang sowohl unter dem Aspekt der Energieverteilung als auch unter dem Aspekt der Drehmomentbereitstellung im Fokus. Neue Lösungen für das Energiemanagement der Batterie unter den besonderen Herausforderungen des dynamischen Fahrbetriebs sollen dazu beitragen, Sicherheit, Lebensdauer und Reichweite von Elektrofahrzeugen unter realistischen Fahrbedingungen deutlich zu erhöhen. Eine wichtige Basis bildet der hochdynamische Einzelradantrieb mit einer innovativen Schlupf- und Spurregelung, auf der ein neues ganzheitliches Konzept der Fahrdynamikregelung aufgebaut werden soll.

Im dritten Schwerpunkt **Elektromobilität & E-Fahrzeug** wird das Elektrofahrzeug in seiner Gesamtheit sowohl in realen Versuchs- wie auch in virtuellen Simulationsumgebungen betrachtet. Auf der realen Seite wird ein bereits vorhandener Versuchsträger mit der Größe eines Kleinwagens (Modulträger I) in einem ersten Schritt ausgebaut, um reale Fahrbetriebsdaten bezüglich Energie- und Drehmomentbedarf, Fahrdynamik sowie Anforderungen an das Energiemanagement zu gewinnen, die in die Konzeption und Entwicklung der Antriebsstrangkomponenten einfließen. In einem zweiten Schritt wird ein weiterentwickelter Versuchsträger mit der Größe eines Mittelklassewagens (Modulträger II) konzipiert und aufgebaut, der zusätzlich als Testumgebung für die Antriebsstrangkomponenten dient. Testszenarien reichen von dynamischen Prüfstandversuchen am 4-Rad-Antriebsstrangprüfstand des IKAM, an dem unter idealen Testbedingungen die Längsdynamik des Fahrzeugs und des Antriebsstrangs untersucht werden kann, bis zu Testfahrten auf mehreren virtuellen und realen Versuchsstrecken. Dabei können zusätzlich die komplette Fahrdynamik mit dem Kontakt eines realen Reifens auf einer realen Fahrbahn sowie der Fahrbetrieb aller Komponenten geprüft werden. Ein neues adaptives Fahrwerk, das speziell auf die Herausforderungen radnabengetriebener Elektrofahrzeuge zugeschnitten ist, ermöglicht den Einsatz dieses sehr flexiblen und leistungsfähigen Antriebskonzepts mit einem hohen Maß an Fahrsicherheit und Fahrkomfort. Zur Unterstützung der Test- und Entwicklungsarbeiten am Versuchsträger einerseits sowie zur Darstellung einer kompletten virtuellen Entwicklungskette andererseits wird eine virtuelle Entwicklungsumgebung für Elektrofahrzeuge aufgebaut. Sie unterstützt Konzeption, Aufbau und Test von Elektrofahrzeugen ausgehend von 3D-CAD-Modellen, die zur Konfiguration des Fahrzeugs, zur Berechnung einzelner Komponenten bis hin zur Simulation von Komponenten und Gesamtfahrzeug genutzt werden können. Die enge und methodische Verzahnung von Versuch, Prüfstand und virtuellen Komponenten, Fahrzeugen und Versuchsumgebungen wird als ein Herausstellungsmerkmal des Forschungsverbunds gesehen.

Um in allen drei Forschungsbereichen in den nächsten 5 Jahren eine Spitzenstellung einzunehmen, findet eine regelmäßige Überprüfung der erreichten Ergebnisse statt. Nach einem ersten Arbeitsabschnitt von 2 Jahren werden im Rahmen einer Evaluation für jedes Projekt definierte Meilensteine überprüft. Dieser Zeitpunkt soll auch dazu genutzt werden, auf externe Neuentwicklungen in diesem hoch kompetitiven Umfeld zu reagieren.

3. Strukturentwicklung

Die am Forschungsschwerpunkt Automotive beteiligten Fakultäten unterstützen die Strukturentwicklung nachhaltig z.B. durch ihre Berufungspolitik. So wurden am neu gegründeten Institut für Mobile System der Fakultät Maschinenbau für die Professuren "**Mobile Antriebssysteme**" und "**Autonomes Fahren und mobile Roboter**" Rufe erteilt. Für die Wiederbesetzung der Professur "Kolbenmaschinen" mit der neuen Denomination "**Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen**" steht die Ruferteilung kurz bevor. Die Fakultät für Elektrotechnik besetzt die Professur "**Elektrische Antriebssysteme**" in inhaltlicher Abstimmung mit dem Forschungsschwerpunkt mit einer klaren Ausrichtung auf die Elektromobilität. Eine weitere Verstärkung bildet die Professur „**Experimentelle Audiologie**“ der Medizinischen Fakultät mit einem klaren Schwerpunkt im Bereich der Fahrzeugakustik.

Das im letzten Jahr gegründete Institut für AutoMobilität **IKAM** ist ein weiterer wichtiger Eckpfeiler der Strukturentwicklung am Standort. Als Gemeinschaftsunternehmen der Universität und der Industrie- und Handelskammer Magdeburg, bildet es die natürliche Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, um gemeinsam den risikobehafteten Schritt in die Elektromobilität zu gehen. Durch seine hervorragende Forschungs-Infrastruktur schafft das IKAM die materiellen Voraussetzungen, um diesen Schritt auf höchstem wissenschaftlichem und technischem Niveau erfolgreich zu gehen.

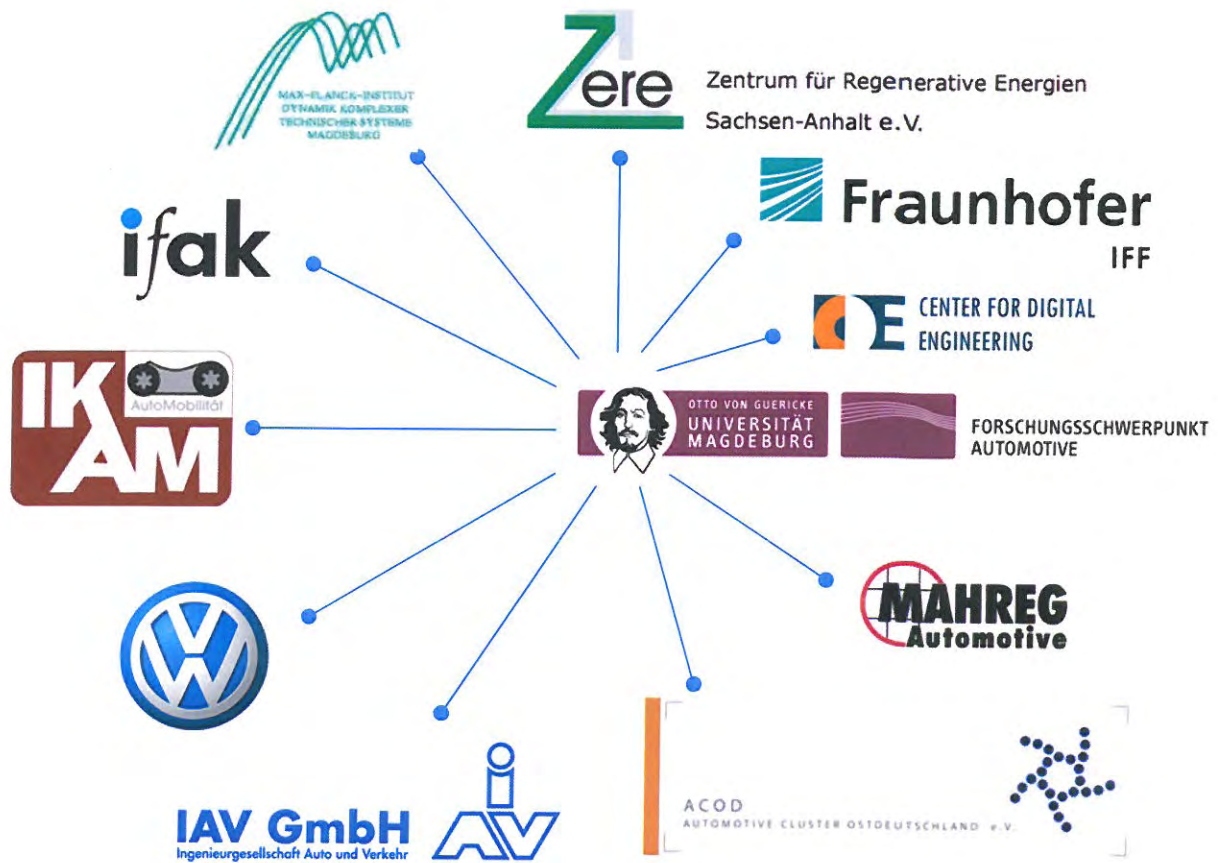
Im Rahmen der nächsten Förderperiode sollen die bestehenden Strukturen gestärkt werden und durch gemeinsame wissenschaftliche Arbeiten auf dem Gebiet der Elektromobilität an Effizienz gewinnen.

4. Vernetzung und Technologietransfer

Vernetzung

Automotive Fragestellungen, insbesondere neue Herausforderungen in Verbindung mit der Elektromobilität haben die wissenschaftlichen Zentren der Region Magdeburg zusammengeführt, um gemeinsam neue Antworten zu finden. Auf der wissenschaftlichen Seite, allen voran die Otto-von-Guericke Universität, die mit ihrem Forschungsschwerpunkt Automotive einen wichtigen Beitrag zur Grundlagenforschung für Elektrofahrzeuge leistet, unterstützt durch das Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF sowie das Institut für Automation und Kommunikation IFAK, mit ausgewiesenen Leistungen im Bereich der angewandten Forschung für Logistik und Telematik, bis hin zum Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, welches wertvolle Kompetenzen im Bereich der Brennstoffzelle, der Wasserstoff- und Batterietechnologie beisteuert. Starke Forschungsverbünde aus dem Bereich Energie, wie das Zentrum für regenerative Energien Sachsen-Anhalt ZERE unterstützen den Brückenschlag zwischen mobiler und stationärer Nutzung alternativer Energie in einem engen regionalen Schulterschluss.

Auf der wirtschaftlichen Seite wird diese Entwicklung getragen durch MAHREG, einem starken Bündnis regionaler Unternehmen, der Zulieferindustrie, vertreten durch das Automotive Cluster Ostdeutschland ACOD, großer Ingenieurdienstleister, wie der Ingenieurgesellschaft für



Vernetzung der Automotive- und E-Mobility-Kompetenzen am Standort Magdeburg

Auto und Verkehr IAV und großer OEMs, allen voran der Volkswagen AG. Die Volkswagen AG hat sich in einem kürzlich geschlossenen Kooperationsvertrag eindeutig zu einer Forschungs- und Entwicklungspartnerschaft mit der Otto-von-Guericke Universität und dem Forschungsschwerpunkt Automotive bekannt. Kernthema dieser Kooperation sind zukünftige Antriebstechnologien.

Technologietransfer

Einen weiteren wichtigen Impuls erhielt der Standort durch die Gründung des Instituts für Kompetenz in AutoMobilität IKAM, welches als Bindeglied zwischen Wissenschaft und Wirtschaft am Standort Magdeburg. Die beachtlichen Investitionen konnten zur Schaffung einer Forschungsinfrastruktur genutzt werden, welche vielen kleinen und mittleren Unternehmen hilft, die gewonnenen Forschungsergebnisse gerade aus dem Bereich Elektromobilität in marktfähige Produkte umzusetzen und somit von den rasanten Veränderungen des Automobilmarktes als Zulieferer zu profitieren. Als OEM zeigt die Volkswagen AG sehr großes Interesse an der Konzentration der Forschungskapazitäten im Raum Magdeburg und gibt massive Unterstützung z.B. beim Aufbau eines Antriebsstrangprüfstandes, der speziell auf die Bedürfnisse von Elektrofahrzeugen zugeschnitten ist. Diese enge Verbindung mit dem heute weltweit zweitgrößten Automobilhersteller und dem regionalen Zulieferernetzwerk über IKAM und den Forschungsschwerpunkt Automotive bildet ideale Voraussetzungen für einen erfolgreichen und nachhaltigen Transfer von Erkenntnissen und Ergebnissen der Forschung.

5. Kostenübersicht

Die zur Durchführung des Projekts erforderlichen Gesamtkosten für den Förderzeitraum 1.9.2011 bis 31.12.2015 sind in folgender Tabelle aufgeführt:

R – Range Extender	
R1.1 – Brennverfahren und Kraftstoffe	1.007.320,00 €
R1.2 – Reibungsreduktion	1.198.300,00 €
R2 – Brennstoffzelle	806.215,60 €
R3 – Akustik	888.507,67 €
Σ R	3.900.343,27 €
A – Antriebsstrang	
A1 – Leistungselektronische Stellglieder im Bordnetz	271.369,33 €
A2 – Batterie als elektrochemischer Speicher	627.982,00 €
A3 – Fahrtrieb und Fahrmanagement	554.905,33 €
Σ A	1.454.256,66 €
E – Elektromobilität & E-Fahrzeug	
E1 – Virtuelles E-Fahrzeug & Entwicklungsmethodik	821.600,00 €
E2 – Versuchsträger und Fahrversuche	1.011.488,66 €
E3 – Dynamisches, modellbasiertes Energiemanagement	540.866,11 €
E4 – Adaptives Fahrwerk für radnabengetriebene Elektrofahrzeuge	818.433,34 €
Σ E	3.192.388,11 €
ZA – Zentrale Aufgaben/Koordinationsprojekt	300.000 €
Gesamtsumme	8.846.988,04 €

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind alle Quellenangaben und ausführliche Angaben zur Projektplanung im Anhang des Antrags zusammengefasst.

6. Projektbereiche

R Range Extender

R1.1 – Brennverfahren und Kraftstoffe

R1.2 – Reibungsreduktion

R2 – Brennstoffzelle

R3 – Akustik

A Antriebsstrang

A1 – Leistungselektronische Stellglieder im Bordnetz

A2 – Batterie als elektrochemischer Speicher

A3 – Fahrantrieb und Fahrmanagement

E Elektromobilität & E-Fahrzeug

E1 – Virtuelles E-Fahrzeug & Entwicklungsmethodik

E2 – Versuchsträger und Fahrversuche

E3 – Dynamisches, modellbasiertes Energiemanagement

E4 – Adaptives Fahrwerk für radnabengetriebene Elektrofahrzeuge

ZA – Zentrale Aufgaben / Koordinationsprojekt

R Range-Extender

Einer Analyse [7] zufolge liegen, statistisch betrachtet, etwa 70% der täglich zurückgelegten Strecken unter 50 km. Für den Einsatz in Großstädten oder der ausschließlichen Fahrt zur Arbeitsstätte mag dies tatsächlich in vielen Fällen zutreffen. Eine gewünschte und oft notwendige Nutzung des Fahrzeugs über die Kilometerreichweite von ca. 80–100 km hinaus ist heute mit Batterie betriebenen Fahrzeugen bei vertretbaren Kosten nicht möglich und kann auch in den nächsten 10–15 Jahren nicht vorausgesetzt werden. Dabei ist zu beachten, dass die angegebenen Reichweiten sich meist auf standardisierte Fahrzyklen wie den NEFZ beziehen und bei realistischer Nutzung zusätzliche Energiebedarfe für Steigungen, Heizung und höhere Beladung zu berücksichtigen sind. Dies kann die nominelle Reichweite um bis zu 50% reduzieren. Der Kunde wünscht jedoch im überwiegenden Fall Reichweiten von 400 km und mehr. Diese Situation führt zur Überlegung, rein Batterie betriebene Fahrzeuge durch einen zusätzlichen Antrieb bzw. Energiespeicher für diese geforderten Reichweiten geeignet zu machen. Man spricht von einem sogenannten Reichweitenverlängerer oder kurz „Range Extender“ (RE). In den vergangenen ca. 2 Jahren sind verschieden Konzepte für Range Extender vorgestellt, meist jedoch nicht wissenschaftlich begründet worden. Häufig werden auch exotische Lösungen diskutiert, deren praktische Realisierbarkeit nicht zu erwarten ist. Die Fahrzeughersteller bevorzugen überwiegend Konzepte aus ihrem eigenen Motorbaukasten, um eine schnelle und kostengünstige Einführung zu ermöglichen. Fraidl [8] kommt zum Ergebnis, dass bei seltenem Einsatz des RE der Wankelmotor, bei längeren Einsatzzeiten (>20%) der Viertaktmotor die geeignetste Variante ist. Gasturbinen werden von Jaguar [9] und [10] erprobt bzw. empfohlen. Weitere Konzepte wie z.B. der Freikolbengenerator [11] sind noch im Forschungsstand und Aufbau. In einer Studie im Auftrag des ACOD [12] wurde eine erste Basisanalyse vorgenommen in der auch die Definitionen, die Anforderungen und ausgeführte Beispiele erläutert werden. Das Ergebnis ist in nachfolgender Bewertungsmatrix zusammengefasst. Die Bewertung der Varianten erfolgt anhand der wichtigsten Kriterien, die mit Gewichtungsfaktoren in die Entscheidungsanalyse eingehen. Von besonderer Bedeutung sind daher – wie schon erwähnt – Bauraum, Gewicht und Akustik. Das Ergebnis zeigt, dass der Ottomotor aus heutiger Sicht die optimale Lösung darstellt, wobei im Detail noch weiter zu analysieren ist, ob das 2- oder 4-Takt-Verfahren zu bevorzugen ist. Der Dieselmotor hat als 4-Takt-Motor eine Chance. Für kleine Motoren ist eine Neukonstruktion und Brennverfahren-Auslegung erforderlich. Für den 2-Takt-Dieselmotor wäre ein wesentlich größerer Entwicklungsaufwand notwendig. Von besonderer Bedeutung wird die Steuerung und Regelung des Range Extenders, abhängig vom Fahrerwunsch und dem zu erwartenden Fahrprofil sein. Ziel dabei ist unter allen Randbedingungen rechtzeitig die erforderliche elektrische Energie zur Verfügung zu stellen (Energiemanagement). Eine Einschaltung des Range Extenders erst bei z.B. leerer Batterie wäre völlig unbefriedigend. Kurz und mittelfristig kann als Range Extender nur ein konventioneller Verbrennungsmotor Erfolg haben, da dieser die funktionellen und wirtschaftlichen Randbedingungen am besten erfüllt. Mittel- und langfristig könnten Exoten, wie z.B. Wankelmotor, Gasturbine oder Freikolbenmotor durchaus interessant werden. Dabei stellt sich allerdings die Frage, ob der erhebliche Entwicklungsaufwand für diese z.T. neuartigen Verbrennungs-

Bewertungsmatrix Range Extender

	Gewichtungs-faktor	Otto 4 Takt	Otto 2 Takt	Diesel 4 Takt	Diesel 2 Takt	Wankel	Stirling	Dampf-motor	Gas-turbine	Freikolben-lineargene-rator (FKLG)	Brenn-stoffzelle
Bauraum gering	hoch	+	+	0	+	++	--	--	+	++	+
Gewicht gering	hoch	+	++	+	+	++	--	--	+	++	+
Akustik gut	hoch	+	0	0	0	+	+	0	--	+?	++
Emissionen, Maßnah-men zur Emissions-reduzierung gering	hoch	+	+	0	0	0	++	++	-	+?	++
Herstellkosten gering	hoch	++	++	++	+	0	--	--	--	0	--
Entwicklungsrisiko niedrig	mittel	++	+	++	0	0	--	--	--	--	-
Startverhalten gut	mittel	++	++	+	+	+	-	-	-	+?	0
Wirkungsgrad hoch	mittel	+	0	+	+	0	+	+	-	+?	++
Flex-fuel möglich	niedrig	+	0	+	+	0	++	0	0	++	--

- 1. Priorität
- 2. Priorität
- keine Option
- verfolgenswert, noch nicht ausreichend sicher bewertbar

1

kraftmaschinen sinnvoll ist, da langfristig – zumindest besteht die Hoffnung – die Batterie-technologie sich so weit entwickelt, dass auf einen Range Extender verzichtet werden kann oder sich die Brennstoffzelle als Alternative anbietet.

Als Generator zur Erzeugung der elektrischen Energie werden heute Drehstrom-Generatoren in Asynchron- oder Synchron-Bauart favorisiert. Sie sind vergleichsweise kostengünstig und erlauben einen Betrieb im Drehzahlbereich eines Verbrennungsmotors. Auch die Kombination mit der elektrischen Maschine ist in die Bewertung aufzunehmen. Besonders wichtig ist, dass der Verbrennungsmotor in den wenigen Stationärbetriebspunkten so ausgelegt wird, dass er möglichst effizient, geräusch- und emissionsarm arbeitet. Die Kennfeldauslegung der Wärmekraftmaschine ist mit der elektrischen Maschine abzustimmen und zu optimieren. Aufgrund der bisherigen Analyse, der wissenschaftlichen Herausforderung, der Erkenntnisse aus COMO I und der Zusage von Volkswagen, dass ein kleiner 2-Zylinder Dieselmotor als Versuchsträger in 2012 zur Verfügung steht, wird unabhängig von endgültigen Analyseergebnis auf dieser Basis ein Dieselmotor als Range Extender bezüglich Thermodynamik, Reibung und Akustik optimiert.

R1 Thermischer Range Extender

R1.1 – Brennverfahren/Kraftstoffe

1. Antragsteller

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
<u>N.N.</u>			Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen (bisher: Lehrstuhl Kolbenmaschinen)
Schmidt	Jürgen	Prof. Dr.-Ing.	Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik. Lehrstuhl Technische Thermodynamik

2. Ausgangssituation, Zielsetzung

Der erforderliche Leistungsbereich für einen RE, eingesetzt in einem Fahrzeug der Kompaktklasse, liegt bei ca. 25–50 kW. Aufgrund dieser geringen Leistung und der Forderung nach einem möglichst geringen Bauraum und Gewicht dieses Aggregates, eignet sich als Range Extender eine Hubkolbenmaschine als Saugvariante mit einem möglichst geringem Gesamthubvolumen sowie geringer Zylinderzahl. Aufgrund der von der VOLKSWAGEN AG signalisierten Bereitstellung eines 2-Zylinder-Diesel-TDI-Motors in 2012 soll als Basis-Version dieses Aggregat verwendet werden. Das Ziel des Teilprojektes R1.1 ist somit die Auslegung eines geeigneten Brennverfahrens für einen kompakten und leichten Dieselmotor zum Einsatz als Range Extender in einem Elektrofahrzeug. Zum Projektende soll dieses emissions-, verbrauchs- und geräuscharme Motoraggregat in dem Versuchsträger (siehe E2) appliziert werden, um die Vorteile des E-Fahrzeugs mit Range Extender unter realitätsnahen Bedingungen am Antriebsstrangprüfstand bzw. auf Teststrecken darstellen zu können.

Die ersten Arbeiten sind dabei auf ein Zwischenziel im 3. Quartal 2013 ausgerichtet, zu dem eine optimale Motorkonfiguration (Injektor, Kolbenmulde, Luftführung, ...) für ein stabiles Brennverfahren des Saugmotors ermittelt wird, das als Referenz für weitere Optimierungsschritte auch unter Verwendung alternativer Kraftstoffe dienen soll. Die Hauptforderungen an dieses Brennverfahren sind neben der Reduzierung der CO₂-Emissionen und damit des Kraftstoffverbrauchs, auch die Senkung der Geräusch- sowie der Schadstoffemissionen, hier vor allem Ruß und Stickoxide. Ziel ist, aufwendige und damit teure Abgasnachbehandlungskonzepte teilweise einzusparen oder ganz zu vermeiden, um die Gesamtkosten des Fahrzeugs, bestehend aus zwei Energiewandlungsmaschinen, so gering wie möglich zu halten. Um der Kraftstoffvielfalt, die zukünftig zunehmen wird, begegnen zu können, sollte das Brennverfahren mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden können.

3. Stand der Forschung / Eigene Vorarbeiten

Stand der Forschung

Als Range Extender Modul sind unterschiedliche Energiewandlungsmaschinen in jüngerer Vergangenheit realisiert worden [1–4], siehe auch R. Aufgrund seines höheren Wirkungsgrades und dem damit verbundenen geringeren spezifischen Kraftstoffverbrauch weist vor dem Hintergrund einer stetigen Senkung des CO₂-Ausstoßes auch der Dieselmotor Potential für den Einsatz als Range Extender auf. Aufbauend auf den in COMO I gesammelten Erfahrungen zur Optimierung der dieselmotorischen Gemischbildung und Verbrennung unter Einbeziehung alternativer Kraftstoffe sollen sich die Arbeiten auf die Entwicklung eines kleinvolumigen Dieselmotors konzentrieren. Für die Richtigkeit dieses Ansatzes sprechen auch aktuelle Entwicklungen der Fahrzeugindustrie. So setzt neben Peugeot/Citroën auch Volvo auf den Dieselmotor als Hybridkomponente und auch der von VW als „1 l-Auto“ präsentierte neue seriennahe Prototyp XL1 arbeitet als Plug-In-Hybrid mit einem kleinvolumigen TDI-Motor.

Eigene Vorarbeiten

Eine solide Ausgangsbasis wurde mit der Bearbeitung des Teilprojektes A1 „Extreme Hochdruckeinspritzung alternativer Dieselkraftstoffe“ im COMO I geschaffen [5]. In diesem Projekt wurden neben der Gemischaufbereitung auch die -bildung und die Verbrennung alternativer Kraftstoffe, die mit einem Einspritzdruck von bis zu 3500 bar eingespritzt wurden untersucht. Erfahrungen im Bereich der Gemischaufbereitung konnten am Hydraulikprüfstand und bei Sprayuntersuchungen in einer Druckkammer für Dieselbetrieb gesammelt werden. Dabei wurden neben der Erfassung der makroskopischen Spraystruktur (z.B. Penetration, Spraywinkel, und -volumen) [6, 7, 8] auch der Tröpfchendurchmesser und die -geschwindigkeit mittels laserbasierender Messverfahren bei unterschiedlichen Kammerdrücken und -temperaturen untersucht. Damit konnte das Potenzial alternativer Kraftstoffe zur weiteren Homogenisierung des Kraftstoff-Luftgemisches dargestellt werden.

Parallel zu diesen Untersuchungen wurde ein fremdkonditionierter Einzylinderforschungsmotor mit Hochaufladung aufgebaut, an dem der Höchstdruckinjektor appliziert werden konnte. Hier wurden stationäre Untersuchungen bei unterschiedlichen Lastpunkten im Hinblick auf eine Emissionsreduzierung bei konstantem bzw. sinkendem Kraftstoffverbrauch durchgeführt.

4. Planung des Teilprojekts

Beschreibung

Die größte Herausforderung in diesem Arbeitsschwerpunkt ist die Auslegung eines Brennverfahrens hinsichtlich der Randbedingungen eines Range Extenders. Da zur Gewichts- und Kostenreduzierung des Range Extenders eine Aufladung der Verbrennungskraftmaschine zumindest zunächst entfällt, muss der als TDI konzipierte Versuchsträger entsprechend auf Saugbetrieb umgestellt werden. Hier muss vor allem die Luftführung und Kraftstoffeinbringung zur Realisierung eines möglichst hohen Homogenisierungsgrades zur Reduzierung des

Kraftstoffverbrauchs und der Rußemissionen angepasst sowie eine Optimierung des Einspritztimings vorgenommen werden.

Bei der Auswahl der Injektoren wird auf strömungsoptimierte Düsen gesetzt, um bei der Erzielung der notwendigen Gemischaufbereitungsgüte mit einem möglichst geringen Einspritzdruck auszukommen. Bei der Fertigung der optimierten Einspritzdüsen kann die traditionell gute Zusammenarbeit mit BOSCH genutzt werden.

Methoden

Methodisch wird bei der Vorgehensweise auf die Einheit von motorischen und optischen Versuchen gesetzt. Diese haben sich bereits in COMO I und in zwei weiteren DFG-Projekten [9, 10] bewährt. Technisch bestehen hierfür mit dem in COMO I aufgebauten Einzylinder-Forschungsmotor und der entsprechenden Prüfstandperipherie, wie z.B. Abgasmesstechnik, Motorkonditionierung und Indizierung und dem von VW zugesagten 2-Zylinder-TDI-Versuchsmotor hervorragende Voraussetzungen. Die Druckkammer, gemeinsam mit den verfügbaren laseroptischen Messtechniken (High Dense-PDA, High Speed Video mit Spray-Master-System, 3D-PIV, LIF/LIEF, Schlieren und Extinktion) und der sich im Aufbau befindende Transparentmotor (IKAM) erweitern diese Prüfstandumgebung sinnvoll.

In den stationären Motorversuchen mit Konditionierung der Frischluft, des Kühlwassers und des Öls werden Leistungsparameter, Luftverhältnis λ , AGR-Rate, Verbrauch und Emissionen gemessen sowie die notwendigen Parameter für die Druck- und Brennverlaufsanalyse bereitgestellt, mit Hilfe derer eine Betriebspunktoptimierung möglich ist. Für die Konfigurierung und Parametrierung des Einspritzsystems sind neben hydraulischen Untersuchungen an der Einspritzbank auch optische Untersuchungen in der Druckkammer und im Transparentmotor, die unter vergleichbaren Motorbetriebsbedingungen durchgeführt werden, von entscheidender Bedeutung. Sie erlauben die Analyse der Gemischbildungsphänomene einschließlich der Strahl-Wand-Interaktion unter den Bedingungen kleinvolumiger Saugmotoren.

Unterstützt werden die Untersuchungen durch die 3D-CFD-Simulation (FIRE, AVL), mit deren Hilfe Aussagen über die Gemischbildung bei Veränderung der Randbedingungen (Einspritzmenge und -druck, Veränderung der Luftführung, Kraftstoffart, ...) schon vor den eigentlichen Messungen getroffen werden können. Darüber hinaus können mit den CFD-Ergebnissen die Variationen unterschiedlicher Düsengeometrien und Kolbenmulden auf ein Minimum reduziert werden, um damit den messtechnischen Aufwand in Grenzen zu halten.

R1.2 – Reibungsreduktion

1. Antragsteller

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
Deters Bartel	Ludger Dirk	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil.	Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Maschinenenelemente und Tribologie
Strackeljan	Jens	Prof. Dr.-Ing.	Institut für Mechanik, Lehrstuhl Technische Dynamik
Karpuschewski	Bernhard	Prof. Dr.-Ing.	Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Lehrstuhl Zerspantechnik
Bähr	Rüdiger	Apl. Prof. Dr.-Ing.	Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Lehrstuhl Ur- und Umformtechnik
Scheffler Krüger	Michael Manja	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.	Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Lehrstuhl Werkstofftechnik

2. Ausgangssituation, Zielsetzung

Einen erheblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch und damit auf den CO₂-Ausstoß eines thermischen Range Extenders haben die reibungsbedingten Verluste. Speziell die Reibungsverluste in den derzeit verbauten Gleitlagerungen von Pleuel und Kurbelwelle sowie die Reibungsverluste in den Kolben/Zylinder-Paarungen stellen einen wesentlichen Anteil an den gesamten Reibungsverlusten im Range Extender dar. Ziel dieses Teilprojektes ist es, die Kolben/Zylinder-Paarung eines Diesel Range Extenders hinsichtlich Reibung zu optimieren, um so den Kraftstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß des Range Extenders zu verbessern. Weiterhin soll ein Simulationsmodell für Kolben/Zylinder-Paarungen aufgebaut bzw. weiterentwickelt werden, welches im Rahmen des Digital Engineering zukünftig eine verbesserte Vorauslegung solcher Paarungen ermöglichen soll.

3. Stand der Forschung / Eigene Vorarbeiten

Stand der Forschung

Arbeiten zur Optimierung von Kolben/Zylinder-Paarungen sind Gegenstand der Forschung im Bereich der Werkstoffe, Beschichtungen, Bohrungs- und Laufflächenbearbeitung sowie der Kolben und Kolbenringe. In den meisten Arbeiten, gerade aus der Zulieferindustrie, wird dabei meist nur einer der oben genannten Punkte betrachtet. Ein ganzheitlicher Ansatz durch Betrachtung aller „Stellschrauben“ unter Berücksichtigung des Leichtbaugedankens wird bisher so nicht verfolgt. Für die Simulation von Kolben/Zylinder-Paarungen kommen 2D- und 3D-Modelle zum Einsatz, die die Reynold'sche Differentialgleichung zur Beschreibung der Ölströmung und Blenden- oder Fadenstrommodelle zur Beschreibung der Gasströmung nutzen [4,5,9,10,12-14]. Wechselwirkungen zwischen der Gas- und Flüssigphase, wie z.B. eine An-

reicherung des Gasstroms mit Bestandteilen aus den Flüssigphasen (Öl oder unverbrannter Kraftstoff), werden nicht berücksichtigt. Weiterhin ist eine gleichzeitige ganzheitliche Berechnung des Gesamtsystems Kolben/Kolbenringe/Zylinderbuchse noch nicht vorhanden. So wird zuerst die Kolben/Zylinder-Dynamik (Quer- und Kippbewegungen des Kolbens) unter Berücksichtigung von Zylinderverzügen (mechanisch und thermisch) berechnet, ohne dass der Einfluss der Kolbenringe berücksichtigt wird. Das Ergebnis einer solchen Berechnung geht dann als Randbedingung in die Berechnung der Kolbenringdynamik ein.

Eigene Vorarbeiten

Im Rahmen von COMO I wurden für die Kolben/Zylinder-Paarung eines 4-Zylinder TDI-Motors Untersuchungen zur Bohrungs- und Laufflächenbearbeitung sowie zum Reibungs- und Verschleißverhalten durchgeführt [2,8]. Es konnte festgestellt werden, dass ein Glattwalzen der Laufflächen im letzten Bearbeitungsschritt (Einbringen von Druckeigenspannungen) eventuell Vorteile bringen kann. Mit dem Ziel der Substituierung der Laserstrukturierung von Zylinderlaufflächen durch ein kostengünstigeres Verfahren, wurde ein Werkzeugkonzept zur mechanischen Applikation von Mikrogeometrien zur Schmierstoffspeicherung für Bohrungen entwickelt und hergestellt [6]. Zur Simulation der Kolben/Zylinder-Paarung wurden in COMO I Arbeiten zum Aufbau eines entsprechenden Modells durchgeführt [11]. Unabhängig von COMO I wurden außerdem Vorarbeiten begonnen, die eine Beschreibung der wechselwirkenden Öl- und Gasströmung in der Kolben/Zylinder-Paarung auf Grundlage der Computational Fluid Dynamics (CFD) ermöglichen.

Im Bereich der Werkstoffe liegen aus COMO I Erfahrungen mit dem Werkstoff Eisenaluminid vor [7,15]. Mit seinem hervorragenden Eigenschaftsprofil (geringe Dichte, Hochtemperatur- und Ermüdungsfestigkeit, Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit) ist dieser für den Einsatz in Verbrennungsmotoren gerade mit Blick auf konstruktiven Leichtbau und der damit verbundenen Reduzierung von reibungserhöhenden Massenkräften prädestiniert.

4. Planung des Teilprojekts

Beschreibung

Das gesamte Teilprojekt ist in Arbeitspakete gegliedert, die miteinander vernetzt sind und aufeinander aufbauen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der Range Extender stationär im Zwei- oder Dreipunktbetrieb arbeiten wird, wodurch eine gezieltere Optimierung der Kolben/Zylinder-Paarung möglich ist.

Eine Reibungsoptimierung der Kolben/Zylinder-Paarung gelingt, wenn bestehende Werkstoffkonzepte für die Laufflächen in den Zylinderbohrungen, den Kolben und die Kolbenringe durch neue reibungsreduzierende Werkstoffe/Beschichtungen in Kombination mit innovativen Oberflächenbearbeitungsmethoden zur Herstellung reibungssenkender Mikrostrukturen auf den reibungsrelevanten Laufflächen ersetzt werden können und außerdem sichergestellt wird, dass die Geometrie der Zylinderbohrung im Betrieb ideal rund bleibt, um so die reibungserhöhende Vorspannung der Kolbenringe reduzieren zu können.

Für die Reibungsoptimierung der Kolben/Zylinder-Paarung sollen daher neue Werkstoffe/Beschichtungen eingesetzt werden, indem untereutektische AlSi-Werkstoffe im Zusammenspiel mit übereutektischen AlSi-Beschichtungen für die Zylinderlauffläche und eine Eisenaluminid-Beschichtung der Kolben betrachtet werden. Hierzu sollen umfangreiche Grundlagenuntersuchungen zur Herstellbarkeit geeigneter Werkstoffverbunde (Gießen, Laserlegieren) erfolgen, die durch Materialanalysen begleitet werden. Um nach dem Aufbringen hoch siliziumhaltiger Beschichtungen auf den Zylinderlaufflächen eine reibungsarme Beschichtung zu erhalten, sollen weiterhin Fertigungsuntersuchungen in Form des Honens erfolgen, mit dem Ziel, die harten Siliziumkarbide so freizulegen, dass eine reibungsoptimierte Oberflächenstruktur entsteht. Außerdem sollen Untersuchungen zum Formhonen der Zylinderbohrung erfolgen, indem die Bohrung vor dem Honen so verformt wird, dass sich im Betrieb durch mechanische und thermische Verformungen eine reibungsgünstige kreisrunde Bohrungsgeometrie einstellt. Zur Überprüfung des reibungsreduzierenden Potenzials der als aussichtsreich detektierten Konzepte, werden auf einem Schwing-Reib-Verschleiß Prüfstand und einem Einzylinder-Reibungsmotor Reibungsuntersuchungen durchgeführt. Das aussichtsreichste Gesamtkonzept wird anschließend auf den Range Extender übertragen und auf einem Motorenprüfstand sowohl geschleppt als auch befeuert geprüft. Weiterhin soll das in COMO I erarbeitete Simulationsmodell für Kolben/Zylinder-Paarungen weiterentwickelt werden, indem eine ganzheitliche Simulation der Kolbengruppe unter Berücksichtigung von mechanischen und thermischen Verformungen aller beteiligten Elemente realisiert werden soll.

Methoden

Für eine erfolgreiche Bearbeitung des Vorhabens kommen Methoden aus der Konstruktion (Produktentwicklungsmethodik nach Pahl/Beitz, CAD/CAM), der Simulation (MKS, FEM, EHD), der Werkstoffanalyse (Metallografie, Rasterelektronen- und Rasterionenmikroskopie, Mikrotomographie), der Fertigung (Gießen, Strahlen, Laserlegieren, Honen, Analyse von Prozesskräften) und der tribologischen Bauteilprüfung (Einsatz verschiedener Prüfkategorien) zum Einsatz. Weiterhin stehen hochmoderne Einrichtungen und Anlagen, wie ein gießtechnisches Labor, ein Präparationslabor, eine Honmaschine, ein 5-Achs-Bearbeitungszentrum, ein SRV-Prüfstand, ein neuartiger Reibungsmotor und 2 Motorenprüfstände, zur Verfügung.

R2 – Brennstoffzelle

1. Antragsteller

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
Kienle	Achim	Prof. Dr.–Ing. habil.	Institut für Automatisierungstechnik, Lehrstuhl Automatisierungstechnik / Modellbildung und Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg
Lindemann	Andreas	Prof. Dr.–Ing.	Institut für elektrische Energiesysteme, Lehrstuhl für Leistungselektronik
Mangold	Michael	Prof. Dr.–Ing. habil.	Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg
Styczynski	Zbigniew	Prof. Dr.–Ing.	Institut für elektrische Energiesysteme, Lehrstuhl Elektrische Netze und alternative Elektroenergiequellen

2. Ausgangssituation, Zielsetzung

Integration der Brennstoffzelle ins Bordnetz

In diesem Teilprojekt ist das Bordnetz in einem reinen Elektrofahrzeug Ausgangspunkt der Untersuchungen. Dazu werden die Kompetenzen der Brennstoffzellengruppe von Professor Styczynski sowie die Kompetenz im Bereich Energiewandlung und Antrieb der Leistungselektronikgruppe von Professor Lindemann gebündelt. Das Einsatzspektrum des zu verwendenden Brennstoffzellensystems wird um eine Range Extender-Funktion erweitert. Diese Funktion dient zur Absicherung bzw. Steigerung der Reichweite, sofern der Ladezustand der Traktionsbatterie einen noch zu definierenden Grenzwert unterschreitet. In diesem Fall stellt das Brennstoffzellensystem elektrische Energie zur Verfügung. Die Verwendung einer Brennstoffzelle als Range Extender stellt eine von verschiedenen Fahrzeugherstellern verfolgte Alternative zum Hybridfahrzeug mit Verbrennungsmotor dar. Die Vorteile des Konzepts liegen in der lokalen Emissionsfreiheit des Fahrzeugs sowie in der Unabhängigkeit von Mineralöl-basierten Treibstoffen. Gegenüber reinen Batterie-Elektrofahrzeugen bieten Brennstoffzellenfahrzeuge eine deutlich höhere Reichweite.

Regelung von Brennstoffzellen

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Entwicklung eines modellgestützten Brennstoffzellen-Regelungskonzepts sowie eines geregelten Brennstoffzellensystems. Dabei sollen drei Betriebsarten berücksichtigt werden, die die typischen Anforderungen an ein Brennstoffzellensystem als Range Extender widerspiegeln: der Startvorgang des Fahrzeugs, der Betrieb der Brennstoffzelle an einem optimalen stationären Arbeitspunkt sowie die Durchführung von Lastwechseln.

3. Stand der Forschung / Eigene Vorarbeiten

Stand der Forschung

Im Projekt COMO I, Teilprojekt A3, wurde die Optimierung eines erweiterten konventionellen Kfz-Bordnetzes mit erhöhten elektrischen Lasten unter Berücksichtigung einer PEM-Brennstoffzellen basierenden Auxiliary Power Unit (APU) erforscht [1–16].

Eigene Vorarbeiten

Zu den genannten Aufgabenstellungen im Bereich der Regelung existieren umfangreiche Vorarbeiten in der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Kienle sowie Herrn Prof. Mangold. Diese beschäftigen sich mit der einphasigen und mehrphasigen Modellierung von Brennstoffzellen [18,19,24], der Modellierung von Kaltstartvorgängen [28], der Analyse der Wechselwirkungen zwischen Brennstoffzelle und DC/DC-Wandler [20], der modellgestützten nichtlinearen Analyse von Brennstoffzellensystemen [21,22,26,27] sowie der Zustandsschätzung [17] und der nichtlinearen Brennstoffzellenregelung [23,25,29].

4. Planung des Teilprojekts

Beschreibung

Bestandteil des Projektes sind die Auswahl und Dimensionierung geeigneter Komponenten bzw. die Definition von relevanten Kriterien, die den sicheren und verlässlichen Betrieb des Bordnetzes, bei einem möglichst hohen Wirkungsgrad zulassen. Dafür sind verschiedene Strategien zu entwickeln und in Regelkonzepte umzusetzen. In Abstimmung mit den Projektpartnern werden die Schnittstellen und Regelungsstrategien der Teilsysteme für das Energiemanagement analysiert und definiert. Bei den Untersuchungen soll auf die im Rahmen eines DFG-Projekts beschafften Brennstoffzellengeräte zurückgegriffen werden, um die theoretischen Untersuchungen durch praktische Messungen zu untermauern. Zum Einsatz zunächst kommt eine 5 kW Brennstoffzellenanlage, mit der über leistungselektronische Stellglieder eine Verbindung zum Bordnetz erfolgen kann. Über die Definition der zu erwartenden Leistungsflüsse im Bordnetz sind Strategien zur wirkungsgradoptimierten Betriebsführung abzuleiten. Dabei sind der kontinuierliche sowie diskontinuierliche Betrieb hinsichtlich einer effizienten Brennstoffausnutzung und somit ausreichender Energiebereitstellung zur Reichweitenverlängerung zu untersuchen.

Beim Startvorgang muss die Brennstoffzelle möglichst rasch und unter möglichst geringer Belastung der Batterie in ihren nominalen Betriebspunkt gebracht werden, der durch eine bestimmte Zelltemperatur und einen bestimmten Feuchtigkeitsgehalt charakterisiert ist. Vor allem bei niedrigen Umgebungstemperaturen ist diese Aufgabe anspruchsvoll, da eine Bildung von Eis oder Flüssigwasser in der Brennstoffzelle vermieden werden muss. Es soll eine Anfahrstrategie entworfen werden, die primär die in der Brennstoffzelle frei werdende Reaktionswärme nutzt und möglichst ohne externe Heizung auskommt. Ein mit dem Startvorgang verwandtes Problem stellt das kontrollierte Herunterfahren der Brennstoffzelle beim Abschalten des Fahrzeugs dar. Dabei muss die Feuchtigkeit möglichst vollständig aus der Brennstoffzelle entfernt werden, um ein Einfrieren des Stacks im Ruhezustand zu vermeiden.

Im regulären Betrieb hat die Regelung die Aufgabe, das Brennstoffzellensystem an einem gewünschten Arbeitspunkt zu stabilisieren. Dabei können sich die Systemeigenschaften über einen längeren Zeitraum hinweg aufgrund von Alterungseffekten ändern. Mögliche Stellgrößen sind die Gasströme und Gaszusammensetzungen auf Anoden- und auf Kathodenseite, die Kühlmittelströme bzw. die Kühlgebläseleistung sowie ggf. auch der elektrische Strom durch den Brennstoffzellenstapel. Je nach Fahrzustand ist zwischen verschiedenen Arbeitspunkten hin- und her zu wechseln. Soll die Brennstoffzelle die Fahrzeugbatterie aufladen, ist der optimale Arbeitspunkt der mit dem höchsten elektrischen Wirkungsgrad. Wenn die Fahrzeugbatterie voll aufgeladen ist kann die Brennstoffzelle zeitweise in einen Ruhezustand zu versetzen, in dem möglichst wenig Treibstoff verbraucht wird. Schließlich kann neben dem stromgeführten Betrieb gelegentlich auch ein wärmegeführter Betrieb sinnvoll sein, in dem die Brennstoffzelle in erster Linie zur Beheizung der Fahrgastzelle dient.

Methoden

Die resultierenden Messergebnisse bilden die Grundlage für eine optimierte lebensdauerförderliche Betriebsführung der Brennstoffzelle und infolge dessen die Gewährleistung der Versorgungssicherheit des Bordnetzes. Der diskontinuierliche Betrieb bietet die Möglichkeit das Bordnetz bedarfsgerecht mit elektrischer Energie zu versorgen und mit gezielten Regel- und Steuerstrategien eine Reichweitensteigerung durch das Nachladen der Traktionsbatterie zu erreichen. Über geeignete Skalierungsschnittstellen lässt sich das Verhalten zwischen Batterie-Brennstoffzellen-System und Antriebsmotor untersuchen, wobei auch der Einfluss einer möglichen Rekuperation der Bremsenergie auf das BZ-System bezüglich des kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betriebs betrachtet werden soll. Einen weiteren Nutzungsaspekt der Brennstoffzelle im Elektrofahrzeug stellt deren Abwärme im Betrieb dar. Der Bedarf an thermischer Energie im Elektrofahrzeug kann durch die Abwärmenutzung der Brennstoffzelle äußerst effizient gedeckt werden. Weiterhin kann die Abwärme zur Temperierung der Traktionsbatterie genutzt werden, um die Ladung der Batterie auch bei niedrigen Umgebungstemperaturen zu gewährleisten. In der gesamten Systemauslegung erfolgt die Auswahl der Komponenten unter den Aspekten Gewichtsreduktion, hoher Gesamtwirkungsgrad im breiten Arbeitsbereich, was in der gesamten Energiebilanz Einsparungspotenziale aufzeigt.

Für den Wechsel zwischen verschiedenen Arbeitspunkten sollen ebenfalls geeignete Regelungsstrategien entwickelt werden. Der Arbeitspunktwechsel soll möglichst schnell erfolgen, wobei die Zelle während der transienten Betriebsphase weder austrocknen noch geflutet werden darf. Aus regelungstechnischer Sicht ist der Arbeitspunktwechsel deutlich anspruchsvoller als das Stabilisieren des Systems an einem festen Betriebspunkt, da sich die nichtlinearen Eigenschaften des Brennstoffzellensystems viel stärker bemerkbar machen. Geeignete nichtlineare Regelungsansätze wurden in den Vorarbeiten entwickelt. Sie sollen hier erweitert und erprobt werden. Die entwickelten Regelungskonzepte sollen auf einem Prozessrechner implementiert werden.

R3 – Akustik

1. Antragsteller

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
Gabbert	Ulrich	Prof. Dr.–Ing. habil.	Institut für Mechanik Lehrstuhl für Numerische Mechanik
Kasper	Roland	Prof. Dr.–Ing.	Institut für Mobile Systeme Lehrstuhl für Mechatronik
N.N. Henze	Wilfried	Dr.–Ing.	Institut für Mobile Systeme Lehrstuhl für Kolbenmaschinen
Verhey	Jesko	Prof. Dr. rer. nat. habil.	Medizinische Fakultät Abteilung für Experimentelle Audiologie
Strackeljan	Jens	Prof. Dr.–Ing.	Institut für Mechanik Lehrstuhl Technische Dynamik

2. Ausgangssituation, Zielsetzung

Der umweltbewusste Käufer eines E-Fahrzeuges erwartet, dass sich der Antrieb im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor durch ein deutlich besseres NVH-Verhalten (Noise, Vibration, Harshness) auszeichnet. Erste Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Akustik eine dominierende Rolle spielt, weil zum einen sekundäre Geräuschanteile deutlicher wahrgenommen und zum anderen der Verbrennungsmotor des RE (Range Extender) beim automatischen Zuschalten plötzlich störende Geräusche erzeugt, die in keinem direkten Zusammenhang mit dem aktuellen Fahrzustand stehen. Hier setzt das Ziel des Teilprojektes R3 an, das darin besteht, den Elektroantrieb mit RE (Verbrennungsgeräusch, mechanisches Geräusch, Ansaug-, Abgas- und Lüftergeräusche) einschließlich der Nebenaggregate und eines geräuschbasierten Motormanagements akustisch möglichst unauffällig zu gestalten. Dazu werden sowohl passive als auch aktive Maßnahmen der Schallreduktion verfolgt und gemeinsam mit Partnern anderer Teilprojekte (R1.1, R1.2, E1, E2, E4) auch konstruktive Maßnahmen zur Geräuschbeeinflussung in die Betrachtungen einbezogen. Das langfristige Ziel des Teilprojektes R3 ist die Optimierung der akustischen Eigenschaften von E-Fahrzeugen mit RE, um eine möglichst hohe Akzeptanz für diese neue Technologie zu erreichen.

3. Stand der Forschung / Eigene Vorarbeiten

Stand der Forschung

Bisherige Erkenntnisse belegen, dass das akustische Verhalten von Elektrofahrzeugen ein entscheidendes Merkmal für die Kundenakzeptanz darstellt. Daher kommt der Akustik bei der Entwicklung neuer Antriebskonzepte eine zentrale Bedeutung zu [1]. Für Elektrofahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor als Range Extender (RE) ist die Marktfähigkeit und Kundenak-

zeptanz hinsichtlich des NVH-Verhaltens gegenwärtig noch nicht beantwortet [2]. Zu der Thematik gibt es bisher kaum relevante Veröffentlichungen. Beiträge auf der letzten Jahrestagung 2010 der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DAGA) unterstreichen jedoch die große Bedeutung der Akustik im Zusammenhang mit der E-Mobilität [7–10]. Für das adressierte Forschungsgebiet sind unter anderem auch Ergebnisse von Interesse, die in den letzten Jahren im Zusammenhang mit Hybridantrieben erzielt wurden [3–5]. Aktive Konzepte der Schallreduktion wurden in letzter Zeit schon erfolgreich an Fahrzeugkomponenten erprobt [6].

Eigene Vorarbeiten

Die umfangreichen Vorarbeiten und Veröffentlichungen der Antragsteller Gabbert, Kasper, Tschöke und Henze im Verbundprojekt COMO I auf dem Gebiet der aktiven Schwingungs- und Schallreduktion von Motorenkomponenten sind ausführlich im Sachstandsbericht [6] dokumentiert. Für das Teilprojekt R3 sind insbesondere die Ergebnisse zur ganzheitlichen numerischen Modellierung von aktiven Struktur-Akustik-Problemen [11] einschließlich der Regelung und die experimentellen Arbeiten zur praktischen Erprobung der neu entwickelten Methoden an einem Rumpfmotor relevant [12,13,6]. Weiterhin gibt es Vorarbeiten und Erkenntnisse hinsichtlich der Simulation der akustischen Anregung des Motors infolge des Anlagewechsels des Kolbens am Zylinder im Motorbetrieb [31]. Für das Schwingungsverhalten und die akustischen Eigenschaften eines Fahrzeuges spielt die Unterdrückung der Körperschallweiterleitung eine Rolle, wozu in COMO I erfolgreich aktive Motorlager entwickelt wurden [14–17]. Körperschallsignale lassen sich, wie in [18] gezeigt wurde, für ein akustisches Motormanagement nutzen. Der Antragssteller Verhey verfügt über langjährige Erfahrungen in der experimentellen Hörakustik und der Modellierung der auditorischen Wahrnehmung von technischen Schallen, insbesondere der Fahrzeugakustik [19–28]. Beim Antragsteller Strackeljan liegen aus COMO I Vorarbeiten und Ergebnisse hinsichtlich der Simulation der Kolben/Zylinder-Paarung vor [29,30], die in Verbindung mit R1.2 so weiterentwickelt werden sollen, daß modellbasiert Anregungssignale für die Motorakustik berechnet werden können.

4. Planung des Teilprojekts

Beschreibung

Der Schwerpunkt des Projektes R3 liegt auf der Optimierung der akustischen Eigenschaften eines RE Verbrennungsmotors für E-Fahrzeuge unter Beachtung der Einbindung des Motors in den Antriebsstrang. Das Projekt R3 ist in die folgenden vier Arbeitspakete gegliedert:

- AP1 Experimentelle Motoren- und Fahrzeugakustik, akustisches Motormanagement
- AP2 Struktur-Akustik-Interaktion, aktive und passive Methoden der Schallbeeinflussung
- AP3 Aktive Motorlager zur Schwingungs- und Körperschallreduktion
- AP4 Psychoakustik, Bewertung von Schallereignissen
- AP5 Schallanregung durch Kolben/Zylinder-Paarung

In der ersten Arbeitsetappe erfolgt die Mitwirkung an der Komplettierung eines bereitgestellten Dieselmotors zum RE und der Aufbau eines Motorenprüfstandes für experimentelle Un-

tersuchungen zu Akustik des RE (AP1). Parallel dazu wird ein ganzheitliches akustisches Modell für den RE entwickelt, mit dem die Schallabstrahlung bei unterschiedlichen Betriebszuständen simuliert werden kann (AP2). Neben gemessenen Anregungssignalen (AP1) kommen später auch berechnete Signale aus der Kolben-Zylinder-Dynamik (AP5) zum Einsatz. Das ganzheitliche numerische Berechnungsmodell wird mit Hilfe experimenteller Daten verifiziert und verbessert (AP2, AP1). Es dient als Basis für Konzeptstudien zum Potential der akustischen Optimierung von RE (Schwerpunkt: passive und aktive Kapselungen, Einsatz von Dämmmaterialien, aktive Methoden der Schallbeeinflussung). Für die Motorlagerungen werden aktive Methoden aus COMO I auf den RE übertragen, optimiert und erprobt (AP3). Am Motorprüfstand wird die Perzeption des zunächst ungekapselten RE ermittelt und modellbasiert psychoakustische Bewertungen durchgeführt (AP4). Die Bewertungsmodelle aus (AP4) werden genutzt, um Zielfunktionen für die Beeinflussung der Motorenakustik abzuleiten.

In der zweiten Arbeitsetappe werden modellbasiert akustisch optimierte Lösungskonzepte entwickelt und bewertet (AP2, AP4, AP5). Erfolgversprechende Varianten werden experimentell umgesetzt und am RE erprobt (AP1). Nach dem gegenwärtigen Stand der Erkenntnisse kommen dafür aktive bzw. semiaktive Maßnahmen am RE selbst sowie passive und aktive Kapselungen bestehend aus unterschiedlichen Materialkombinationen in Frage. Bei der Nutzung von Kapselungen muss der Temperatureinfluss zusätzlich berücksichtigt werden (AP2). Auf experimentellem Wege (AP1), flankiert durch hörakustische Messungen und Bewertungen bei unterschiedlichen Betriebszuständen (AP4), erfolgt die Erprobung und Weiterentwicklung der Methoden zur Schallreduktion und Schallbeeinflussung. Unter Nutzung der daraus gewonnenen Erkenntnisse erfolgt eine akustische Funktionsoptimierung des RE in Verbindung mit dem Modulträger II (AP2), die Realisierung der entwickelten Konzepte und deren experimentelle Erprobung und Bewertung (AP1, AP4).

Methoden

Für die Bearbeitung von R3 werden in COMO I entwickelte numerische Methoden und Softwaretools für die Vibroakustik und die Signalanalyse genutzt und problemorientiert weiterentwickelt (gekoppelte FEM-BEM-Modelle für Struktur-Akustik-Probleme, FEM für thermische Probleme). Reglerentwicklungen und Erprobungen erfolgen in HIL- Experimenten. Zur Realisierung eines geräuschbasierten Motormanagements stehen Erkenntnisse aus dem laufenden FVV-Vorhaben „Geräusch geregelter Dieselmotor“ zur Verfügung. Aus COMO I liegen Erfahrungen hinsichtlich der Entwicklung von optimal abgestimmten aktiven Lagern vor, die auf den RE übertragen und an typische Betriebsszenarien (Start-, Stop- und Stationärbetrieb etc.) angepasst werden. Für die experimentelle Schwingungs- und Schallfeldanalyse steht dem Teilprojekt R3 eine umfangreiche Messtechnik (akustische Nahfeldholographie und Beamforming, reflexionsarmer Messraum, 3D-Laser-Scanning Vibrometer, Motorenprüfstände usw.) zur Verfügung. Als psychoakustische Messmethode liegen umfassende Erfahrungen in der absoluten Bewertung (stationär und dynamisch) von Empfindungen, der adaptiven Vergleichsverfahren zur Bestimmung gleicher Empfindungsstärke sowie zur Schwellenbestimmung vor. Zudem verfügen die Antragssteller über Erfahrungen in der Nutzung der Kunstkopftechnik.

A Antriebsstrang

Der Antriebsstrang eines Elektrofahrzeuges verteilt und steuert den Energiefluss im Hochleistungsnetz vom elektrischen Speicher zu den Antriebsmotoren im Motorbetrieb bzw. in umgekehrter Richtung während der Rekuperation im Generatorbetrieb mittels leistungselektronischer Stellglieder. Gleichzeitig stellt er die Verbindung zum Range Extender her, um bei Bedarf Energie in den elektrischen Speicher einzuspeisen bzw. den Antriebsmotoren zuzuführen. In der Literatur werden unterschiedliche Bordnetz Topologien vorgeschlagen, um eine zuverlässige Energieverteilung bei möglichst geringen Verlusten und vertretbarem Kostenaufwand zu erreichen [13,14,15]. Diese letztlich offene wissenschaftliche Fragestellung soll in diesem Projektbereich im Zusammenspiel der wichtigen Antriebsstrang-Subsysteme untersucht und beantwortet werden.

Da auf der einen Seite Kapazitäten, Speicher- und Ladeströme sowie die Betriebsspannung der Speicherbatterie eng begrenzt sind und auf der anderen Seite durch den dynamischen Fahr- und Bremsbetrieb kurzfristig hohe Ströme in beide Richtungen auftreten können, stellt das Batteriemanagement eine besondere Herausforderung dar. Teilweise werden noch zusätzliche schnelle Speicher in Form von Supercaps verwendet, um die geforderte Lebensdauer der Batterie zu erreichen, was letztlich jedoch zu einer Komplexitäts- und Kostensteigerung des Antriebsstrangs führt.

Zur Anpassung von Leistung, Strom oder Spannung der verschiedenen Subsysteme kommen leistungselektronische Grundstrukturen zum Einsatz, jedoch für einen Einsatz unter den dynamischen Betriebsbedingungen eines Antriebsstrangs hinsichtlich ihres Wirkungsgrades, ihrer Zuverlässigkeit und ihrer EMV untersucht und optimiert werden müssen.

Die Topologie des Fahrantriebs von Elektrofahrzeugen sowie die verwendete Motortechnologie ist aktuell Gegenstand intensiver Untersuchungen in Wissenschaft und Industrie. Ausgehend von eher konventionellen Zentralantrieben, die mittels Getriebe und Differential auf zwei oder vier Antriebsräder wirken, über Doppelantriebe für Front- oder Heckantrieb bis zum Einzelradantrieb befindet sich die gesamte Lösungspalette in der Diskussion, in der Entwicklung und teilweise bereits in Serie. Dabei ist festzustellen, dass erste Serienlösungen der Industrie aus Kosten- und Verfügbarkeitsgründen eher auf klassische zentrale Antriebskonzepte zurückgreifen (Tesla, Audi e-tron), während innovativere Einzelradantriebe sich noch in einem wesentlich früheren Entwicklungsstadium befinden. Das Antriebs- und Fahrdynamikkonzept eines elektrischen Zentralantriebs liegt wesentlich näher bei heute verwendeten verbrennungsmotorischen Zentralantrieben, da die Kraftverteilung auf die Antriebsräder mit ähnlichen Mitteln erfolgt. Darin liegt aber auch die große Einschränkung des Zentralantriebs gegenüber dem Einzelradantrieb, der Kräfte bzw. Drehmomente individuell für jedes Rad bereitstellen kann [16,17,18].

Im Projektbereich A werden optimale Konfigurationen für den Antriebsstrang gesucht und die erforderlichen Subsysteme in Form von Batteriemanagementsystemen, leistungselektronischen Stellgliedern sowie den Fahrantrieben untersucht und zu prototypischen Lösungen entwickelt.

A1 – Leistungselektronische Stellglieder im Bordnetz

1. Antragsteller

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
<u>Lindemann</u>	Andreas	Prof. Dr.-Ing.	Institut für elektrische Energiesysteme – Lehrstuhl für Leistungselektronik
Vick	Ralf	Prof. Dr.-Ing.	Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit – Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

2. Ausgangssituation, Zielsetzung

Den vielfältigen Einsatz leistungselektronischer Stellglieder in einem Elektro- oder Hybridfahrzeug illustriert das Bild im Abschnitt "Vernetzung" des Anhangs. Ihre Schlüsselrolle im elektrischen Bordnetz wird hier unmittelbar deutlich: In der Funktion als Antriebsumrichter für Traktion oder Range Extender, als Ladegerät, als Gleichstromsteller zwischen Hochvolt- und konventionellem Bordnetz sowie für eine zum Range-Extender gehörige Brennstoffzelle sind sie unverzichtbar. Aufgrund der im Kraftfahrzeug von anderen Anwendungen abweichenden Randbedingungen – beispielsweise hinsichtlich verfügbaren Bauraumes, Umgebungstemperatur und geforderter Lebensdauer – sollen sich die Arbeiten in diesem Arbeitspaket auf die folgenden beiden Schwerpunkte konzentrieren:

- Topologien leistungselektronischer Stellglieder und Dimensionierung der Bauelemente
- Zuverlässigkeit leistungselektronischer Bauelemente

Somit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die leistungselektronischen Stellglieder u. a. für die Energieeffizienz bzw. Reichweite und Zuverlässigkeit von Elektro- oder Hybridfahrzeugen wesentlich sind.

Insbesondere wegen der in der Leistungselektronik geschalteten großen Ströme und Spannungen muss die elektromagnetische Verträglichkeit unmittelbar in die Betrachtungen einbezogen werden, handelt es sich hierbei doch um eine grundlegende Voraussetzung für die Funktion eines elektrotechnischen Systems, die bei dessen Entwurf von Anfang an zu berücksichtigen ist, um später aufwendige Nachbesserungen zu vermeiden: Die hohen Antriebsleistungen für Elektrofahrzeuge erfordern die Verwendung lokaler Versorgungsnetze mit höherer Spannung (HV-Bus, DC-Hochvoltsystem) an denen die Elektromotoren unter Verwendung leistungselektronischer Komponenten betrieben werden. Insbesondere die schnell schaltenden Bauelemente hoher Leistung (hohes di/dt bzw. du/dt) in den Wechselrichtern verursachen Störungen in einem weiten Frequenzspektrum. Dieses Störspektrum reicht bis in den oberen MHz Bereich, wodurch es unweigerlich zu einer Störverkopplung von unterschiedlichen Leitungen kommt.

3. Stand der Forschung / Eigene Vorarbeiten

Stand der Forschung

Die aktuelle VDE-Studie E-Mobility 2020 Technologien – Infrastruktur – Märkte, herausgegeben vom VDE Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e. V. im November 2010, beschreibt den sich aus dem aktuellen Stand der Forschung ergebenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf wie folgt: "Wesentliche Entwicklungsziele bei leistungselektronischen Fahrzeugkomponenten sind die Reduzierung von Kosten (Life-Cycle) und benötigtem Bauvolumen (Erhöhung der Leistungsdichte) sowie die Erhöhung der Zuverlässigkeit. Schlüssel hierfür ist die Aufbau- und Verbindungstechnik in neuen, auf den Automobilbereich zugeschnittenen Produktionsverfahren. Die grundlegende Schaltungstechnik ist weitgehend entwickelt. Außerdem sollten die elektromagnetische Verträglichkeit (Normung des Traktionsnetzes) und die Integration des Umrichters in die Maschine weiter untersucht werden." Die vorgesehenen Arbeiten nehmen diese Zielrichtung auf.

Eigene Vorarbeiten

Siehe Anhang

4. Planung des Teilprojekts

Beschreibung

Im Hinblick auf Topologien leistungselektronischer Stellglieder und Dimensionierung der Bauelemente sollen für die o. g. Stromrichter in Wechselwirkung insbesondere mit den Arbeitspaketen Dynamisches, modellbasiertes Energiemanagement, Elektrische Maschinen und Antriebsregelung für Traktionsantriebe und Range Extender, Integration der Brennstoffzelle ins Bordnetz zunächst typische Schaltungen des Leistungskreises – welche vielfach auf Brückenschaltungen basieren – untersucht werden. Unter Berücksichtigung typischer Betriebsbedingungen ist die Schaltung im Folgenden zu dimensionieren. Mit Kenntnis der Wechselwirkung von fahrzeugspezifischen Betriebsbedingungen der Schaltung und Dimensionierung der Bauelemente können dann die an das leistungselektronische Stellglied gestellten Anforderungen an die Zuverlässigkeit auf die Bauelemente übertragen werden.

Methoden

Die für die Funktion des Gesamtsystems – hier des Elektro- oder Hybridfahrzeugs – essentielle Zuverlässigkeit der leistungselektronischen Bauelemente ist anschließend dementsprechend nachzuweisen. Da hierfür über den Halbleiter hinaus die Aufbau- und Verbindungstechnik wesentlich ist, sind Dauerprüfungen von Bauelementen verschiedener, auch neuer Technologie unabdingbar. Diese müssen an geeigneten, teilweise spezifisch zu erstellenden Prüfständen durchgeführt und anschließend ausgewertet und bewertet werden. Die so erzielten Ergebnisse erlauben eine Aussage, welche Dimensionierung und insbesondere, welche Technologien leistungselektronischer Bauelemente – welche sich gegenwärtig durch neue Halbleiter und Aufbau- und Verbindungstechnik rapide weiterentwickeln – für den Einsatz in Elektro- oder Hybridfahrzeugen geeignet sind.

A2 – Batterie als elektrochemischer Speicher

1. Antragsteller

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
Findeisen	Rolf	Prof.	Institut für Automatisierungstechnik, Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
<u>Krewer</u>	<u>Ulrike</u>	Jun.-Prof.	Institut für Verfahrenstechnik, Portable Energiesysteme
Sundmacher	Kai	Prof.	Institut für Verfahrenstechnik, Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik
Bron	Michael	Prof.	MLU Halle–Wittenberg, Institut für Chemie, Lehrstuhl für Technische Chemie

2. Ausgangssituation, Zielsetzung

Eine zentrale Rolle in der Elektromobilität spielen transportable Energiespeicher, insbesondere die Lithium-Ionen-Technologie, da diese in absehbarer Zukunft den besten Kompromiss aus Leistungsfähigkeit und Speicherkapazität aufweist [17–18]. Das energieoptimale sowie sichere und zuverlässige Zusammenspiel des Batteriesystems mit den anderen Komponenten des Fahrzeugs ist entscheidend für die Akzeptanz und den Erfolg eines innovativen zukunftsfähigen Elektrofahrzeugs. Entwurf, Auslegung, Betrieb und Optimierung des Batteriesystems, sowie dessen Einbindung in das Gesamtfahrzeug sind komplex, und es gibt eine Vielzahl bisher ungelöster wissenschaftlicher und technologischer Herausforderungen [1,17–18].

Das Teilprojekt (TP) „Batterie als elektrochemischer Speicher“ zielt auf die Entwicklung von neuen Methoden zur Bestimmung des Ladezustands und der Degradation sowie auf die Bereitstellung optimaler Betriebsstrategien und geeigneter Modelle für das Energiemanagement von Li-Ionen-Batterien in der Elektromobilität ab. Die Modelle und Methoden sollen in enger Abstimmung mit den TP E3 (Energiemanagement) und E1 (Virtuelles E-Fahrzeug & Entwicklungsmethodik) entwickelt werden und sind dort für die Auslegung und Dimensionierung der Fahrzeugkomponenten und für den energieoptimalen Betrieb des Fahrzeuges unabdingbar.

3. Stand der Forschung / Eigene Vorarbeiten

Stand der Forschung

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass für eine optimale Auslegung, Optimierung und Integration von Batteriesystemen in das Gesamtfahrzeug die Berücksichtigung der Degradation, der dynamischen Eigenschaften sowie der auftretenden elektrochemischen und thermischen Phänomene in Zellen unabdingbar ist. Von einem Übergang zu Betriebsbereichen, die elektrochemische Phänomene und Degradationseffekte berücksichtigen, wird eine deutliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Batterien erwartet [1,19,20].

Während bereits zahlreiche Untersuchungen auf mikroskopischer/elektrochemischer Ebene vorliegen [21,22], ist der Einfluss von dynamischen Prozessen und Gradienten in Temperatur, Konzentration oder Ladung in der Zelle nur unzureichend aufgeklärt. Mit Hinblick auf eine Beschreibung der wichtigen elektrochemischen Prozesse, welche einen direkten Einfluss auf das thermische Verhalten und auf die Alterung der Zellen haben, sind die derzeit verfügbaren Modelle entweder nicht in der Lage, die Dynamik hinreichend genau wiederzugeben, oder die Modelle sind so komplex [20,23], dass ihre praktische Verwendung nahezu unmöglich ist.

Zum Betrieb von Batterien werden Batteriemanagementsysteme eingesetzt, die für Überwachung und Ladung/Entladung der Zellen zuständig sind. Um den Zustand der Zelle, sowie die dynamischen Vorgänge optimal berücksichtigen zu können und damit eine hohe Lebensdauer und Leistungsfähigkeit zu gewährleisten, kommen statt empirischer Methoden [19] vermehrt modellbasierte Ansätze [1–3,18] zum Einsatz. Degradationsphänomene sowie dynamische Eigenschaften der Zellen werden in den meisten Arbeiten bis auf wenige Ausnahmen [24–25] jedoch kaum berücksichtigt. Daneben existieren bisher keine methodischen Ansätze, um diese gezielt zu berücksichtigen und das Gesamtverhalten zu optimieren.

Eigene Vorarbeiten

Zur Bearbeitung des Teilprojektes kann auf umfangreiche Vorarbeiten der beteiligten Arbeitsgruppen zurückgegriffen werden. Essentieller Bestandteil des Teilprojektes ist die modellbasierte Optimierung und Bereitstellung von geeigneten physikalisch-chemisch motivierten Modellen verschiedener Komplexitätsgrade für die Teilbereiche E1 und E3. Die beteiligten Arbeitsgruppen haben umfangreiche Forschungsexpertise in der Modellierung elektrochemischer Prozesse und von Batterien in Energiesystemen sowie in der gezielten Reduktion dieser Modelle [1–7,12,13,15]. Daneben gibt es weitreichende Expertisen in der Charakterisierung von Systemzuständen (Ladezustand) und Elektrodenzuständen (relevant für Degradationsstudien) mittels spektroskopischer Untersuchungsmethoden [8–11], mittels elektrochemischer Methoden [4–7,12–16], und in Bezug auf die Entwicklung von dynamischen Methoden zur Zustandsbestimmung [1,2,4,5,14,16], zum optimalen Betrieb (Ladung und Entladung) und zur Überwachung [1–3] von Batterien.

4. Planung des Teilprojekts

Beschreibung

Im Einzelnen gliedert sich das Projekt thematisch in drei Arbeitspakete (AP), deren Bearbeitung eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Arbeitsgruppen erfordert:

- AP1 Aufklärung, Modellierung und experimentelle Validierung von Degradationsvorgängen
- AP2 Beschreibung und Untersuchung der örtlich verteilten Effekte
- AP3 Entwicklung modellbasierter Methoden für Batteriemanagement und Modellreduktion

AP1 umfasst die Analyse und Modellierung dynamischer Degradationsvorgänge in Li-Ionen-Batterien im Fahrzeug sowie die Entwicklung von Methoden zur Online-Detektion des Degradationszustandes im Betrieb. Das hieraus gewonnene Verständnis sowie die entwickelten Mo-

delle legen die Basis für die Entwicklung von Strategien zum degradationsarmen Betrieb (AP3 und TP E3(Energiemanagement)) und zur Berücksichtigung der Degradation bei der Dimensionierung des Batteriesystems (TP E3). Um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Batteriesystem und Versuchsträger zu gewährleisten, werden kommerzielle Batteriematerialien sowie realitätsnahe, technische Betriebsbedingungen und Zellen eingesetzt. Dynamische elektrochemische Befragungsmethoden werden evaluiert bezüglich ihres Einsatzes als Detektionsmethoden für den Degradationszustand von Batterien. Spektroskopische und weitere elektrochemische Untersuchungen erlauben eine Quantifizierung der Degradationsprozesse sowie den Aufbau detaillierter, experimentell validierter Degradationsmodelle. Mit Hilfe dieser lässt sich der Degradationszustand bei gegebenen Beanspruchungsszenarien sowohl vorhersagen als auch reduzieren. Abschließende Untersuchungen sollen die Übertragbarkeit der Methoden von Einzelzellen auf Batteriepacks zeigen.

In AP2 werden örtlich verteilte Modelle für den Lade-Entlade-Zyklus von einzelnen Li-Ionen-Batterien formuliert, die für eine Optimierung und einen optimalen Betrieb des Batteriesystems notwendig sind. Dabei sind vielfältige nichtlineare Kopplungen zwischen den simultan ablaufenden Stoff-, Energie- und Ladungstransportvorgängen in den Batterien adäquat zu berücksichtigen. Die kinetischen und thermodynamischen Modellparameter sollen aus experimentellen Daten von Einzelzellmessungen identifiziert werden. Das Ziel der Modellierungsarbeiten besteht darin, in Abstimmung mit AP1 alle im System beteiligten elektrophysikalischen und elektrochemischen Teilprozesse zu quantifizieren und ein grundlegendes Verständnis ihres komplexen Zusammenwirkens zu erlangen. Unterstützt werden diese Arbeiten durch spektroskopische Oberflächencharakterisierung. Mit Blick auf die Verwendung der zu entwickelnden Modelle zum Zweck des optimalen Batteriemanagements werden in Abstimmung mit AP3 geeignete ordnungsreduzierte Modelle abgeleitet und experimentell validiert.

Ziel des AP3 ist die Entwicklung eines modellbasierten Batteriemanagementkonzepts, das einen lebensdauer- und energieoptimalen Betrieb des Batteriesystems unter Berücksichtigung der Anforderungen des Energiemanagements und des Fahrers erlaubt. Hierzu werden auf der Basis geeigneter reduzierter Modelle neue Strategien zur Ladezustandsschätzung unter Berücksichtigung der Degradation, sowie optimale Lade- und Entladestrategien entwickelt. Grundlage hierfür bilden Arbeiten zu optimierungsbasierten und beobachterbasierten Konzepten sowie die Erkenntnisse aus AP1 und AP2. Für den energie- und degradationsoptimalen Betrieb ist eine direkte Ankopplung an weitere TP (E3, A1, E1) u.a. mit Hilfe geeigneter dynamischer Modelle sowie in Form von möglichen „Zielkorridoren“ und reduzierten Modellen vorgesehen. Eine gezielte Ausnutzung des sogenannten Recovery-Effekts einzelner Zellen bzw. von Zellmodulen soll eine Steigerung der Leistung des Gesamtbatteriemoduls durch abwechselnde Belastung und Entlastung von einzelnen Zellen erzielen. Hierzu sollen geeignete dezentrale Regelungs- und Lade sowie Entladestrategien entwickelt werden, die sich auch für große Batteriesysteme, bestehend aus vielen hundert Einzelzellen, eignen.

A3 – Fahrtrieb und Fahrmanagement

1. Antragsteller

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
Kasper	Roland	Prof. Dr.-Ing.	Institut für Mobile Systeme – Lehrstuhl Mechatronik
N.N.			Institut für elektrische Energiesysteme, Lehrstuhl für elektrische Antriebssysteme (in Besetzung, vertretungsweise Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis)

2. Ausgangssituation, Zielsetzung

Einzelradgetriebene Elektrofahrzeuge eröffnen völlig neue Möglichkeiten der Fahrtriebs- und der Fahrdynamikregelung [1,2]. Im Vergleich zu herkömmlich betriebenen Fahrzeugen mit reinem Verbrennungs- oder Hybridantrieb erfolgt die Drehmomenterzeugung einzeln steuerbar direkt am Rad ohne zusätzliche Übersetzungsstufen durch Getriebe oder Verteilungsstufen durch Differentiale. Dadurch verkürzt sich die Verlustkette und sowohl im Motor- als auch im Generatorbetrieb wird ein sehr hoher Wirkungsgrad erreicht. Der Direktantrieb realisiert einen sehr leistungsfähigen elektromechanischen Energiewandler, der als wichtiges Element eines übergeordneten Energiemanagements fungiert. Weiterhin erfolgt der Drehmomentaufbau im Vergleich zu heutigen Systemen extrem schnell, so dass eine direkte dynamische Kontrolle der Raddrehmomente und der Reifenkräfte in jedem Betriebspunkt möglich wird. Der heute erforderliche extrem nichtlineare Eingriff über das Bremssystem [3] zum Aufbringen von Einzelkräften am Rad ist in den meisten Betriebspunkten nicht mehr erforderlich, da der Radnabenmotor sowohl Beschleunigungs- als auch Bremskräfte sehr schnell aufbauen kann. Diese herausragenden Eigenschaften des elektrischen Einzelradantriebs haben sich bereits in der Entwicklung mehrerer Versuchs- als auch Kleinserienfahrzeugen niedergeschlagen [4]. Andererseits stellt die hochgenaue Regelung des Einzelradantriebs, insbesondere die hochgenaue Regelung des Drehmoments bei niedrigen Geschwindigkeiten ein nicht vollständig gelöstes Problem dar. Werden BLDC Radnabenmotoren verwendet beeinträchtigen Drehmomentwelligkeiten die Funktion des Einzelradantriebes [5,6,7].

Gegenstand dieses Teilprojektes ist der elektrische Einzelradantrieb mittels Radnabenmotoren einschließlich seiner Regelung als das Herzstück eines Elektrofahrzeugs. Er bildet die Basis einer innovativen Fahrdynamikregelung, welche die Funktionen heute getrennter Systeme wie ABS, ASR oder ESP in einem ganzheitlichen Ansatz zusammenfasst und um weitere Funktionen ergänzt. Aufbauend auf einer radbasierten Drehmoment- und Schlupfregelung als untere Ebene, welche die Vorgabe der Antriebs- und Seitenkräfte am Rad über weite Bereiche sicherstellt, wird ein hierarchisches Konzept zur Fahrdynamikregelung untersucht, dargestellt und getestet, welches den vorgegebene Fahrerwunsch in Form von Fahrgeschwindigkeit und Lenkradwinkel mittels einer optimalen Echtzeitsteuerung in einer oberen Ebene in eine Bahn-

planung umsetzt und diese in einer mittleren Ebene mittels einer adaptiven Regelung auch unter sich ändernden Fahrzeug- und Umgebungsbedingungen sicher realisiert.

Ein weiteres Ziel des Teilprojekts besteht in der Untersuchung geeigneter Generatorkonzepte für den Verbrennungsmotorischen Range Extender. Hierbei geht es insbesondere um eine an den Verbrennungsmotor angepasste getriebelose Lösung, die sich einerseits in einem vorgegebenen Drehzahl- und Leistungsbereich durch eine möglichst geringe Baugröße und Masse sowie hohen Wirkungsgrad auszeichnet und sich andererseits konstruktiv optimal in den Range Extender einpasst. Im Interesse eines zügigen Projektanlaufs wird nicht auf eine eigene Generatorentwicklung orientiert, sondern auf den Einsatz eines industriell verfügbaren Generators zurückgegriffen, der durch seine elektrische Auslegung und durch steuerungs-technische Maßnahmen an den Verbrennungsmotor anzupassen ist.

3. Stand der Forschung / Eigene Vorarbeiten

Stand der Forschung

Die neuen Möglichkeiten einzelradgetriebener Elektrofahrzeuge hinsichtlich Fahrtrieb und Fahrdynamik werden erst allmählich wissenschaftlich untersucht [1]. Bereits in [2] werden die ersten Schritte in Richtung einer auf diese neuen Möglichkeiten angepassten Fahrdynamikregelung beschrieben und das vorhandene Potential aufgezeigt. Der Radnabenmotor geht als Direktantrieb noch einen Schritt weiter, indem die Kraft- bzw. Drehmomentübertragung in beide Richtungen sehr schnell erfolgen kann. Das eröffnet völlig neuartige Möglichkeiten der Fahrtriebs- und Fahrdynamikregelung, die nach jetzigem Kenntnisstand noch nicht genutzt werden. Als Radnabenmotoren kommen aus Gründen des Bauraums, des Gewichts und des Wirkungsgrads häufig hochpolige BLDC- oder permanenterregte Synchronmaschinen zum Einsatz [8].

Eigene Vorarbeiten

Für das beschriebene Projekt wesentlich sind insbesondere Vorarbeiten zur Regelung elektrischer Antriebe: Hervorzuheben sind hier Untersuchungen zur sensorlosen Regelung [9–11]. Diese soll speziell auf in Fahrzeugen üblicherweise eingesetzte, permanenterregte Maschinen angewandt werden, so dass auch die vorhandenen, hardwarebezogenen Vorarbeiten eine wichtige Rolle spielen.

Ein ursprünglich verbrennungsmotorisch betriebener Buggy wurde als Elektroversuchsfahrzeug mit Radnabenmotoren umgebaut [14]. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde ein kompletter elektrischer Antriebsstrang bestehend aus Batterien, 4 Radnabenmotoren und den zugehörigen Motor-Ansteuerungen und -Reglern konzipiert, aufgebaut, in Betrieb genommen und getestet. Parallel dazu wurden Simulationsmodelle des Versuchsfahrzeugs unterschiedlicher Komplexität entwickelt und zu Simulationsstudien bzw. zur Auslegung von Fahrdynamikregelungen verwendet [13]. Für die Simulationsstudien wurden komplexe auf 3D-CAD-Modellen basierende Fahrzeugmodelle herangezogen, welche neben dem Fahrzeug bestehend aus Rahmen, Lenkung, Fahrwerk und Bremsen auch den kompletten Antriebsstrang mit den Radnabenmotoren enthalten. Vereinfachte 2D-Modelle wurden zur Auslegung erster vereinfach-

ter Fahrdynamikregelungen genutzt. Weiterhin wurden ein vereinfachter Fahrzeugbeobachter und eine optimale Spurführstrategie entwickelt, welche als Grundlage der für dieses Projekt geplanten Arbeiten dienen kann [14–19]. Verwandte Arbeiten zur feldorientierten Regelung elektrischer Antriebsstränge unter besonderer Berücksichtigung der Energieeffizienz wurden in [12] veröffentlicht.

4. Planung des Teilprojekts

Beschreibung

In einem hierarchischen Ansatz wird ein neuartiges gekoppeltes System für Fahrtrieb und Fahrdynamik konzipiert, entwickelt und getestet. Der Fahrer übermittelt seinen Fahrwunsch in Form einer Sollvorgabe für die Fahrgeschwindigkeit und den Lenkradwinkel. Diese Vorgaben werden auf der höchsten Hierarchieebene im Rahmen einer optimalen Spurplanung in Vorgaben für die Radlängs- und -seitenkräfte und gegebenenfalls den Lenkwinkel umgesetzt. Das Fahrzeugmodell wird entlang der so berechneten Nominalspur linearisiert und auf einer mittleren Hierarchieebene zur Regelung der gesamten Fahrzeugdynamik verwendet. Der Regler generiert korrigierte Sollwerte für die Radlängskräfte und den Lenkwinkel. Diese Vorgaben werden auf der untersten Hierarchieebene von einer Radregelung umgesetzt. Dort wird ein Radnabenmotor als Traktionsantrieb eingesetzt, der neben einer Drehmoment- auch eine Schlupfregelung zur Verfügung stellt. Die hierarchische Fahrtrieb- und Fahrdynamikregelung wird durch ein ebenfalls hierarchisches Beobachterkonzept ergänzt. Im Zusammenspiel von Radbeobachtern auf der unteren Hierarchieebene und einem darüber liegenden Fahrzeugbeobachter werden alle relevanten Fahrzeugzustände sowie Schätzungen für den Reifenschlupf, den Kraftschlussbeiwert μ etc. ermittelt und den Reglern zur Verfügung gestellt. Sowohl auf Rad- als auch auf Fahrzeug-Ebene werden alle Ergebnisse auf ihre Funktion überprüft und entweder an einem Radprüfstand, dem Antriebsstrangprüfstand oder im Fahrversuch getestet, so dass alle entwickelten Komponenten in geprüfter Form im Versuchsträger zur Verfügung stehen und dort für übergeordnete Gesamtsystemtests verwendet werden können.

Darüber hinaus sind für einen thermischen Range Extender, integrierte Antriebslösungen notwendig. Der von VW zur Verfügung gestellte Dieselmotor wird um einen Generator erweitert und in Betrieb genommen.

Methoden

Um die angestrebten Ziele zu erreichen werden Methoden der Modellierung mechatronischer Systeme, des modellgestützten Regler- und Beobachterentwurfs, der Parameteridentifikation ergänzt um Prüfstands- und Fahrversuche genutzt. Die Modellierung überdeckt mehrere Detaillierungsebenen, so dass sie sowohl die simulative Verifikation der Ergebnisse als auch die Echtzeitimplementierung von Beobachtern und Reglern unterstützt. Das angestrebte hierarchische Regelkonzept wird in einer Subsystemtechnik zunächst dezentral entworfen und anschließend in einem Gesamtoptimierungsschritt zusammengeführt und am Gesamtsystem simulativ und experimentell getestet.

E Elektromobilität & E-Fahrzeug

Der erfolgreiche Weg in die Elektromobilität führt über eine Gesamtbetrachtung und Neubewertung des Systems Fahrzeug [19,20,21]. Mit dem Antriebsstrang und dem Range Extender wurden bereits wesentliche Innovationstreiber adressiert, ihr Zusammenspiel untereinander sowie das Zusammenspiel mit weiteren wichtigen Komponenten wie dem Fahrwerk sowie die Berücksichtigung einzuhaltender Einbau- und Betriebsrandbedingungen stellen genauso unabdingbare Erfolgsvoraussetzungen dar, die in diesem Forschungsvorhaben untersucht werden sollen. Als Systemgrenze wird das Fahrzeug im dynamischen Fahrbetrieb gesehen. Wechselwirkungen mehrerer Fahrzeuge in komplexen Verkehrsszenarien sowie die Interaktion des Fahrzeugs mit der erforderlichen Lade- bzw. Tank-Infrastruktur werden nicht berücksichtigt.

Der Projektbereich E - Elektromobilität & E-Fahrzeug - beinhaltet sowohl die virtuelle als auch die reale Entwicklung von Komponenten und Funktionen eines zukünftigen E-Fahrzeugs sowie deren Integration, Funktionsoptimierung und Test in einem realen Versuchsfahrzeug. Im Projekt COMO II sollen die in COMO I entstandenen Methoden, Werkzeuge und Verfahren für den Entwurf, die Simulation und Optimierung eines Gesamtfahrzeugs weiterentwickelt, angewendet und in Verbindung mit den Versuchsständen des IKAM parametrisiert und verifiziert werden. Damit wird die analysierende Vorgehensweise durch eine synthetisierende Vorgehensweise im Sinne des bekannten V-Modells der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (VDI 2206) ergänzt.

Das zu entwickelnde E-Fahrzeug wird eine Konfiguration als ein mit 4 Radnabenmotoren angetriebenes Elektrofahrzeug mit Li-Ion-Batterie und Range Extender besitzen. Die Teilprojekte umfassen die virtuelle und reale Versuchsfahrzeugentwicklung als inhaltliche und zeitliche Klammer, in welche Entwicklungen zum Energiemanagement sowie zum adaptiven Fahrwerk als wichtige Komponenten in Form eigener Teilprojekte eingehen. Weiterhin fließen Ergebnisse aus den Projektbereichen Antriebsstrang und Range Extender direkt in die Entwicklung des Versuchsfahrzeugs ein.

Um die angestrebten Ziele zu erreichen werden Methoden der Modellierung mechatronischer Systeme, des modellgestützten Regler- und Beobachterentwurfs, der Parameteridentifikation ergänzt um Prüfstands- und Fahrversuche genutzt. Die Modellierung überdeckt mehrere Detaillierungsebenen, so dass sie sowohl die simulative Verifikation der Ergebnisse als auch die Echtzeitimplementierung von Beobachtern und Reglern unterstützt. Das angestrebte hierarchische Regelkonzept wird in einer Subsystemtechnik zunächst dezentral entworfen und anschließend in einem Gesamtoptimierungsschritt zusammengeführt und am Gesamtsystem simulativ und experimentell getestet.

E1 – Virtuelles E-Fahrzeug/Entwicklungsmethodik

1. Antragsteller

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
Schmucker	Ulrich	Prof. Dr. sc. techn.	Institut für Mobile Systeme und Fraunhofer Institut IFF
Kasper	Roland	Prof. Dr.-Ing.	Institut für Mobile Systeme
Gabbert	Ulrich	Prof. Dr.-Ing. habil.	Institut für Mechanik

2. Ausgangssituation, Zielsetzung

Im Projekt COMO I wurden im Projektbereich C – Virtual Engineering – Methoden und Werkzeuge zur automatisierten Modellbildung und durchgängigen Simulation mechatronischer Systeme sowie Verfahren zur VR-basierten Darstellung von Simulationsergebnissen entwickelt. Diese wurden punktuell auf ausgewählte Komponenten der Projektbereiche A und B angewendet und erprobt [1].

Im Projekt COMO II sollen die entstandenen Methoden, Werkzeuge und Verfahren folgerichtig für den Entwurf, die Simulation und Optimierung eines Gesamtfahrzeugs weiterentwickelt, angewendet und in Verbindung mit den Versuchsständen des IKAM parametrisiert und verifiziert werden. Damit wird die analysierende Vorgehensweise durch eine synthetisierende Vorgehensweise im Sinne des bekannten V-Modells des mechatronischen Entwicklungsprozesses ergänzt.

Im Projekt COMO II sollen die entstandenen Methoden und Verfahren des virtuellen Engineerings für den Entwurf, die Simulation und Optimierung eines Gesamtfahrzeugs in der Art weiterentwickelt werden, dass ein vollständiger Entwurf nach dem V-Modell der mechatronischen Entwicklung (VDI 2206) in einer virtuellen Welt und anschließender Umsetzung und Verifizierung in der realen Welt ermöglicht wird. Neben den erforderlichen methodischen Weiterentwicklungen zur multiphysikalischen Simulation auf analytischer, numerischer und hybrider Ebene wird diese Vorgehensweise am Entwurf der in den TP E2 – E4 zu entwickelnden E-Fahrzeugelemente erprobt. Zusätzlich werden die Verfahren aus COMO I zur Nutzung von VR-Techniken zur gemeinsamen Darstellung von Simulationsergebnissen aus verschiedenen Quellen sowie zur Interaktion mit den Modellen genutzt und weiterentwickelt.

Die F&E-Schwerpunkte des Teilprojekts E1 unterteilen sich in methodische (AP1... AP3) und angewandte (AP4 ... AP7) Arbeitspakete. Dabei dienen die methodischen Arbeitspakete der Weiterentwicklung der Methoden des durchgängigen virtuellen Entwurfs um die zur Bearbeitung der angewandten Fragestellungen erforderlichen Arbeiten. Die angewandten Arbeitspakete orientieren sich strikt an den gestellten Aufgaben zur Entwicklung der physischen Fahrzeugelemente aus E2 – E4 (Versuchsträger und Fahrversuche, Dynamisches, modellbasiertes

Energiemanagement, Adaptives Fahrwerk für radnabengetriebenen Elektrofahrzeuge) sowie A3 (Fahrtrieb und Fahrmanagement).

3. Stand der Forschung / Eigene Vorarbeiten

Stand der Forschung

Methoden und Werkzeuge des Digitalen Engineerings ermöglichen den Aufbau einer durchgängigen digitalen Beschreibung, Modellierung, Simulation und Optimierung über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts – vom Entwurf über die Produktentwicklung, den Produktionsprozess bis hin zur Nutzung des Produkts. An der Durchgängigkeit als dem entscheidenden Attribut wird zwar vielerorts gearbeitet, doch beschränkt sich diese heute selbst in dem im vorliegenden Projekt betrachteten Teilbereich der Produktentwicklung allenfalls auf geometrische Merkmale. Es fehlen nach wie vor Standards zur funktionalen Beschreibung. VR-Techniken werden praktisch nur zur geometrischen Repräsentation verwendet. Automatische Modellbildungsverfahren wurden für die Steuerungstechnik entwickelt, automatisierte multiphysikalische Modellierungen sind –außer den eigenen Arbeiten – kaum bekannt.

Ein in diesem Jahr beginnendes Projekt des DFG Research Centers Matheon [2] will sich dieser Problematik durch neue Ansätze widmen, jedoch sind verwertbare Ergebnisse nicht vor 2015 zu erwarten

Auf dem Gebiet der multiphysikalischen Simulation hat sich der objektorientierte Ansatz durchgesetzt. Es steht eine Reihe von leistungsfähigen Werkzeugen mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen sowie Objektbibliotheken zur Verfügung, die für F&E-Arbeiten genutzt und weiterentwickelt werden können und welche in unterschiedlichem Maße auch in COMO II verwendet werden. (z.B. Modelica/Dymola, Matlab/Simulink, Simplorer, MapleSim etc.)

Eigene Vorarbeiten

Das Fraunhofer IFF arbeitet seit ca. 4 Jahren gemeinsam mit der OvGU intensiv an der Problematik der Modellierung und Simulation multiphysikalischer Prozesse, insbesondere für mechatronische Systeme. Schwerpunkte der Arbeiten sind die Schaffung von durchgängigen Prozessketten, z.B. durch automatische Modellgenerierung, Wiederverwendbarkeit der Modelle, Echtzeitfähigkeit der Simulationen, hybride Simulationen (z.B. Kopplung Modelica-ANSYS) sowie verteilte Simulationen. Einschlägige Forschungsprojekte waren bzw. sind COMO I, VierforES (wird fortgesetzt), sowie BMBF- und Landesprojekte (VEMOS, ERMA, COSOP,...). Daneben wurden die Forschungsergebnisse bereits in zahlreichen Industrieprojekten erfolgreich eingesetzt [3–6].

Ein für das beantragte Projekt besonders wichtiges Ergebnis ist das vom Fraunhofer IFF entwickelte Realtime-Interface (RTI), das eine Echtzeit-Kopplung von heterogenen Simulatoren, unterschiedlichen Datenquellen sowie eine verteilte Simulation ermöglicht [7]. Das RTI wird im beantragten Projekt benutzt und erforderlichenfalls weiterentwickelt, um Simulationsmodelle der anderen Teilprojekte in eine Gesamtfahrzeugsimulation einzubinden.

4. Planung des Teilprojekts

Beschreibung

Die Arbeiten zum Teilprojekt E1 werden in folgende Arbeitspakete unterteilt, die im Anhang näher beschrieben werden:

AP	Bezeichnung	Bearbeiter
1	Automatische Modellbildung und Simulation elastischer Strukturen	Schmucker, Kasper
2	Verfahren der hybriden Modellierung und Simulation (numerische und analytische Verfahren)	Schmucker, Gabbert
3	Echtzeitfähige Gesamtfahrzeugmodelle	Schmucker
4	Elektromechanische Modellierung: Komponenten und E-Versuchsfahrzeug	Schmucker, Kasper
5	Fahrdynamik, Stabilität und Fahrzeugregelung	Kasper
6	Energiebilanzen	Schmucker, Kasper
7	Tests E-Versuchsfahrzeug, Vergleich mit Simulation	Schmucker, Kasper,

Als zukünftiges Gesamtfahrzeug wird ein im Projektverlauf sowohl virtuell als auch physisch zu entwickelndes E-Versuchsfahrzeug betrachtet, das eine Konfiguration als ein mit 4 Radnabenmotoren angetriebenes Elektrofahrzeug mit Li-Ion-Batterie und Range Extender besitzen wird. Folgende Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte werden dabei vorrangig betrachtet:

- Entwicklung mechatronischer Gesamtmodelle des Versuchsfahrzeugs und seiner Komponenten, inkl. elastischer und schwingender Strukturen und ganzheitliche Analyse in der virtuellen Realität (VR)
- Untersuchungen und Optimierungen zur Echtzeitfähigkeit der Modelle
- Parametrierung und Verifizierung von Teilmodellen an den Versuchsständen
- Untersuchungen zur Fahrdynamik und Fahrzeugregelung
- Untersuchungen zur Gesamtenergiebilanz des Modulträgers unter Einbeziehung des Range Extenders

Methodik

Die Bearbeitung dieser Aufgaben erfolgt in enger Verzahnung mit den korrespondierenden Themen in den anderen Teilprojekten. Dabei umfassen alle Entwicklungen und Untersuchungen sowohl die virtuelle und physischen Realisierungen als auch die Kopplung beider Welten in HIL-Versuchsaufbauten, um einerseits notwendige Modellinformationen experimentell zu gewinnen und andererseits den Nachweis zu erbringen, dass mit der Vorgehensweise eines „Hinüberwachsens“ von virtuellen zu physischen Realisierungen komplexe Gesamtsysteme in Fahrzeugbereich schnell und abgesichert entwickelt werden können.

E2 – Versuchsträger und Fahrversuche

1. Antragsteller

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
Kasper	Roland	Prof. Dr.-Ing.	Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl Mechatronik
N.N.			Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl Mobile Antriebssysteme
N.N.			Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl Energiewandlungssysteme in Kooperation mit dem Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik

2. Ausgangssituation, Zielsetzung

In der vergangenen Förderperiode wurden wichtige Technologien und Komponenten für zukünftige Fahrzeuge sowohl im Bereich Energiewandlung als auch im Sicherheits- und Komfortbereich entwickelt [1]. Aufbauend auf diesem bereits sehr guten Stand wird in der aktuellen Förderperiode der Fokus auf den Antriebsstrang einzelradgetriebener Elektrofahrzeuge sowie auf Gesamtfahrzeugkonzepte gerichtet sein. Um die Funktion einzelner Komponenten wie dem Range Extender oder Energie- und Fahrmanagementsystemen nicht nur am Komponentenprüfstand oder in der Simulation zu testen, ist ein Versuchsträger erforderlich, mit dem Versuche am Gesamtfahrzeug sowohl auf einem Antriebsstrangprüfstand als auch auf verschiedenen Teststrecken durchgeführt werden können. Nur mit einem Funktionsnachweis im Gesamtsystem unter realistischen Testbedingungen lassen sich belastbare Aussagen sowohl zu den Komponenten als auch zu den System- und Managementkonzepten treffen. Die Elektromobilität wird nur dann eine breite Akzeptanz finden, wenn die von ihr genutzten Komponenten und Systeme dem von den Kunden akzeptierten Qualitäts-, Kosten- und Sicherheitsstandard entsprechen. Ziel des Teilprojekts ist es durch Bereitstellung geeigneter Versuchsträger und Prüfumgebungen diese Nachweise experimentell unter realen Randbedingungen zu führen.

3. Stand der Forschung / Eigene Vorarbeiten

Stand der Forschung

Versuchsträger für einzelradgetriebene Elektrofahrzeuge finden an verschiedenen Stellen der wissenschaftlichen und der wirtschaftlichen Forschung und Entwicklung Verwendung, um die Funktionsfähigkeit oder andere technische oder wirtschaftliche Merkmale dieses Antriebskonzepts zu untersuchen. Aus Funktions- und aus Kostengründen bieten diese Versuchsfahrzeuge jedoch keine offene Konstruktions- oder Elektronikplattform, die eine einfache Anpassung an spezielle Anforderungen oder auch nur den Zugriff auf wichtige Informationen und Sensordaten ermöglicht. An verschiedensten Stellen wurden deshalb im Rahmen von Forschungsverbänden auf die speziellen Anforderungen zugeschnittene Versuchsfahrzeuge ge-

schaffen [2, 3, 4], die allerdings nicht frei zugänglich sind und immer auf die speziellen Anforderungen des jeweiligen Vorhabens ausgerichtet sind. Um exklusive Forschungsergebnisse des Forschungsschwerpunkts Automotive in realistischen Versuchsszenarien experimentell verifizieren zu können, wird ein geeigneter Versuchsträger zur Durchführung von Fahrversuchen als unabdingbar angesehen.

Eigene Vorarbeiten

Im vergangenen Förderzeitraum (COMO I) wurde ein einzelradgetriebenes Elektrofahrzeug mit vier Radnabenmotoren auf Basis eines ursprünglich verbrennungsmotorisch angetriebenen Buggy aufgebaut [5, 6]. Der offene Stahlrohrrahmen des Buggy erleichterte den Umbau wesentlich, da er den Austausch des Verbrennungsmotors gegen eine leistungsfähige Batterie sehr leicht ermöglichte, darüber hinaus viel Bauraum für zusätzliche Supercaps, Motorcontroller etc. bot und außerdem die Verkabelung der Komponenten wesentlich erleichterte. Der E-Buggy ist fahrbereit und wurde bereits für erste Versuchsfahrten genutzt. Ein Fahrdynamikmesssystem kann zur Aufzeichnung aller Fahrdynamikdaten (Absolutposition, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen im Raum sowie diverse Zusatzmessungen) bis zu einer ½ Stunde Fahrversuch genutzt werden. Parallel zur konstruktiven Umrüstung des Buggy wurden verschiedene Fahrzeugmodelle unterschiedlicher Komplexität entwickelt und zur Auslegung von Fahrzeugbeobachtern sowie einer neuartigen Fahrdynamikregelung benutzt, die speziell auf die Belange einzelradgetriebener Elektrofahrzeuge zugeschnitten ist [4]. Die gesamte Elektronik und Sensorik für die Fahr- und Fahrdynamikregelung sowie die Motorcontroller wurden über CAN-Busse offengelegt, so dass sowohl über eine DSPACE Prototyping Hardware als auch über eine spezielle SOC Rechnerarchitektur verschiedenste Steuerungs- und Regelungskonzepte implementiert und in Versuchsfahrten getestet werden können.

Die Grenzen des Versuchsfahrzeugs liegen momentan in der Leistung der verbauten Radnabenmotoren, die mit insgesamt 24 KW dem untersten Motorisierungsstand des ursprünglichen Verbrennungsmotors entsprechen. Eine weitere Besonderheit ist das vom Hersteller bewusst stark ausgeprägte übersteuernde Verhalten des Versuchsfahrzeugs, was sich aufgrund der konstruktiven Rahmenbedingungen nicht deutlich ändern lässt und damit nur einen bestimmten sportlichen Fahrzeugtyp repräsentiert. Aus Platz und Gewichtsgründen ist es nicht möglich einen Range Extender zusätzlich unterzubringen. Schließlich fallen durch die Stahlrohrkonstruktion die akustischen Eigenschaften des Versuchsfahrzeugs im Vergleich zu einem üblichen Fahrzeug mit selbsttragender Kunststoff-, Aluminium oder Stahlkarosserie deutlich anders aus.

4. Planung des Teilprojekts

Beschreibung

Aufbauend auf dem vorhandenen Versuchsträger soll zunächst eine kontinuierliche Weiterentwicklung vollzogen werden, um das Fahrzeug bereits in einer sehr frühen Phase für Tests z.B. im Bereich des Energie- und Fahrmanagements, der Fahrdynamikregelung oder des adaptiven Fahrwerks verwenden zu können, da auf diesen Gebieten bereits interessante und

verwendbare Vorarbeiten bestehen. Um die Testmöglichkeiten weiter auszubauen wird in dieser ersten Phase die Leistung der Radnabenmotoren und der Motoransteuerung erhöht, um einen Bereich bis 48 KW abzudecken, was der größten Motorisierung des ursprünglichen Verbrennungsmotors entspricht. Mit dieser Ausbaustufe lassen sich dynamisch anspruchsvolle Fahrversuche im Bereich des Energiemanagements und der Fahrdynamik unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Längs-, Quer- und Vertikaldynamik mit realistischem Reifen-Straßen-Kontakt durchführen. Mit Fertigstellung des 4WD-Antriebsstrangprüfstands sollen zusätzlich zu den Fahrversuchen auf den Teststrecken Prüfläufe zur speziellen Untersuchung der Längsdynamik z.B. für sehr genaue Untersuchungen des Beschleunigungs-, Brems- und Rekuperationsverhaltens oder zur Bestimmung des Gesamtverbrauchs unter dynamischer Last über längere Zeit hinzukommen.

Zur Aufnahme eines Range Extenders sowie zur Durchführung realistischer akustischer Untersuchungen wird für eine zweite Phase ein zweiter Versuchsträger konzipiert und gebaut oder, wenn möglich, von einem OEM übernommen und umgebaut. Neben den bereits beim ersten Versuchsträger vorhandenen Herausforderungen kommen hierbei noch Aufgaben des Thermomanagement für den Range Extender sowie dessen schwingungstechnische und akustische Einbettung ins Fahrzeug hinzu. Bei Auswahl eines konventionellen Fahrzeugs mit selbsttragender Metall- oder Kunststoffkarosserie müssen bei allen Umbauten Tragfähigkeits- und Bauraumfragen besonders berücksichtigt werden. Der zweite Versuchsträger ermöglicht die Durchführung aller oben genannten Experimente sowohl am Antriebsstrangprüfstand als auch auf den Teststrecken nun unter Einbeziehung eines Range Extenders sowie der Akustik.

Die konstruktiven Arbeiten zur Weiterentwicklung des von VW zur Verfügung gestellten Dieselmotors zu einem RE werden hier durchgeführt. In Zusammenarbeit mit A3, wo die elektrische Seite (Generatorauswahl, Generatorregelung) bearbeitet und R3, wo die dynamische Simulation des RE (Elastisches Mehrkörpermotor- und Generatormodell) durchgeführt wird, wird der Basismotor um den Generator erweitert und in Betrieb genommen.

Methoden

Für die Konzeption, Auslegung und Konstruktion der Versuchsträger wird eng mit E1 kooperiert und auf die dort geschaffenen CAD-, Simulations- und Berechnungsmodelle zurückgegriffen. Vor dem Bau des zweiten Versuchsträgers soll dessen Funktion anhand eines kompletten virtuellen Fahrzeugmodells nachgewiesen und werden, um auf diese Weise Entwicklungsaufwand und Entwicklungsrisiko zu minimieren.

E3 – Dynamisches, modellbasiertes Energiemanagement

1. Antragsteller/ Fachgebiete

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
Findeisen	Rolf	Prof. Dr.-Ing.	Institut für Automatisierungstechnik – Lehrstuhl Systemtheorie und Regelungstechnik
Kienle	Achim	Prof. Dr.-Ing.	Institut für Automatisierungstechnik – Lehrstuhl Automatisierungstechnik / Modellbildung und Max-Planck-Institut Magdeburg
Jumar	Ulrich	Prof. Dr.-Ing.	An-Institut für Kommunikation und Automation ifak

2. Ausgangssituation, Zielsetzung

Der strukturierte Entwurf und die Auslegung des Energiemanagementsystems und der Systemkomponenten von Hybridfahrzeugen sind komplex. Für eine maximale Energieeffizienz unter Berücksichtigung der Produktionskosten sowie den zuverlässigen Betrieb ist es notwendig, alle wesentlichen Komponenten und deren dynamischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Hierbei spielt das Zusammenspiel zwischen den Verbrauchern (Elektromotor(en), Zuheizung), dem Range Extender, dem Batteriesystem, dem Ladesystem, sowie weiteren Verbrauchern eine wesentliche Rolle. Die optimale Auswahl der Systemkomponenten sowie deren optimales Zusammenspiel im Fahrbetrieb und bei der Ladung spielen eine wesentliche Rolle für die Energieeffizienz und den wirtschaftlichen Erfolg.

Ziel dieses Teilprojektes ist es zum einen, basierend auf dynamischen Modellen sowie geeigneten Gütekriterien unter Berücksichtigung typischer Last-, Lade- und Nutzungszyklen Strategien zur optimierungsbasierten Auswahl und Dimensionierung der einzelnen Systemkomponenten zu erarbeiten. Neben den elektrischen Verbrauchern, Erzeugern und Speichern, sollen auch thermische Gesichtspunkte (ausreichende, effiziente Kühlung oder Heizung) Berücksichtigung finden. Zum anderen sollen neue Koordinations- und Regelungsmethoden entwickelt werden, die zu jedem Zeitpunkt on-line, d.h. im Fahrzeug, ein optimales Zusammenspiel der Systemkomponenten, sowohl im Sinne des Fahrbetriebs, als auch der Aufladung der Energiespeicher sicherstellen. Die entwickelten Methoden sollen exemplarisch am Versuchsfahrzeug implementierbar sein.

Die im Rahmen der dynamischen Auslegung der Systemkomponenten, sowie des dynamischen Betriebs / der Regelung verfolgten Ziele sind hierbei:

- hohe energetische Effizienz und möglichst geringer Verbrauch insbesondere fossiler Brennstoffe, aber auch der elektrischen Leistung.

- Reduktion der Degradation der Systemkomponenten, insbesondere des Verbrennungsmotor, der Brennstoffzelle, des Batteriesystems sowie des elektrischen Antriebs bzw. Berücksichtigung der Degradation im Sinne eines schonenden Betriebs.
- garantierte Reichweite und Fahrkomfort für typische Leistungsprofile und Ladeprofile.
- Zuverlässigkeit im Sinne der Bereitstellung einer ausreichenden Leistung.
- hohe Wirtschaftlichkeit in Bezug auf Produktions-, Wartungs- und Verbrauchskosten.

Die Optimierung der Leistungsflüsse im Energiebordnetz erfordert die Modellierung des Gesamtsystems mit Berücksichtigung der Wechselwirkungen der Komponenten untereinander. Neben dem Batteriesystem, dem Verbrennungsmotor bzw. der Brennstoffzelle und dem Motor müssen noch weitere Verbraucher wie z.B. Zuheizter einbezogen werden.

3. Stand der Forschung / Eigene Vorarbeiten

Stand der Forschung

Es fließen in das Projekt Daten aus der „Angewandten Verkehrsforschung“ in Sachsen-Anhalt, sowie des MobilitätsDatenMarktplatzes (MDM) ein.

Eigene Vorarbeiten

Es kann auf umfangreiche Vorarbeiten der Arbeitsgruppen zurückgegriffen werden: der optimalen dynamischen Entwurf und die Analyse von Prozesssystemen [1,2], den optimalen Entwurf von Regelsystemen [3,7,11], das optimale Energiemanagement für Produktionsanlagen [4,5], den optimierungsbasierten Betrieb von Batterien [13], sowie die Entwicklung optimierungsbasierter prädiktiver Regelungsmethoden [7,8,10] und deren effiziente und zuverlässige Echtzeitumsetzung im KFZ-Bereich [6,9], sowie der Untersuchung und Bereitstellung von Verkehrsdaten [12].

4. Planung des Teilprojekts

Beschreibung

Für die dynamische Dimensionierung der Systemkomponenten sollen typische Leistungsprofile genutzt werden, um optimale und zuverlässige Leistungsflüsse im Energiebordnetz sicherzustellen (off-line). Dies soll in enger Abstimmung mit den Teilprojekten Brennstoffzellen, Range Extender, Fahrtrieb, Batterie, Virtuelles E-Fahrzeug, E-Versuchs-Fahrzeug, unter Verwendung dynamischer Modelle geschehen. Neben geeigneten Modellen liefern die beteiligten Teilprojekte Grenzen für die Lastwechsel, die von der Brennstoffzellenregelung oder dem Verbrennungsmotor sowie dem Batteriesystem und dem Antrieb in Kombination noch realisierbar sind. Umgekehrt definieren die Ergebnisse der Optimierung in diesem Teilprojekt Anforderungsprofile und Entwicklungsvarianten für die anderen Teilprojekte, insbesondere für die Brennstoffzellenregelung, das Batteriesystem, sowie den Verbrennungsmotor. Im Einzelnen sind die folgenden Arbeitsschritte vorgesehen:

- Wahl eines geeigneten Gütefunktional, welches unter Anderem das Gewicht, den Platzbedarf, die Herstellungskosten und die Lebensdauer der Komponenten, sowie die Effizienz, den Bedarf an fossilem Brennstoff etc. beinhaltet.
- Ermittlung geeigneter, reduzierter dynamischer Modelle.
- Optimierung der Systemstruktur und Dimensionierung der verbauten Komponenten mit Hilfe dynamischer Optimierungsverfahren.
- Bestimmung von Grenzwerten und Anforderungsprofilen der Systemkomponenten.

Es sollen strukturierte Methoden zum dynamischen Betrieb- und zur Regelung der Energieflüsse in Echtzeit erarbeitet werden (on-line). Zur Einhaltung von Grenzwerten sowie der Optimierung der Energieeffizienz (elektrisch und thermisch) und der Lebensdauer ist neben einer dynamischen off-line Auswahl und Auslegung geeigneter Komponenten eine on-line Regelung unabdingbar. Diese muss dafür sorgen, dass alle Rahmenbedingungen/Grenzwerte, sowie eine maximale Energieeffizienz und ein hinreichend guter Fahrkomfort zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden kann. Hierzu sollen optimierungsbasierte Regelungsmethoden zum Einsatz kommen. Diese sollen zukünftigen Szenarien, wie zum Beispiel mögliche Bremsmanöver, die zu einer Rekuperation von Bremsenergie führen, im Sinne einer Prädiktion berücksichtigen. Hierbei muss stets ein ausreichender Korridor an Leistung durch die Energieerzeuger und Energiespeicher zur Verfügung stehen, um einen hinreichenden Fahrkomfort unter allen zukünftigen Szenarien sicherzustellen.

Hierbei wird ein hierarchisches Prozessführungskonzept verfolgt. Das Energiemanagementsystem liefert optimiert, aktuelle Leistungsprofile sowie einen Korridor an möglichen dynamischen Anforderungen an die Energieerzeuger (Brennstoffzelleregelung, Verbrennungsmotor) sowie das Batteriesystem. Diese müssen die Bereitstellung der Leistung unter Berücksichtigung ihrer eigenen Beschränkungen sicherstellen und stellen im Gegenzug mögliche zukünftige Leistungskorridore an das Energiemanagementsystem. Im Einzelnen sind die folgenden Arbeitsschritte vorgesehen:

- Wahl eines geeigneten on-line Gütefunktional sowie der Grenzwerte für die Systemkomponenten. Hierbei sollen insbesondere der Energieverbrauch, die Degradation der Komponenten, einfließen.
- Ermittlung geeigneter, reduzierter dynamischer Modelle.
- Entwicklung geeigneter, echtzeitfähiger, optimierungsbasierter Regelungsverfahren, welche es erlauben, Szenarienbäume (Bremsen, Beschleunigen, ...), sowie mögliche zukünftige Leistungskorridore der Komponenten direkt zu berücksichtigen.

E4 – Adaptives Fahrwerk für radnabengetriebene Elektrofahrzeuge

1. Antragsteller:

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
Kasper	Roland	Prof. Dr.-Ing.	Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl Mechatronik
Schmidt	Bertram	Prof. Dr. rer. nat.	Institut für Mikro- und Sensorsysteme Lehrstuhl Mikrosystemtechnik

2. Ausgangssituation, Zielsetzung

Zukünftige Elektrofahrzeuge werden wesentlich leichter gebaut sein, um durch eine Reduktion der bewegten Fahrzeugmasse Energie einzusparen und so ihre Reichweite zu erhöhen [1]. Die Reduktion der Aufbaumasse erfordert neue Fahrwerkkonzepte, um akzeptierte Komfort- und Sicherheitsstandards zu erfüllen. Kommen Radnabenmotoren zum Einsatz, steigen die ungefederten Radmassen an, was zusätzliche Herausforderungen an das Fahrwerk bedingt. Da sich Elektrofahrzeuge auf einem sehr niedrigen Geräuschniveau bewegen, muss die Übertragung der Abroll- und Reifengeräusche über das Fahrwerk in die Karosserie unterbunden werden. Aufbauend auf einem in der vorigen Projektphase (COMO I) entwickelten Gas-Feder-Dämpfer-System (GFDS), das durch eine schnelle Adaption der Feder-Dämpfer-Charakteristik die eingangs genannten Forderungen erfüllen kann und durch eine vollständige Integration der Verstelllemente verbunden mit einer großserientauglichen Fertigung wichtige Bauraum- und Kostenkriterien einhalten kann, soll ein neuartiges adaptives Fahrwerk konzipiert und prototypisch dargestellt werden. Neben der Vertikaldynamik, welche direkt durch das GFDS beeinflusst werden kann, steht die Kontrolle der Nick- und Wankbewegungen eines Gesamtfahrzeugs im Fokus. Neben semiaktiven Lösungen durch Nutzung der versteifenden Wirkung des GFDS, schaltbarer Zusatzvolumina etc., sollen auch energiesparende aktive Lösungen untersucht werden, welche weitere Freiheitsgrade, wie eine dynamische Schwerpunktverlagerung bzw. eine dynamische Verteilung der Radlasten, erschließen. Zur Überprüfung der Funktionstauglichkeit der entwickelten Fahrwerkskonzepte werden alle Komponenten prototypisch gebaut, in ein Demonstratorfahrzeug integriert und im Versuch getestet.

3. Stand der Forschung / Eigene Vorarbeiten

Stand der Forschung

Aufgrund ihrer hervorragenden Komfort- und Akustikeigenschaften hat sich die Luftfeder in der Fahrzeugoberklasse fest etabliert [2]. Die Kombination mit adaptiv verstellbaren Dämpfern, wie z.B. dem magneto-rheologischen Dämpfer von Delphi, erlaubt eine weitere Verbesserung der Fahreigenschaften. Um den hohen Platzbedarf von Luftfeder und separatem Dämpfer zu vermeiden, wurde von Continental ein integrierter Luftfeder-Dämpfer mit manueller Verstellung auf den Markt gebracht und in einem BMW-Motorrad eingesetzt [3,4]. Neue

Fahrwerk- und Antriebskonzepte führen den Modul- und Integrationsgedanken weiter, indem möglichst alle Elemente wie Antrieb, Bremsen und Feder-Dämpfersystem direkt am oder in das Rad integriert werden. Beim Michelin Active Wheel können Feder und separater Dämpfer in engen Grenzen elektrisch verstellt und werden. Das Continental E-Corner System, das Luftfedern einsetzt, existiert bislang nur als Konzept. Diese Entwicklungen machen deutlich, dass die Elektromobilität neue Lösungen für das Fahrwerk benötigt [5]. Die Luftfeder bietet sich als zukünftige Plattform an, welche die steigenden Anforderungen an Fahrkomfort und Fahrsicherheit bei besten akustischen Eigenschaften erfüllen kann und darüber hinaus eine Adaption zur Sicherstellung der günstigen Eigenschaften für alle Fahrzustände und Fahrmanöver bietet.

Eigene Vorarbeiten

In den vergangenen Jahren wurde von den Antragstellern ein GFDS entwickelt, das durch Einsatz einer integrierten Piezodrossel eine sehr schnelle Verstellung der Feder-Dämpfer-Charakteristik im Frequenzbereich bis 50 Hz bei einem maximalen Energiebedarf $<1\text{W}$ ermöglicht [6–9]. Trotz der sehr hohen Volumenströme kann das gesamte Verstellsystem sehr platzsparend zwischen den beiden Luftbälgen des GFDS untergebracht werden. Für den Betrieb des GFDS wurde eine Kraftregelung entwickelt, die es erlaubt die Feder-Dämpfer-Kräfte, basierend auf einem nichtlinearen Modell des GFDS und Messungen der Kammerdrücke über weite Bereiche schnell zu stellen, obwohl das semiaktive System nur die im GFDS gespeicherte Energie nutzt [10–12]. Diese Kraftregelung bildet die ideale Basis für ein adaptives Fahrwerkkonzept, da dadurch die Schnittstelle zwischen Fahrzeug(-modell) und Fahrwerk(-modell) sehr einfach darstellbar ist. Zur Auslegung und Herstellung des piezoelektrisch betriebenen Drosselsystems wurde ein Spritzgussverfahren entwickelt, welches die Integration von Piezokeramiken, Metallen und Kunststoffen in einem Bauteil ermöglicht [13–15].

4. Planung des Teilprojekts

Beschreibung

Ausgehend von vorhandenen GFDS, wird ein Basisfahrwerk mit je einem GFDS pro Rad konzipiert und ausgelegt. Hierzu wird der begonnene Integrationsprozess des GFDS fortgeführt, um neben der Piezodrossel alle für den Betrieb erforderlichen Komponenten, wie elektrische Ansteuerung, Drucksensorik, Sensorauswertung und Regler im GFDS unterzubringen. Hierfür soll die MID-Technik zum Einsatz kommen, welche eine Integration von dreidimensionalen Schaltungsträgern, Gehäuse und Fine-Pitch-Anwendung ermöglicht. In der Summe entsteht ein Subsystem, welches über eine kombinierte Energie- und Datenschnittstelle steuerbar, lokal alle erforderlichen Funktionen, wie Kraftregelung, Diagnose, Fail-Safe, Druckmessung, etc. realisiert. Ein zentraler Koordinator steuert die radbezogenen Subsysteme entsprechend den Erfordernissen des Gesamtfahrzeugs über ein geeignetes Netzwerk.

In einem ersten Schritt werden passive Quer- und Längsstabilisatoren beibehalten. Lediglich ihre Funktion wird durch eine Anpassung der Feder- und Dämpferhärte unterstützt, um das Fahrverhalten in Kurven, bei dynamischen Lenkwechseln sowie in Beschleunigungs- und

Bremsphasen zu verbessern. Da keine Energiezufuhr stattfindet, besitzt dieser Lösungsansatz naturgemäß Grenzen, die sich z.B. bei längeren Kurvenfahrten bemerkbar machen. Allerdings werden bei diesem Ansatz neben dem GFDS keine weiteren Elemente benötigt wodurch Kosten und Energieverbrauch nicht ansteigen.

Um diese Grenzen zu verschieben werden in einem zweiten Schritt aktive Lösungen eingesetzt, die allerdings strenge Kriterien der Energieeffizienz erfüllen müssen. Im Fokus stehen hier geschlossene Luftsysteme, die entweder aktiv betrieben über Kolben oder Bälge oder passiv über schaltbare pneumatische Gegenkopplungen Kräfte in das Fahrwerk einspeisen und die problemlos an die bestehenden GFDS angebunden werden können. Diese Systeme stellen eine Erweiterung der vorhandenen langsamen Niveauregulierung dar und sollen durch Nutzung geeigneter Integrationstechniken möglichst gut in die vorhandenen Baugruppen integriert werden. Ein Kosten-Nutzen-Vergleich der erweiterten Möglichkeiten aktiver und semi-aktiver Nick- und Wankstabilisierung mit den zuvor entwickelten passiven Lösungen ist ein wichtiges Resultat dieser Untersuchungen.

Unter Nutzung modellbasierter Optimierungsverfahren wird eine Fahrwerkauslegung für ein Elektrofahrzeug mit Radnabenmotoren durchgeführt. Alle erforderlichen Komponenten inklusive der GFDS werden entworfen, gefertigt, nach Einzeltest integriert und in das Versuchsfahrzeug eingebaut. Die verschiedenen Stufen der Fahrwerkregelung werden entworfen und implementiert, so dass ein komplett funktionsfähiges System zur Verfügung steht mit dem sowohl das Basisfahrwerk als auch die erweiterten Nick- und Wankstabilisierungen im Fahrversuch überprüft werden können. Neben dem Nachweis der prinzipiellen Funktion ist ein experimenteller Kosten-Nutzen-Vergleich der verschiedenen Komplexitätsstufen des adaptiven Fahrwerks von Interesse.

Methoden

Methodische Grundlage des Projekts bildet das V-Modell. Ausgehend von einer Anforderungsspezifikation an das Fahrwerk auf höchster Ebene des Gesamtfahrzeugs, erfolgt zunächst in einem Top-Down Ansatz ein Herunterbrechen auf Komponentenebene zur Reduktion der Komplexität der resultierenden Entwurfsprobleme. Auf unterster Ebene werden in einem Vorgängerprojekt entwickelte GFDS eingesetzt, was methodisch einem Bottom-Up Prozess entspricht. Die Integration und Validierung erfolgt anhand eines Versuchsfahrzeugs. Der gesamte Prozess wird von der obersten Ebene des Fahrzeugs und des Fahrwerks bis auf die Ebene unterer Komponenten wie z.B. der Piezodrossel im GFD durch eine durchgängige Modellierung unterstützt.

ZA – Zentrale Aufgaben/Koordinationsprojekt

1. Antragsteller:

Name	Vorname	akad. Titel	Institut
Kasper	Roland	Prof. Dr.-Ing.	Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl Mechatronik

2. Planung des Teilprojekts

Das Teilprojekt Zentrale Aufgaben/Koordinationsprojekt wird als Koordinationsstelle des Verbundprojektes COMO II benötigt. Alle Belange des Verbundprojektes, sowohl von universitärer als auch von außeruniversitärer Seite werden hier bearbeitet.

In Abstimmung mit dem Lenkungskreis werden der Einsatz der finanziellen Mittel und die finanzielle Planung koordiniert. Die Einhaltung der Berichtspflicht gegenüber Fördergebern wird ebenfalls gesteuert.

Neue Projektvorschläge oder Kooperationsangebote können an dieser Stelle eingereicht werden.

Dabei gehört es auch zu den Aufgaben des Teilprojektes, bei Antragstellungen und der Suche nach weiteren Finanzierungsmöglichkeiten behilflich zu sein. Dies betrifft vor allem Projekte mit hohem Anwendungsbezug, die Kooperationspartner in der Industrie suchen. Eine Pflege der Kontakte zur regionalen Wirtschaft sowie zum Verbund MAHREG und anderen automotiven Verbänden ist daher ein zentraler Punkt.

Eine weitere Aufgabe ist das Vertreten des Verbundforschungsprojektes in der Öffentlichkeit soweit dies nicht von den Sprechern wahrgenommen wird. Dazu gehört die Vorbereitung und Teilnahme des Schwerpunktes an Messen und Ausstellungen, auf Tagungen oder Workshops und der Auftritt im Internet.

Auch die Information der internen Gremien wie Lenkungskreis, Projektbereichssprecher, wissenschaftlicher Beirat werden von dieser Stelle übernommen.