

Innovationscluster REM 2030: Innovative Ansätze und Lösungen für den urbanen Verkehr

Dr.-Ing. Lars Fredrik Berg

Fraunhofer Projektgruppe Neue Antriebssysteme - NAS, Karlsruhe, Deutschland

Dipl.-Ing. Markus Schiefer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Elektrotechnisches Institut (ETI), Hybridelektrische Fahrzeuge
Karlsruhe, Deutschland

Dipl.-Ing. Katharina Bause

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Produktentwicklung (IPEK) Karlsruhe, Deutschland

Dipl.-Ing. Torben Fischer

Fraunhofer Projektgruppe Neue Antriebssysteme - NAS, Karlsruhe, Deutschland

Felix Hildenbrand

Fraunhofer Projektgruppe Neue Antriebssysteme - NAS, Karlsruhe, Deutschland

Zusammenfassung

Das Innovationscluster „Regional Eco Mobility 2030 - REM 2030“ ist ein Baustein zur Entwicklung der Mobilität von morgen und steht unter dem Leitthema einer effizienten regionalen Individualmobilität im Jahr 2030. Die Betrachtung eines systemischen Ansatzes ist hierbei zentral. Im Mittelpunkt der Aktivitäten steht die Entwicklung von innovativen Konzepten und Teilsystemen in drei Kernthemen: Fahrzeugkonzept (Hardware), Informations- und Kommunikationstechnologien (Software) sowie Mobilitätskonzepte, Infrastrukturen, Kundenakzeptanz und Geschäftsmodelle (Orgware). Ergänzt wird diese Systematik durch das Kernthema Aus- und Weiterbildung (Mobilitätsakademie). Im Innovationscluster arbeiten Universitäten, Fraunhofer-Institute und Industrie eng zusammen.

In diesem Beitrag wird das Innovationscluster mit seinen Kernthemen vorgestellt. Der Fokus liegt hierbei auf ausgewählten Technologieentwicklungen aus dem Kernthema Hardware, die technisch näher dargestellt werden und die für die den technischen Erfolg der Elektromobilität und somit auch für die Ausbreitung der Elektromobilität in Deutschland und Europa wesentlich sind.

1 Fraunhofer Innovationscluster – REM 2030 Ein Innovationscluster mit systemischem Ansatz

Die Förderung von Clusterinitiativen ist ein zentraler Teil der Hightech-Strategie der Bundesregierung. Im „Pakt für Forschung und Innovation“ hat die Fraunhofer-Gesellschaft die Aufgabe übernommen, Innovationscluster zu konzipieren und umzusetzen. Solche Kooperationen setzen sich klare Ziele und definieren Meilensteine ihrer Entwicklung. Ein Innovationscluster hat die Aufgabe, die Kräfte in der Region zu bündeln und für die Lösung von anspruchsvollen Aufgaben zu aktivieren. Neben der Industrie und den Hochschulen werden auch weitere ansässige außeruniversitäre Forschungsinstitute eingebunden, die für das Themenfeld wichtige Beiträge leisten können. Mit dieser Initiative schafft die Fraunhofer-Gesellschaft Anstöße zur Weiterentwicklung regionaler Exzellenzzentren und unterstützt die Kompetenzen der Regionen. Das Instrument der Innovationscluster soll in erster Linie dabei helfen, vorhandene Stärken weiter auszubauen. In der Regel sind die Kooperationen auf ein Bundesland beschränkt. Wesentlich ist auch die finanzielle Bereitschaft der industriellen Partner und des Landes, zusätzlich zur bisherigen Intensität innerhalb der Region Projekte zu betreiben. [1]

Der Klimaschutz und knappe Ressourcen sowie die damit verbundene Forderung nach neuen Lösungen für die Mobilität steht innerhalb des Fraunhofer Innovationscluster „Regional Eco Mobility 2030 - REM 2030“ im Fokus. Mobilitätskonzepte und -dienstleistungen werden in Zukunft weit über die Betrachtung des Fahrzeugs als Technologieträger hinausgehen. Es ist notwendig, Mobilität als Gesamtzusammenhang von Fahrzeugen, technischen Infrastrukturen, organisatorischen Konzepten, intermodalen Verkehrsansätzen und Betreibermodellen zu begreifen und zu konzipieren. Die dafür erforderlichen Kompetenzen können nicht mehr von einzelnen Unternehmen und Forschungseinrichtungen isoliert erbracht werden. Hier setzt der Innovationscluster REM 2030 an und schafft die notwendigen Freiräume, das Automobil und die Mobilität

der Zukunft jenseits eingefahrener Schemata radikal neu zu denken. Forscher und Partner der Fraunhofer-Gesellschaft und des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickeln in den Bereichen Fahrzeug-, Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sowie Mobilitätskonzepte, Infrastrukturen, Kundenakzeptanz und Geschäftsmodelle gemeinsam innovative Konzepte und Teilsysteme. Ergänzt werden die Aktivitäten durch eine Mobilitätsakademie, ein Aus- und Weiterbildungsprogramm von REM 2030, speziell zum Thema regionale, ökologische Mobilität.

Im Rahmen des Innovationsclusters REM 2030 arbeiten Fraunhofer Institute und Projektgruppen in der Region Karlsruhe – Freiburg und Institute des KIT zusammen. In Tabelle 1 sind die einzelnen Institute aufgelistet

Fraunhofer Institute und Projektgruppen	KIT Institute
Institut für Chemische Technologie - ICT, Pfinztal	Institut für Produktentwicklung – IPEK, Karlsruhe
Institut für Werkstoffmechanik – IWM, Freiburg	Institut für Fahrzeugsystemtechnik – FAST, Karlsruhe
Projektgruppe Neue Antriebssysteme - NAS, Karlsruhe	Elektrotechnisches Institut - Hybridelektrische Fahrzeuge – ETI-HEV, Karlsruhe
Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung – IOSB, Karlsruhe	
Institut für System und Innovationsforschung – ISI, Karlsruhe	

Tabelle 1: Beteiligte Institutspartner der Fraunhofer Gesellschaft und des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

2. Die Kernthemen des Innovationsclusters

Die Organisation des Innovationsclusters sowie wichtige Entwicklungsziele des Innovationsclusters REM 2030 ist in Abbildung 1 dargestellt. Die fachliche Ausrichtung der einzelnen Kernthemen wird im Folgenden dargestellt.

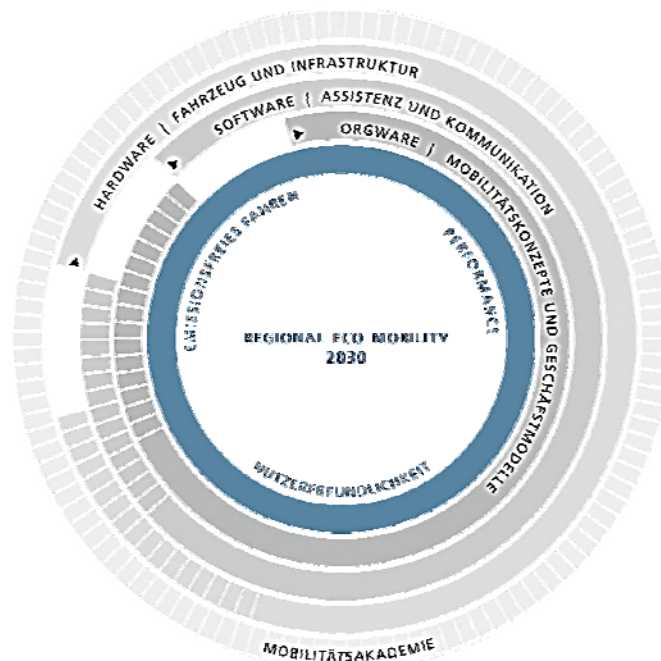


Abbildung 1: Die Kernthemen des Innovationsclusters REM 2030 im Überblick

2.1. Fachliche Ausrichtung im Kernthema Orgware

Im Rahmen des Kernthemas Orgware wird die urbane Verkehrsvision für das Jahr 2030 entworfen. Neben der rein technischen Betrachtung neuer Mobilitätsformen, sowohl im Bereich der Softwaretechnik als auch der Umsetzung von Fahrzeugkomponenten, spielt für die Bewertung effizienter Mobilitätsformen das tatsächliche Mobilitätsverhalten verschiedener Nutzergruppen eine Rolle. Ein Schwerpunkt liegt daher in der Erhebung des Mobilitätsverhaltens im Verkehr per GPS-Datenloggern, um eine belastbare Datenbasis für die Entwicklung zielgerichteter technischer Lösungen zu erhalten. Diese Datenbasis ist ein entscheidendes Instrument, das bereits in zahlreiche Forschungsarbeiten eingeflossen ist und einfließen wird. Im Bereich der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge als spezielle Form effizienter Fahrzeuge wird auf die genannten Fahrprofile zurückgegriffen, um Mobilitätsmuster bestimmen zu können, damit der Ladeinfrastrukturaufbau bedarfsgerecht erfolgen kann. Neben der Bereitstellung von Strom wird ebenfalls die Entwicklung von Infrastrukturen für die Bereitstellung von Energie für die im Kernthema Hardware umgesetzten Range-Extender-Technologien analysiert und bewertet. Weiterhin werden Mobilitätskonzepte zum Anschluss der individuellen Fahrzeugsysteme an bestehende Systeme des öffentlichen Verkehrs betrachtet. Hierzu werden systemdynamische Modelle aufgestellt. Die Analyse von Wertschöpfungsketten erfolgt über eine Simulationsplattform, die die einzelnen Wertschöpfungsschritte bis zur gesamten Wertschöpfungskette abbildet. Alle Elemente des Systems müssen dabei integriert betrachtet werden. Das Kernthema Orgware adressiert die vielfältigen Zusammenhänge zwischen den Teilbereichen, modelliert und analysiert effiziente Strukturen und Geschäftsmodelle und integriert sie in Form einer Simulation des Gesamtsystems. Wesentlich ist hier auch die Bewertung der Akzeptanz neuer Mobilitätsformen, die über die Erhebung von Mobilitätstagebüchern und Interviews bewertet wird. Für das Verständnis der Schnittstellen und deren Adressierung bedarf es eines interdisziplinären Gesamtverständnisses der urbanen Mobilität. Innerhalb des Kernthemas Orgware sind die erforderlichen Kompetenzen zur Zielerreichung innerhalb des Kernthemas am Fraunhofer ISI angesiedelt, das hauptsächlich die Umsetzung der Arbeiten verantwortet.

2.2. Fachliche Ausrichtung im Kernthema Software

Das Kernthema Software beinhaltet die umfassende softwaretechnische Abbildung und Unterstützung des Systems regionaler Individualmobilität, wobei der Nutzer mit seinem Mobilitätsbedarf im Mittelpunkt steht. Auf der Ebene des individuellen Nutzers und des Reiseprozesses stehen die Automatisierung und die Assistenz für den Nutzer sowie die Ergonomie der Gestaltung von Schnittstellen zwischen Nutzer und System im Vordergrund. Betrachtet werden die Reiseplanung, die Fahrzeugführung, die Effizienzsteigerung sowie der Transfer zwischen den verfügbaren Verkehrsmodalitäten. Auf der Ebene der regionalen Infrastruktur werden sowohl Verkehrsnetze und Energieverteilungsnetze als auch Anbieter wie Car-Sharing- und ÖPNV-Unternehmen modelliert. Darauf aufbauend werden Managementsysteme implementiert, welche Dienste wie Ladesteuerung oder Reiseplanung und Reiseassistenz bereitstellen, um die effiziente Befriedigung des Mobilitätsbedarfs innerhalb der Region zu unterstützen. Entsprechend der fachlichen Ausrichtung des Themas ist das Spektrum der benötigten Kompetenzen sehr breit gefächert. Es reicht von der ergonomischen Gestaltung von Bedienschnittstellen und e-Learning über die Fahrzeugumfelderfassung und das autonome Fahren bis zur Optimierung von Verkehrs- und Warenflüssen und Energieverteilungsprozessen. Innerhalb des Kernthemas Software sind die erforderlichen Kompetenzen zu dessen Zielerreichung am Fraunhofer IOSB angesiedelt, das hauptsächlich für die Umsetzung verantwortlich ist.

2.3. Fachliche Ausrichtung im Kernthema Hardware

Innerhalb des Kernthemas Hardware werden Zukunftstechnologien für Fahrzeuge und Infrastruktur entwickelt und demonstriert. Die beteiligten Fraunhofer- und KIT-Institute arbeiten hier eng mit Industriepartnern in unterschiedlichen technologiegetriebenen Arbeitspaketen zusammen. Der Schwerpunkt der Arbeiten innerhalb des Kernthemas liegt auf der Entwicklung von Antriebstechnologien und Topologien, die der Vision REM 2030 entsprechen. Innerhalb der ersten Phase des Innovationsclusters wurden verschiedenste technologische und topologische Lösungen entwickelt, diskutiert und bewertet, um eine zielführende Entwicklungsrichtung für das Kernthema zu finden (bis Mitte 2012). In der darauf folgenden Phase werden die technischen Einzellösungen mit Industriepartnern in und außerhalb von Baden-Württemberg konzipiert (Mitte 2012 bis Ende 2013). Ab 2014 werden die einzelnen Technologien in Hardware dargestellt und validiert, bevor sie in der abschließenden Phase des Innovationsclusters (ab Ende 2014) zu einem Gesamtsystem zusammengeführt und in einem Technologieträgerfahrzeug demonstriert werden.

2.4. Fachliche Ausrichtung im Kernthema Mobilitätsakademie

Das Kernthema Mobilitätsakademie beschäftigt sich mit einem modernen Ausbildungskonzept für die Automobil- und Zulieferindustrie. Ebenso werden damit Berufs- und Quereinsteiger mit Arbeitsbereichen im Themenfeld Elektromobilität adressiert. Die Ausbildungsinhalte werden direkt aus den Kernthemen Orgware, Hardware und Software abgeleitet und beinhalten somit den aktuellen Wissensstand. Wie bei den anderen

Kernthemen steht auch im Rahmen der Mobilitätsakademie das Systemverständnis und somit die Betrachtung des Fahrzeuges und seiner Umgebung sowie des Fahrers als Gesamtsystem im Vordergrund. Ziel dieses Lehrkonzeptes ist die Einordnung einzelner Themen aus dem Bereich der Elektromobilität in das Gesamtsystem Fahrzeug und darüber hinaus in die Themenfelder des Kernthemas Orgware. Dies gelingt durch eine konsequente Abstimmung der einzelnen Themen und Seminare. Das System Fahrzeug in seiner Wechselwirkung mit Fahrer und Fahrzeugumgebung und die Relevanz der einzelnen Themen für dieses System bilden die Grundlage der Seminare. Die so entwickelten Seminare sind somit aufeinander abgestimmt, können aber aufgrund der thematischen Individualität ohne vollständige Kenntnis des Gesamtsystems oder des Inhaltes der weiteren Seminare besucht werden. Dies ermöglicht der Zielgruppe aus dem Bereich der Fahrzeughersteller und Zulieferer, diejenigen Seminare zu besuchen, welche für ihre individuellen Anforderungen relevant sind, ohne sich mit Themen auseinandersetzen zu müssen, welche über ihre Interessen und Kenntnisstände hinausgehen. Die Gesamtheit der Seminare ermöglicht allerdings auch Berufs- und Quereinsteigern, einen Überblick über alle Themen der Elektromobilität zu erhalten und somit schneller in die Anforderungen der zukünftigen Aufgaben hineinzuwachsen. So können Arbeitgeber ihre Mitarbeiter gezielt schulen, bevor diese sich erstmals mit den Anforderungen der Elektromobilität auseinandersetzen müssen. Um diesen Zielgruppen die Lehrinhalte zu vermitteln, wird in Deutsch unterrichtet. Die Referenten setzen sich aus den Wissenschaftlern aus REM 2030 zusammen, und können somit direkt die Lehrinhalte aus ihrer aktuellen Forschung ableiten. Eine Kooperation mit einem bestehenden Ausbildungsanbieter wird dabei angestrebt. So kann das Kernthema auf dessen Erfahrungen im Bereich Marketing, Organisation und Planung solcher Seminare aufbauen, von diesem Fachwissen profitieren und die Nachhaltigkeit des Angebots der Mobilitätsakademie sicherstellen.

3. Fahrzeug und Fahrzyklus - Unsere technologische Entwicklungsbasis

Als gemeinsame Entwicklungsbasis für die Kernthemen und deren verschiedenen Arbeitsgruppen in den beteiligten Instituten wurde gleich zu Beginn des Innovationsclusters eine Spezifikation eines geeigneten Technologieträgers sowie ein relevanter Fahrzyklus für die zu leistende Entwicklungsarbeit definiert. Der Technologieträger und der Fahrzyklus werden im Folgenden näher vorgestellt.

3.1. Audi A1 Sportsback - der REM 2030 Technologieträger

In Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Partner Audi AG in Neckarsulm wurde zu Beginn des Innovationsclusters eine Analyse eines geeigneten Technologieträgers, der als Entwicklung und Demonstrationsbasis für die technologischen Entwicklungen von REM 2030 dienen soll, durchgeführt. Gesucht wurde ein viertüriger Kleinwagen mit Platz für vier Personen und mit Integrationspotential für innovative Antriebstechnologien. Der Audi A1 Sportsback erwies sich hier als eine ideale Basis.


	Fahrzeugdaten Technologiedemonstrator	
	Zielgewicht:	1200 kg
	Sitzplätze:	4
	Luftwiderstandsbeiwert:	0,33
	Rollwiderstandsbeiwert:	0,012
	Frontfläche:	2,04 m ²
	Maximale Geschwindigkeit	135 km/h
	Zielreichweite rein elektrisch	70 km
	Zielreichweite insgesamt	>200 km

Abbildung 2: Audi A1 Sportsback – der REM 2030 Technologiedemonstrator und wichtige Fahrzeugdaten

3.2. Der REM 2030 Fahrzyklus

Da der für die Zertifizierung relevante Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) kein realitätsnahes Fahrverhalten abbildet, wurde für die Entwicklung des Antriebskonzeptes des REM2030-Demonstratorfahrzeuges ein eigener Fahrzyklus entworfen. Anstatt einen fiktiven Zyklus zu modellieren, haben die Projektpartner Fraunhofer NAS zusammen mit dem KIT Instituten ETI-HEV und IPEK auf Basis der Fahrprofilerhebungen im Bereich Orgware ein reales Fahrprofil rund um Karlsruhe definiert. Mit Hilfe dieses Fahrzyklus, dem Fahrverhalten und den Fahrzeugdaten können somit wichtige Größen wie die erforderliche Antriebsleistung eindeutig bestimmt werden. Abbildung 3 zeigt die Route sowie einige charakteristische Kennwerte dieses REM 2030 Fahrprofils.

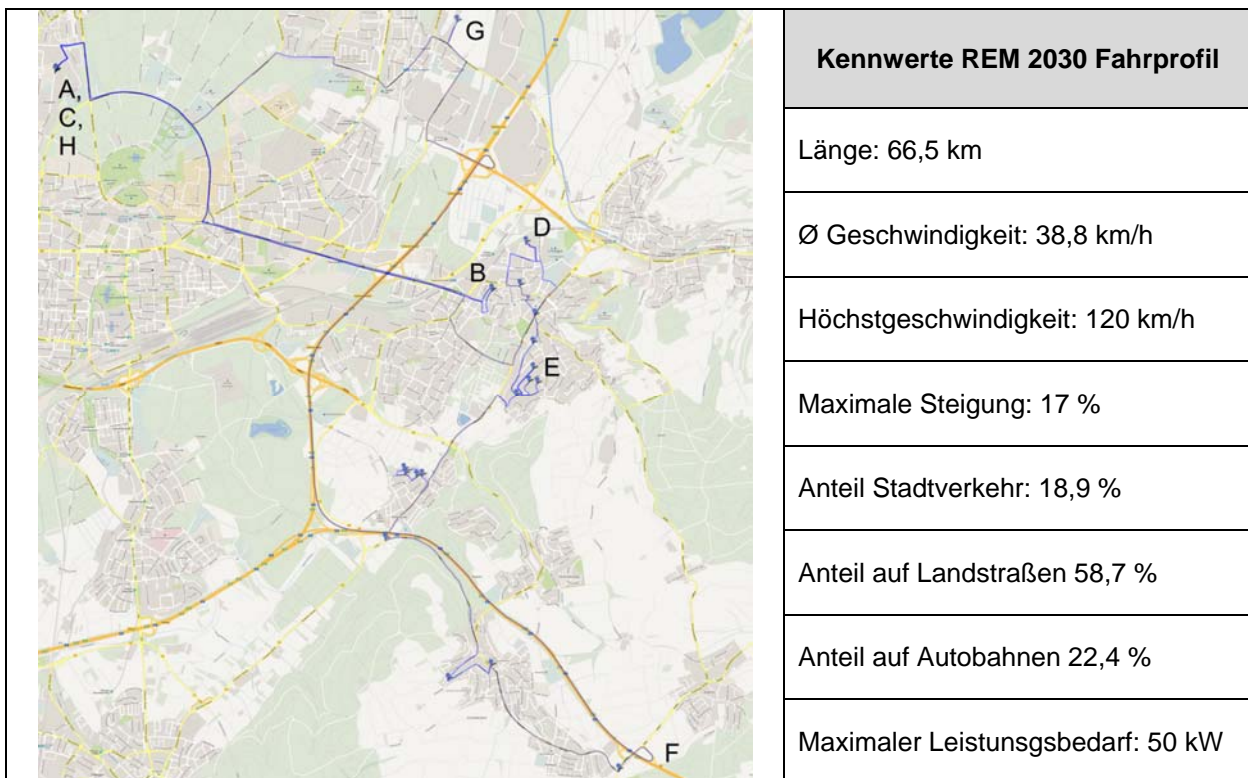


Abbildung 3: Der REM 2030 Fahrzyklus und wichtige Eckdaten des Streckenprofils.

Das REM2030-Fahrprofil besteht überwiegend aus Fahrten im Stadtverkehr, enthält aber auch Überlandanteile sowie einen kurzen Autobahnabschnitt. Dadurch kann ein typisches urbanes/regionales Mobilitätsszenario dargestellt werden. Die Zykluslänge baut auf den Erhebungen des Fraunhofer-Institutes ISI auf, wonach der weitaus größte Teil der Tagesfahrleistung weniger als 70 km beträgt. Bei Versuchsfahrten zur Antriebsleistungsbedarfsbestimmung wurde das Streckenprofil mit einer schonenden Fahrweise absolviert, weil davon auszugehen ist, dass die Käufergruppe von Elektro- bzw. Hybridfahrzeugen eine sparsame Fahrstrategie verfolgt, um die Reichweite ihres Fahrzeuges zu maximieren.

Für die Ermittlung des Leistungsbedarfs wurde die Route von den beiden Partnern Fraunhofer NAS und ETI-HEV mit einem Versuchsfahrzeug (Opel Ampera) abgefahren. Dabei wurden die Geschwindigkeits- und die Höhendaten mit einem entsprechenden GPS Gerät aufgezeichnet. Aus den Daten lässt sich schließlich der Zugkraftbedarf und somit die erforderliche Antriebsleistung für unterschiedliche Fahrzeuge berechnen. Als Ergebnis lässt sich hieraus mit den Daten für das REM 2030 Technologiedemonstrator Fahrzeug (Abbildung 2) die Antriebskraftanforderung in einer Fahrzeugsimulation berechnen. Diese sind in Abbildung 4 grafisch dargestellt. Als Input für die Simulation wurden Roll-, Luft-, Beschleunigungs- und Steigungswiderstandswerte für den Audi A1 Sportsback berücksichtigt.

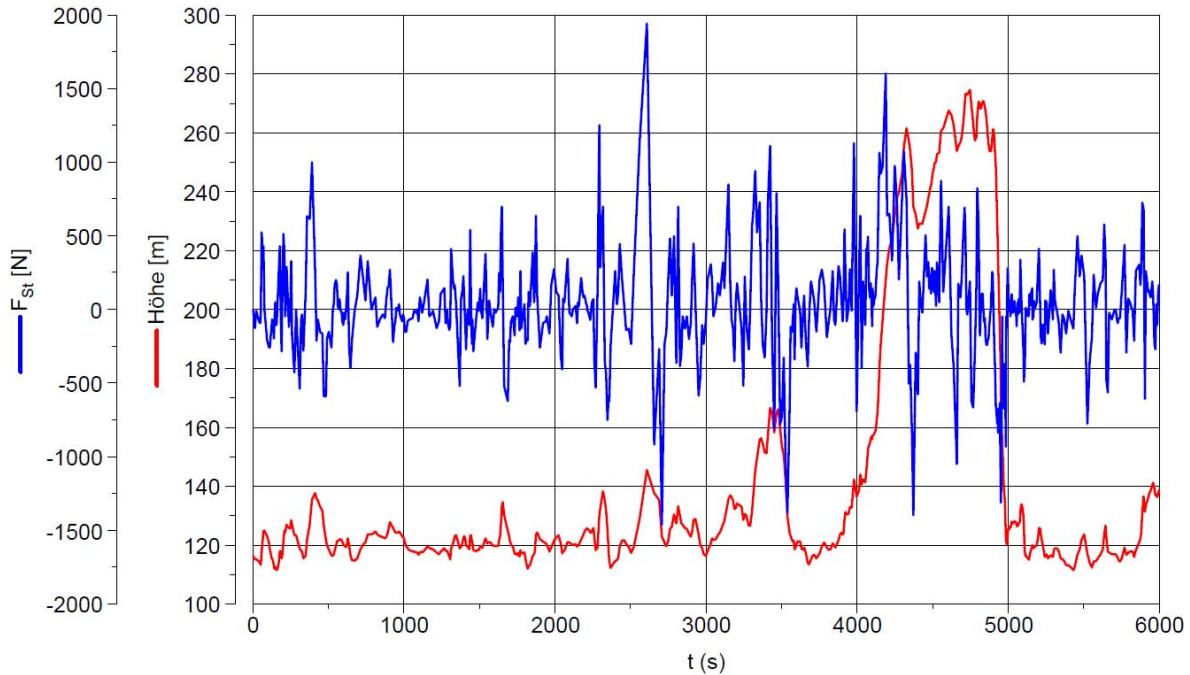


Abbildung 4: Höhenprofil (rot) und Antriebskraftanforderung (blau) der REM 2030 Referenzstrecke

Zusätzlich erlaubt diese Vorgehensweise eine erste Abschätzung über das Potential des rekuperativen Bremssystems. Das aus dem Fahrzyklus ermittelte Leistungsprofil stellt die Basis für die Auslegung der beiden relevanten Einheiten des Antriebsstrangs wie zum Beispiel Motor und Getriebe dar.

4. Technische Innovationen des Innovationsclusters REM 2030

Im Rahmen der Kernthemen werden in verschiedene Arbeitsgruppen technologische Entwicklungen für das REM 2030 Projekt vorangetrieben. Im Kernthema Hardware laufen die antriebsrelevanten Entwicklungen, die wiederum in unterschiedlichen Technologiefeldern eingegliedert werden können. In Abbildung 5 werden diese Technologiefelder aufgelistet und die Unterbringung der Technologien im Fahrzeug dargestellt.

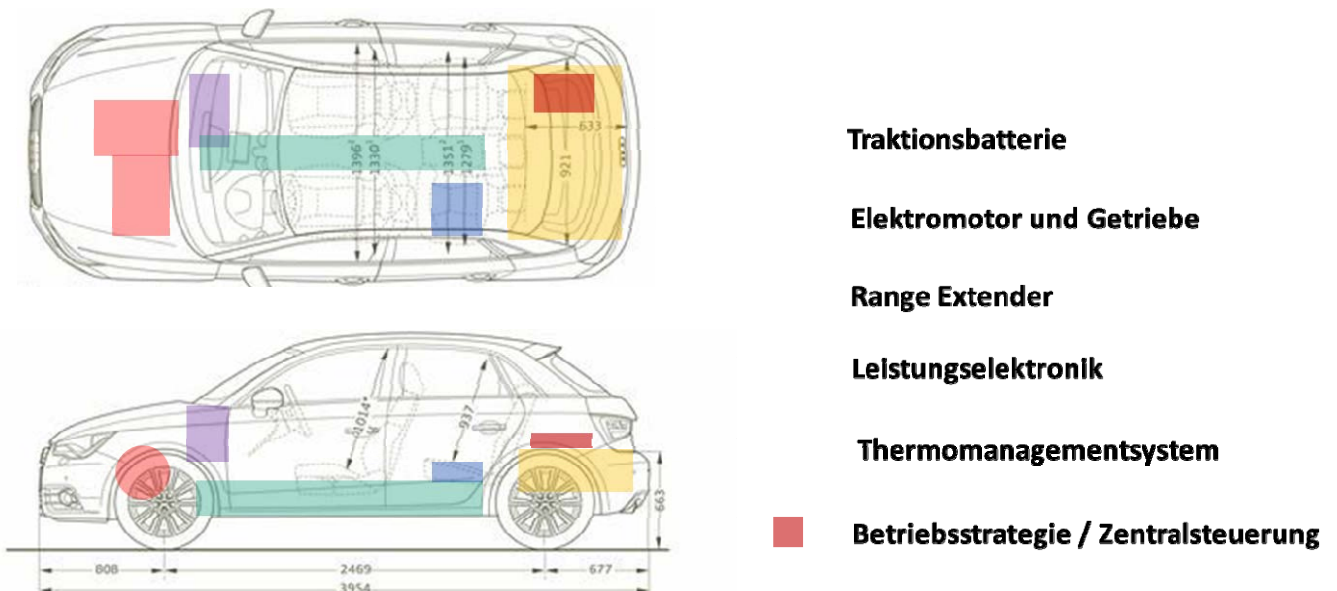


Abbildung 5: Anordnung von wesentlichen Technologien / Antriebskomponenten im REM 2030 Technologieträger

Im Folgenden werden einige dieser Technologien, die im Rahmen des Innovationsclusters bearbeitet werden, näher dargestellt.

4.1. Effizienter elektrischer Achsantrieb - E-Maschine und Getriebe

Von zukünftigen Elektromotoren wird eine immer weitere Verbesserung der Zielgrößen Effizienz, Leistungsgewicht und Kosten erwartet. Diese Zielgrößen stehen miteinander in Konflikt. Ein niedrigeres Motorgewicht führt in der Regel zu einer schlechteren Effizienz, was durch die Wachstumsgesetze für elektrische Maschinen gezeigt werden kann. Die Reduktion von teurem Magnetmaterial spart Kosten ein, hat aber ebenfalls negative Auswirkungen auf Effizienz und Leistungsgewicht. Häufig sind aufwendige Lösungen aus elektromagnetischen Gesichtspunkten wünschenswert, führen jedoch zu hohen Fertigungskosten. Ausgehend von dem Ziel einer möglichst Stückzahl-flexiblen Fertigung, wurden im Projekt REM2030 aufwendige Fertigungsschritte nach dem Stand der Technik identifiziert und ein Konzept erstellt, welches diese vermeidet. Gleichzeitig erlaubt das neue Konzept eine elektromagnetische Auslegung mit hohem Leistungsgewicht und Effizienz.

Die meisten derzeit in Elektrofahrzeugen eingesetzten Traktionsmotoren haben eine verteilte Wicklung und eine Wassermantelkühlung. Die verteilte Wicklung wird großserientauglich mit Hilfe eines Einziehwerkzeugs hergestellt und muss anschließend manuell verschaltet werden. Die Wassermantelkühlung erfordert eine Kühlkanalkontur im Gehäuse, wobei komplexe Geometrien bei höheren Stückzahlen nur durch Aluminiumdruckguss darstellbar sind. Die Passung von Gehäuse zu Stator erfordert in jedem Fall eine maschinelle Nacharbeit und ist durch Luft einschüsse zudem kritisch für die Wärmeleitung. Die Lagerschilde sind bei höheren Stückzahlen meistens ebenfalls als Aluminiumdruckguss-Bauteile ausgeführt, wobei ein Lagerschild bereits in das Gehäusebauteil integriert werden kann. In die Druckgussbauteile können zusätzliche Funktionen integriert werden, wie beispielsweise Kühlmittelanschlüsse, elektrische Anschlüsse und Drehgeberbefestigung.

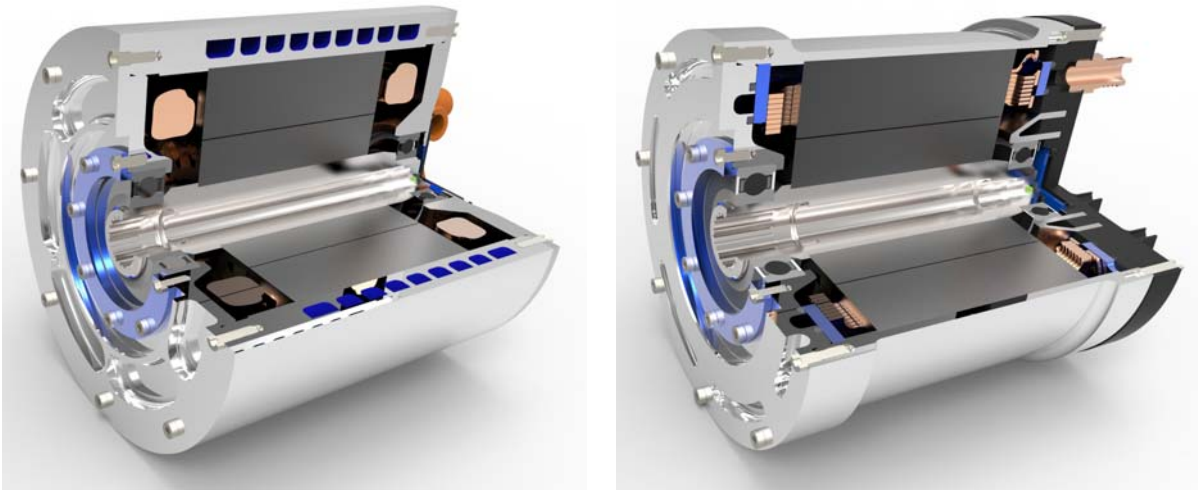


Abbildung 6: Konventioneller Motor (links), Motorkonzept REM2030 (rechts).

Der im Projekt REM2030 entworfene Elektromotor ist eine permanenterrregte Synchronmaschine mit Einzelzahnwicklung. Die wichtigsten Kenndaten sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Dauerleistung	50kW
Spitzenleistung	80kW
Max. Drehmoment	100Nm
Max. Drehzahl	15.000 1/min
Polpaarzahl	4
Anzahl Nuten	12
Luftspaltdurchmesser	80mm
Eisenlänge	100mm
Gewicht	ca. 15kg

Tabelle 2: Kenndaten Motorauslegung REM2030.

Bei der Konzeption der E-Maschine für REM2030 wurde konsequent auf aufwendige Bauteile und Fertigungsschritte verzichtet, um die Fertigung sowohl bei kleinen als auch bei sehr hohen Stückzahlen kosten-

günstig gestalten zu können. Trotzdem zeichnet sich das dabei entstandene Motordesign durch eine hohe Leistungsdichte und Effizienz aus. Eine hohe Leistungsdichte ist gleichzeitig der Schlüssel, um Materialkosten zu sparen. Bei hohen Stückzahlen können die Materialkosten bis zu 60% der Gesamtkosten betragen [2][3]. Durch die Wahl einer konzentrierten Wicklung entstehen prinzipbedingt Nachteile bei Geräuschanregung, Drehmomentwelligkeit und Rotorverlusten, welche durch gezielte Optimierung minimiert werden müssen.

Das Kernstück des Motors bildet ein Stator aus zwölf segmentierten Einzelzähnen, welche mit einem Flachdraht hochkant bewickelt sind. Der Wickelprozess und die Kontaktierung kann automatisiert werden. Durch die parallelfankigen Zähne entsteht zwischen den Wicklungen zweier benachbarter Zähne ein Freiraum, welcher für die Kühlkanäle genutzt wird. Die Kühlkanäle bestehen aus dünnwandigen, hartanodisierten Aluminiumprofilen. Durch die bei der Anodisierung entstehende Aluminiumoxidschicht kann auf eine zusätzliche Hauptisolation zwischen Kühlkanal und Kupferleitern verzichtet werden. Mit zunehmender Oxidschichtdicke wird zudem Material reduziert, in welchem sich Wirbelströme ausbilden können. Massivleiter in den Nuten von elektrischen Maschinen erzeugen in Folge von Stromverdrängungseffekten deutlich höhere Verluste als Litzenleiter. Um diese Verluste zu reduzieren und trotzdem einen hohen Füllfaktor zu erhalten, wird ein flacher Rechteckdraht in zwei Lagen gewickelt. Die Wicklung muss hochkant erfolgen, da das Streufeld in der Nut hauptsächlich in Querrichtung verläuft und sonst hohe Verluste in Folge der Stromverdrängung entstehen.

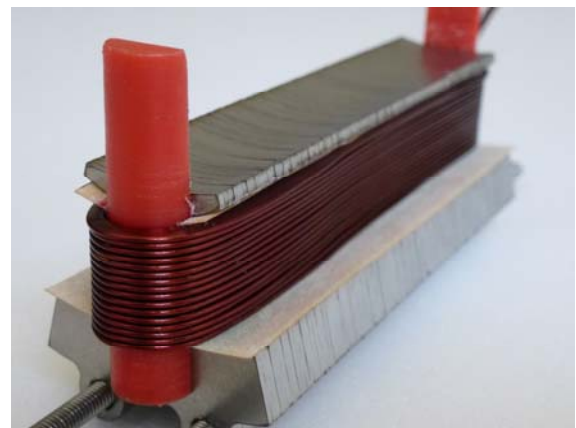
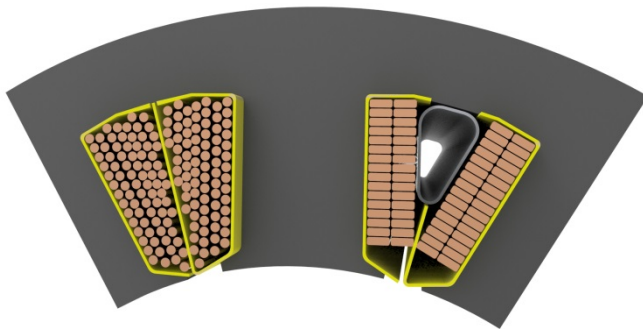


Abbildung 7: Vergleich Runddrahtwicklung und Wicklungskonzept REM2030 (links), bewickelter Einzelzahn (rechts).

Durch die innenliegenden Kühlkanäle kann das Gehäuse sehr einfach gestaltet werden. Das B-Lagerschild wird als faserverstärktes Duroplast-Spritzgussbauteil ausgeführt. Im Vergleich zu einem Aluminiumdruckgussbauteil können hierdurch Werkzeug und Materialkosten eingespart werden und zusätzliche Funktionen, wie beispielsweise Stecker, Sensoren und Dichtungen, integriert werden. Die Lagerschilde übernehmen auch die Verteilung des Kühlmittels auf die Kühlkanäle.

Das Drehmoment des Elektromotors wird über ein schaltbares Getriebe mit zwei Gängen und ein offenes Differenzial auf die Vorderräder des Fahrzeuges übertragen. Bei der Auslegung von E-Motor und Getriebe liegt der Fokus auf einem möglichst effizienten Zusammenspiel der Subsysteme des Antriebsstranges, um ein Gesamtantriebssystem mit erhöhtem Wirkungsgrad für das Fahren im urbanen und regionalen Umfeld darzustellen. Der Auslegung der Subsysteme des Antriebssystems liegen Fahrmanöver zu Grunde, die die Anforderungen aus dem regionalen und urbanen Einsatz repräsentieren. Basierend auf diesen Fahrmanövern und dem E-Maschinen-Kennfeld werden mittels eines Optimierungsalgorithmus der geeignete Getriebetyp sowie die geeigneten Übersetzungsverhältnisse ermittelt. Die Verwendung eines schaltbaren Getriebes ermöglicht für unterschiedliche Fahrsituationen einen gleichermaßen energieeffizienten Betrieb des Antriebssystems. Der erste Gang bedient mit einer Übersetzung von 17,5:1 alle Fahrsituationen bei denen ein höheres Moment bei geringeren Drehzahlen benötigt wird: Steigfähigkeit bei 35%-Steigung, Anfahren am Bordstein sowie innerstädtischer Start-Stopp-Verkehr. Der zweite Gang mit einer Untersetzung von 4,5:1 ermöglicht bei Fahrten auf Landstraßen und Autobahnabschnitten einen ebenso effizienten Betrieb.

Die Schaltbarkeit wird im REM 2030 Demonstrator durch ein schaltbares Planetengetriebe dargestellt. Abbildung 8 ist die Antriebstopologie zu entnehmen. Im ersten Gang erfolgt der Antrieb über das Sonnenrad, das Hohlräder gebremst. Über den Steg wird das Moment über eine Stirnradverzahnung auf den Differentialkorb übertragen und teilt sich von dort auf die beiden Seitenwellen auf. Im zweiten Gang wird der Durch-

trieb ($i = 1$) realisiert, d. h. das Hohlradd wird nicht gebremst und das Sonnenrad wird mit dem Steg synchronisiert, wodurch sich eine Gesamtübersetzung bestehend aus der Differentialübersetzung ergibt.

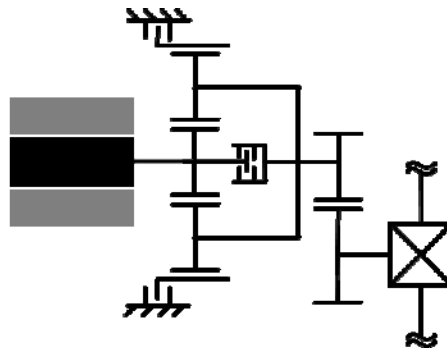


Abbildung 8: Topologie des REM 2030 Antriebstranges.

4.2. Leistungselektronik mit kombinierter AC/DC und DC/DC Wandlung

Zur Speisung der E-Maschine (Kapitel 4.1) wird Drehstrom benötigt. Dieser wird erzeugt, indem ein Spannungswandler, der Umrichter oder DC/AC-Wandler, die Gleichspannung aus der Traktionsbatterie (Hochleistungs-Lithium-Ionen Batterie basierend auf luftgekühlten Pouch-Zellen mit einer Nettokapazität von 11,8 kWh) in eine dreiphasige Wechselspannung wandelt. Der in die E-Maschine gespeiste Strom ist ein dreiphasiger Wechselstrom. Die Regelung der E-Maschine erfolgt durch Beeinflussung des Schaltverhaltens des Umrichters. Der Projektpartner UniTek Industrie Elektronik in Nellmersbach stellt im Rahmen des Projekts REM 2030 zwei Umrichter zur Verfügung, auf deren Basis die Leistungselektronik für den Technoledemonstrator entwickelt wird. Basierend auf EconoDUAL 3 IGBTs von Infineon besteht der Umrichter aus einer Kühlplatte, drei IGBT-Halbbrücken, Zwischenkreiskondensatoren und einer Treiberplatine. Die Treiberplatine und die Kühlplatte wurden von der Fa. Unitek entwickelt. Im Rahmen des Projektes applizieren Mitarbeiter des ETI-HEV ein eigenes DSP System, die die originale Steuerplatine ersetzt. Die Verwendung von zwei baugleichen Umrichtern sowohl als Motorumrichter als auch Schaltelement eines dreiphasigen DC/DC-Wandlers bieten folgende Vorteile:

- Kostenreduktion der Leistungselektronik
- Modularer Aufbau der Leistungselektronik
- Verwendung einer gemeinsamen Steuerelektronik

Im Rahmen des Projekts soll die Möglichkeit eröffnet werden, die Spannung zur Speisung der E-Maschine unabhängig von der Batteriespannung auf min. 400 V einzustellen. Um dies zu ermöglichen wird ein Hochsetzsteller zwischen Batterie und Umrichter eingebracht. Der Hochsetzsteller oder einfacher DC/DC-Wandler kann durch Taktung zweier Leistungsschalter die Spannung auf der Ausgangsseite, unabhängig von der Spannung auf der Eingangsseite, einstellen. Die Einstellung der Eingangsspannung des Umrichters kann somit unabhängig von der Batteriespannung eingestellt werden. Dies hat zur Folge, dass die Leistungswerte des Antriebsstranges über den gesamten Batterieladestand (State of Charge – SOC) Verlauf konstant gehalten werden können.

4.3. Reichweitenerweiterung mittels HT-PEM Brennstoffzelle und Methanoldampfreformer

Um die Reichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) bei Bedarf zu vergrößern, kommen häufig sogenannte Range Extender zum Einsatz. Die am häufigsten eingesetzten Range Extender basieren auf Verbrennungsmotoren, die einen Generator antreiben. Hiermit kann im Bedarfsfall und bei längeren Fahrstrecken die Traktionsbatterie und der Elektromotor mit Strom versorgt werden.

Bei den Serienfahrzeugen Opel Ampera / Chevrolet Volt und BMW i3 kommen Mehrzylinder-Reihenmotoren zum Einsatz. Im Bereich der Prototypen mit Range Extender werden auch andere Verbrennungsmotorkonfigurationen wie z.B. V-Motoren (KSPG) [4] oder Wankelmotoren (Audi) [5] verwendet. Die Motivation für solche alternative Bauformen gegenüber Reihenmotoren ist oftmals der Vorteil im Bereich Bauraum und Akustikverhalten (NVH).

Beim NVH-Verhalten, aber vor allem beim Wirkungsgrad, bieten Wasserstoffbrennstoffzellen wesentliche Vorteile gegenüber Verbrennungsmotoren. Die Nutzung von Wasserstoffbrennstoffzellen als Range Extender ist ein Konzept, welches wegen der fehlenden Infrastruktur zur Betankung und wegen der aufwendigen Speicherung im Fahrzeug noch keinen Serienstatus erreicht hat. Im Rahmen des REM 2030 kommt daher ein Range Extender System vom Typ Hochtemperaturpolymerelektrolytmembran (HT-PEMFC) mit einem vorgeschalteten Methanoldampfpreformer zum Einsatz, um das Problem der fehlenden Wasserstoffinfrastruktur und Betankung zu umgehen. Die im Projekt zum Einsatz kommende Reformed-Methanol-Fuel-Cell (RMFC) Brennstoffzelle stammt von den Projektpartnern SerEnergy AS und Fischer Eco Solutions GmbH und ist ein System mit attraktivem elektrischen Wirkungsgrad und Leistungsdichte. Somit ist dieses System gut geeignet, um die Reichweite von BEV zu erweitern. Im Rahmen des Projektes und bei der Entwicklung des Demonstratorfahrzeugs stellt die Betriebsstrategie der Komponenten im Fahrzeug einen zentralen Entwicklungspunkt dar. Hier bietet die RMFC-Technologie viele Vorteile und vor allem Möglichkeiten, nicht nur die Reichweite, sondern auch die Komforteigenschaften (Thermomanagement) eines Elektrofahrzeuges zu verbessern. Der wesentliche Vorteil des Systems gegenüber der konventionellen Wasserstoff-Brennstoffzelle ist dabei die schnelle und einfache Betankung mit Methanol, da die vorhandene Infrastruktur zur Aufbewahrung und Distribution von flüssigen Brennstoffen wie Benzin und Diesel auch für Methanol verwendet werden kann. In China wird Methanol bereits als Treibstoff verbreitet und in Europa arbeiten Projekte wie das „Green Methanol Infrastructure – GMI“ [6] daran, eine Tankstelleninfrastruktur für Methanol und Bio-Methanol aufzubauen.

Im Projekt REM 2030 wird ein RMFC-System mit einer elektrischen Leistung von 5 kW in Verbindung mit einem 20 Liter Treibstofftank im Heck des Fahrzeuges integriert (siehe Abbildung 8).

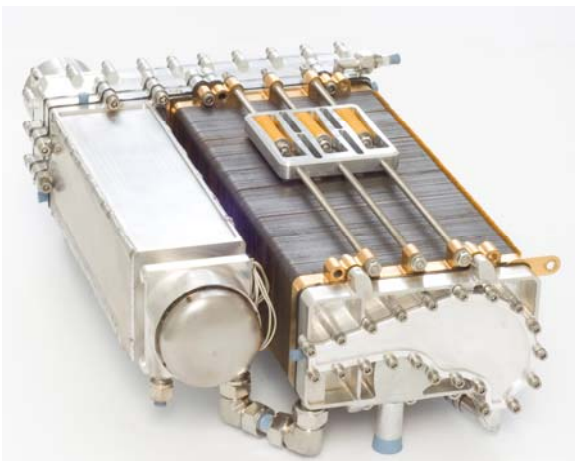


Abbildung 9: 5 kW RMFC System (SerEnergy AS) und CAD Modell vom Einbau der RMFC im Heck des Technologieträgers Audi A1 Sportsback.

Im REM2030 Fahrzyklus konnte ein erstes Konzept zur Nutzung des ausgewählten Brennstoffzellensystems entwickelt werden. In Abbildung 9 ist die Restkapazität der Traktionsbatterie (11,8 kW/h Nettokapazität) im Verlauf der im REM2030-Fahrzyklus gefahrenen Zeit bzw. der gefahrenen Kilometer dargestellt. Zum einen ist durch die grün-gestrichelte Kurve (1) der Batterieladestand in Abhängigkeit der Fahrzeit ohne zugeschalteten Range Extender und zum anderen durch die grüne-durchgehende Kurve (2) ein Beispiel für einen Lastfall mit Betrieb des RMFC-Systems aufgezeigt.

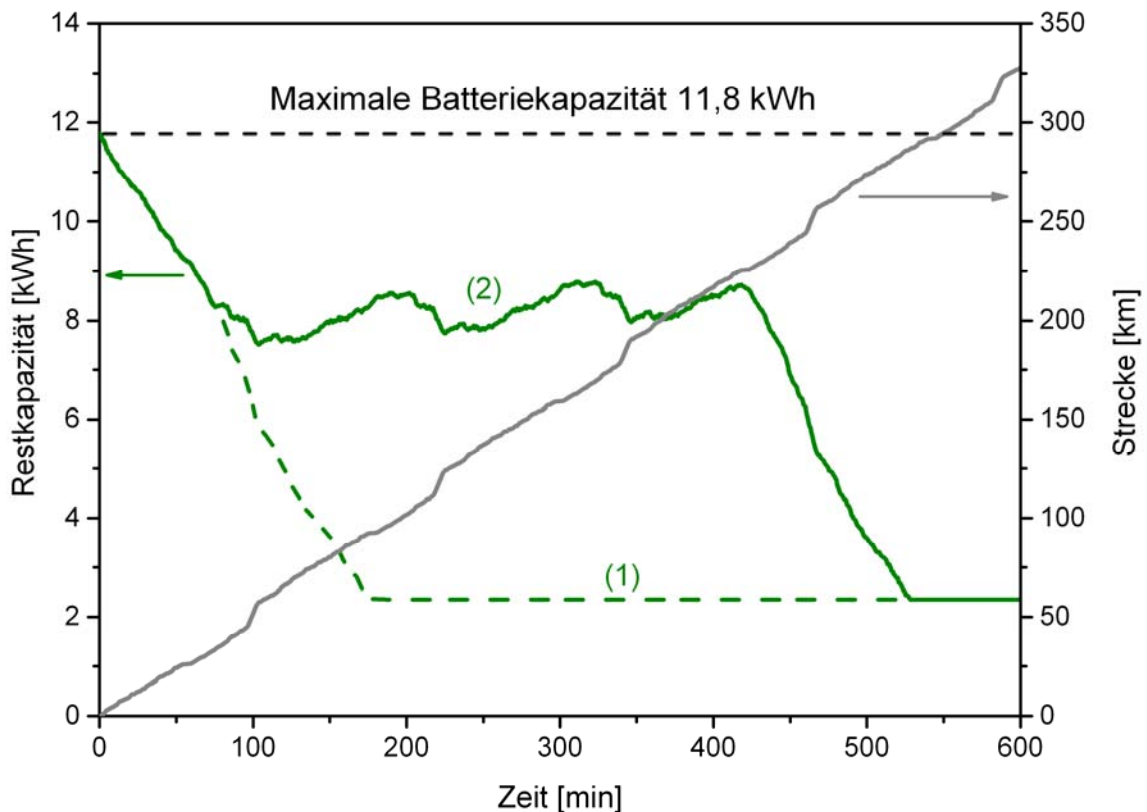


Abbildung 10: Nutzung des Brennstoffzellen Range-Extenders im REM2030 Fahrzyklus. (1) Energiebedarf aus der Batterie ohne Nutzung des Range Extenders und (2) Beispiel für ein Nutzungsszenario des Range Extenders im REM2030 Fahrzyklus (Startzeitpunkt RMFC-System 1h nach Fahrtbeginn, benötigte Aufheizzeit 15 min und Auslastung des Range Extenders bei 70 % bezogen auf eine maximal Leistung von 5 kW_{el}).

Der durchschnittliche Leistungsbedarf des Audi A1 Referenzfahrzeugs auf diesem Zyklus beträgt etwa $3,4 \text{ kW}_{el}$ und kann von dem gewählten RMFC-System gepuffert werden (vgl. Abbildung 9, (2)). Dies bestätigt, dass mit Hilfe des Range Extenders in der gewählten Leistungsklasse und bei ausreichender Tankgröße die Reichweite des Fahrzeugs auf die konventioneller Automobile, d.h. einige hundert Kilometer, gesteigert werden kann.

Die Integration des Systems ermöglicht des Weiteren eine effiziente Nutzung der Restwärme zur Innenraumbeheizung und ein aktives Thermomanagement innerhalb des Fahrzeuges. Auf diese Möglichkeit wird im Unterkapitel 4.4. ausführlich eingegangen.

4.4. Ganzheitliches Thermomanagement

Der Antriebsstrang von batterieelektrischen Fahrzeugen stellt aufgrund seiner hohen Effizienz wenig Abwärme zu Heizzwecken zur Verfügung. Um den Heizbedarf zu decken, muss auf elektrische Energie aus der Traktionsbatterie zurückgegriffen werden. Die ohnehin im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen relativ geringe Reichweite wird dadurch weiter signifikant eingeschränkt. Eine Herausforderung im Systemverbund stellt der thermische Betriebsbereich des Energiespeichers dar, der bei heutigen Lithium-Ionen-Batterien zwischen 20 und 40°C liegt. Überschreitet die Temperatur diesen sogenannten Wohlfühlbereich, so rechnet man zunehmend mit unerwünschten Alterungseffekten bis hin zur vollständigen Degradation der Batterie [7]. Das Einhalten der thermischen Betriebsbereiche soll daher durch ein ganzheitliches Thermomanagement, welches möglichst energieeffizient Wärme und Kälte bereitstellt, sichergestellt werden.

Kommerziell verfügbare Systeme verfügen zur Beheizung des Innenraums meistens über elektrische Widerstandsheizkörper, die die eingebrachte elektrische Energie komplett in Wärme überführen. Eine Abwärmenutzung der elektrischen Komponenten geschieht bisher nicht, auch die Integration einer Wärmepumpe zur Nutzung der Umgebungswärme ist bisher nicht standardmäßig erhältlich. Betrachtet man die Batteriekühlung aktueller kommerziell verfügbarer Elektro- und Hybridfahrzeuge, so findet man Systeme von Luft- über Flüssigkeits- bis hin zur Kältemittelkühlung [8]. Die Wahl des Konzepts hängt von der jeweiligen Anwendung und wirtschaftlichen Faktoren ab. Durch die bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen sehr große thermische

Masse erwärmt sich die Traktionsbatterie nur sehr träge, weshalb die einfache Luftkühlung relativ verbreitet ist. Inzwischen haben sich mehrere Ansätze etabliert, sowohl die Kühlung der Batterie durch die Abluft des Innenraums, als auch unabhängige Lösungen, bei der die Luft durch einen separaten Kältekreislauf unter Umgebungsniveau gekühlt wird. Aber auch passive Luftkühlungen finden durchaus Verwendung, wobei in heißen Klimazonen kritische Temperaturen erreicht werden können.

Eine kompakte und oft verwendete Lösung stellt die Flüssigkeitskühlung der Batteriezellen dar, welche einen besseren Wärmeübergang und eine ausgeglichene Temperaturverteilung in der Zelle bewirkt. Der Vorteil einer Kältemittelkühlung liegt einerseits in der hohen spezifischen Kälteleistung und andererseits in der isothermen Verdampfung des Kältemittels, wodurch über die Kühlstrecke der Batterie kein Temperaturgradient entsteht, was jedoch durch ein deutlich komplexeres System erkauft wird.

Innerhalb des Projekts REM 2030 wird mit einem Industriepartner ein energieeffizientes, ganzheitliches Thermomanagement-System für das beschriebene Fahrzeug von der Konzeptphase über die Simulation- bis hin zur noch bevorstehenden Hardwarephase entwickelt. Das Herzstück bildet ein Thermo-Modul, welches in der Lage ist, je nach Bedarf Kälte oder Wärme bereitzustellen. Dies wird durch eine Wärmepumpe mit kältemittelseitiger Strömungsumkehr erreicht. Zwei Kühlmittelkreisläufe stellen hierbei die Wärmequelle und Wärmesenke dar (siehe Abbildung 10).

Im Heizmodus transportiert der innere Kühlkreislauf (Senke) die Wärme zum Innenraumwärmeübertrager, der äußere Kreislauf (Quelle) nimmt die Umgebungswärme über den Außenwärmeübertrager auf. Der Kühlmodus verhält sich dementsprechend umgekehrt.

Die Abwärme der elektrischen Komponenten (Elektromotor und DC/DC-Wandler) werden in den äußeren Kreislauf eingebracht, wodurch das untere Temperaturniveau der Wärmepumpe angehoben wird und demnach die Kompressorleistung verringert wird. Im Kühlmodus würde sich die eingebrachte Wärme im äußeren Kühlkreislauf durch eine Erhöhung der Temperaturspreizung effizienzmindern auswirken, weswegen sie dann direkt an die Umgebung transportiert wird.

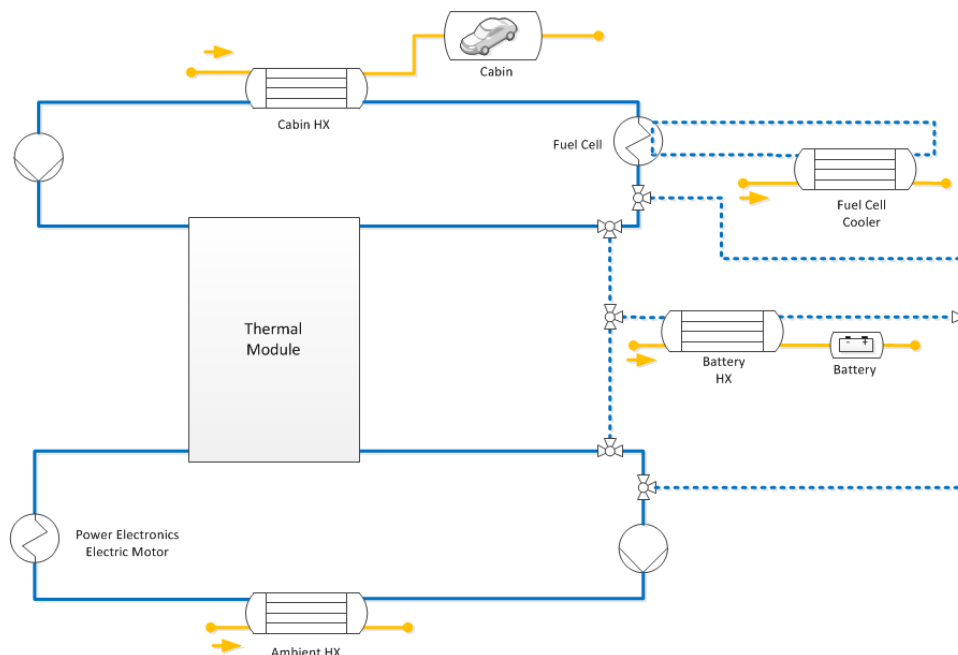


Abbildung 11: Konzept Thermomanagement-System REM2030

Die Batterie ist luftgekühlt ausgeführt, kann jedoch aufgrund ihres thermisch sensiblen Betriebsbereichs weder fest in den inneren noch in den äußeren Kühlkreislauf integriert werden. Durch eine Ventilverschaltung wird die Batterie an den Kühlkreislauf mit dem aktuell benötigten Temperaturniveau angeschlossen, wodurch unabhängig von der geforderten Temperatur im Innenraum ein Solltemperaturbereich für die Batterie eingehalten werden kann.

Die Abwärme des Range Extenders reicht aus, um den Heizbedarf des Innenraums abzudecken. Daher wird die Brennstoffzelle im inneren Kreislauf platziert, wodurch die Wärmepumpe bei aktivem Range Extender-

abgeschaltet werden kann. Im Kühlmodus wird die Abwärme des Range Extenders durch einen eigenen Kühler an die Umgebung transportiert.

Durch ein umfangreiches Simulationsmodell des Thermomanagement-Systems, welches mit einem Gesamtfahrzeugmodell des REM2030-Fahrzeugs gekoppelt ist, lassen sich auf Basis des gewählten REM2030-Zyklus weitere Optimierungspotenziale analysieren. Abbildung 11 zeigt ein Simulationsergebnis, das einer Wärmepumpe bei einer Umgebungstemperatur von -5°C eine Verbrauchsminderung um 20% gegenüber üblichen Widerstandsheizern prognostiziert. Dieser Wert steigt mit einer Reduzierung der Temperaturspreizung.

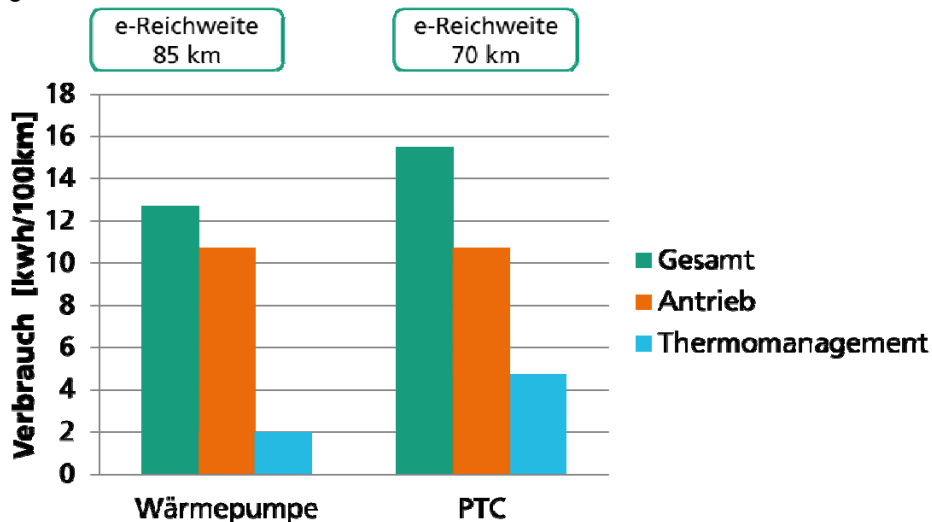


Abbildung 12: Vergleich Verbrauch REM2030-Fahrzeug im REM2030-Fahrzyklus bei -5°C

Weitere Analysen beinhalten die Notwendigkeit einer Batterievorheizung, den Nutzen eines Wärmespeichers oder eines Bremswiderstands, der nicht rekuperierbare kinetische Energie zum Beheizen des Innenraums nutzt. Das entwickelte Batteriemodell ist in der Lage, den Innenwiderstand in Abhängigkeit der Zelltemperatur darzustellen, wodurch auch Aussagen über das Aufheizverhalten der Batterie getroffen werden können. Über den Fahrzyklus wird so, in Abhängigkeit des Innenwiderstands, eine Zelltemperaturzunahme um gut 15°C berechnet, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden.

5. Technologiedemonstration und Validierung

Im Laufe des Projektes werden die entwickelten Technologien in dem zur Verfügung gestellten Technologiedemonstrator Audi A1 Sportsback integriert und validiert. In diesem Integrationsprozess wird als erstes ein virtuelles Packagingkonzept im CAD Tool Catia erstellt. Dieser Schritt dient dazu, die einzelnen Bauteile des Antriebsstranges und alle Peripherieelemente, die notwendig sind, um ein rollfähiges Demonstrator-Fahrzeug darzustellen, zu modellieren und in einem Gesamtfahrzeugmodell zusammenzubringen. Somit können unterschiedliche Konzepte zur Unterbringung und topologischer Anordnung der Komponenten verglichen und bewertet werden. Abbildung 12 zeigt ein erstes Stadium dieser Packagingarbeiten. Hier ist ersichtlich, wie der Antrieb (E-Motor und Getriebe), die Leistungselektronik und das Thermomanagementsystem im vorderen Bereich des Fahrzeuges untergebracht sind. Der Range Extender und der Methanoltank ist im Heck des Fahrzeuges untergebracht.

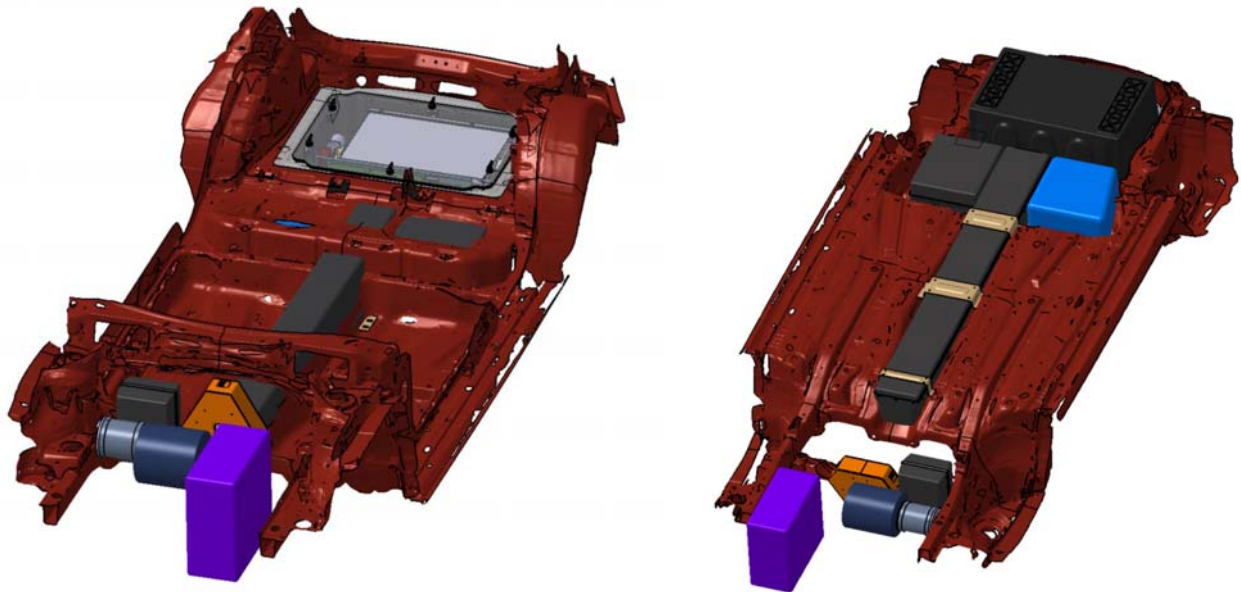


Abbildung 13: CAD Modell vom Technologieträger zur Packaging von Antriebskomponenten in der Rohkarosserie.

Auf dieser Konstruktionsbasis werden später die notwendigen Anpassungen an der Rohkarosserie vorgenommen, um beispielsweise die Traktionsbatterie in den Mittelunnel adaptieren zu können. Als ein Ergebnis des Innovationsclusters soll am Laufzeitende des Projektes ein rollfähiger Fahrzeugdemonstrator mit den integrierten einzelnen Technologien umgesetzt werden. Anhand dieses Demonstrators sollen die entwickelten Konzepte und die Simulationsrechnungen aus der Entwicklungsphase validiert werden.

Weitere Informationen zu den Kernthemen sowie die direkten Ansprechpartner und den aktuellen Stand des Projektes finden sie unter: www.REM2030.de

6. Literaturverzeichnis

- [1] N.N.: Regionale Struktur mit globaler Wirkung – das Konzept der Innovationscluster, <http://www.fraunhofer.de>
- [2] A. Kampker, P. Burggräf, C.Nee: Costs, Quality and Scalability: Impact on the Value Chain of Electric Engine Production, Electric Drive Production Conference Nürnberg, 2012
- [3] Studie "ELAB – Elektromobilität und Beschäftigung", Fraunhofer IAO, 2012
- [4] J. Andert, E. Köhler, J. Niehues, G.Schürmann: KSPG Range Extender - A New pathfinder to Electromobility Zeitschriftenartikel: MTZ worldwide Ausgabe 05/2012, Seite 12-18, Springer Automotive Media, 2012
- [5] M.Peters: Audi A1 E-Tron im Fahrbericht - Elektroauto mit Wankel-Range-Extender Auto Motor undSport, Heft 21 / 2010, Motor Presse Verlag Stuttgart, 2010
- [6] N.N: <http://greenmethanol.dk/de/uber-gmi>
- [7] R. Korthauer: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, 978-3-642-30652-5
- [8] H.H. Braess, U. Seiffert: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 978-3-658-01690-6