

Entwicklung von hybriden Antriebssystemen für den Individualverkehr in der Profilveregion Karlsruhe

Martin Eisele¹, Andreas Dollinger², Tobias Burgert², Felix Müller³, Katharina Bause¹, Aline Radimersky¹, Ivica Kraljevic², Sascha Ott¹

¹ IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT, Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

² Fraunhofer Institut für Chemische Technologie - ICT
Projektgruppe Neue Antriebssysteme - NAS, Rintheimer Querallee 2, 76131 Karlsruhe

³ Institut für energieeffiziente Mobilität an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe

1 Motivation

Effiziente, intelligente und integrierte Mobilitätssysteme bringen Stadt und Umland als attraktives Lebens- und Arbeitsumfeld in Einklang mit dem stetig zunehmenden Transport von Menschen und Gütern. Die Profilveregion Mobilitätssysteme in Karlsruhe steht für die Vernetzung der technischen, sozio-technischen und gesellschaftlichen Problemlösungskompetenz eines komplementären Verbunds relevanter Akteure, die zukunftsfähige bodengebundene Mobilität erforschen, umsetzen und ihre Verbreitung fördern.

Zu den großen Herausforderungen der Zukunft wird die intelligente Gestaltung der Mobilität gehören – insbesondere in den wachsenden Städten. Neben dem Transport von Menschen wachsen auch die Güter- und Stoffströme in urbanen Räumen immer weiter an, wodurch die Lebensqualität und ein gesundes Umfeld zunehmend gefährdet sind. Die Eindämmung von Lärm, vor allem aber die Reduktion des Energieverbrauchs und der Ersatz konventioneller Energieträger- und Antriebstechnologien durch emissionsarme Alternativen sind daher große gemeinsame Ziele, die nur im Zusammenwirken aller Akteure erreicht werden können.

Energie- und damit ressourceneffiziente Mobilität ist insbesondere durch Fahrzeuge mit teilelektrifizierten Antriebssystemen realisierbar. Die Möglichkeit, teilelektrifizierte Fahrzeuge im begrenzten Umfang lokal emissionsfrei zu betreiben, ist eine wichtige Eigenschaft zur Realisierung wirtschaftlich darstellbaren Verkehrs in Städten.

Bisherige Hybridkonzepte basieren auf parallelen oder seriellen Topologien sowie Mischformen (Powersplit-Hybriden). Bei all diesen Antriebssystemkonzepten fällt auf, dass die elektrifizierten Komponenten des Antriebssystems vor allem zur energetisch günstigen Veränderung der Betriebsrandbedingungen der Verbrennungskraftmaschine (z. B. serielle Hybride) oder zur Rückgewinnung kinetischer Energie im Fahrbetrieb genutzt werden.

Hybridisch angetriebene Fahrzeuge bieten darüber hinaus grundsätzlich das Potenzial, die im diskontinuierlichen Betrieb der Verbrennungskraftmaschine immer wieder erforderlichen Heizphasen für die Verbrennungskraftmaschine und die funktionsprinzipbedingten Wärmeverluste durch thermische Rekuperation zu reduzieren.

Durch die beliebig hohe Anzahl von Hybridvarianten, die durch technisch mögliche Kombinationen der Subsysteme im Antriebssystem entstehen, wird der damit einhergehende Lösungsraum für elektrifizierte Antriebslösungen größer und komplexer. Es stellt sich daher die Frage, wie ein zukunftsrobustes Antriebssystem tatsächlich aussieht und welche Antriebsstrangtopologie im Sinne der Energieeffizienz das größte Potenzial für entsprechende Anwendungsfälle hat.

In der Profilveregion Karlsruhe werden Kompetenzen von Forschungseinrichtungen aus Karlsruhe gebündelt, um in einem der sieben Intialisierungsprojekte Methoden für die Entwicklung

und Erprobung energieeffizienter hybrider Antriebssysteme zu entwickeln. Ziel ist es, zwei teilelektrifizierte Antriebsstränge mit maximalem energetischen Wirkungsgrad zu entwickeln, die auf den Individualverkehr in der Region Karlsruhe abgestimmt sind, und deren Funktionen durch Anwendung des vernetzten XiL-Validierungsansatzes [1] auf Prüfständen und in Simulationen für anwendungsrelevante Betriebsszenarien nachzuweisen. Die Möglichkeiten zur Rekuperation der thermischen Energieanteile der Verbrennungskraftmaschine und deren Einfluss auf die Energieeffizienz in teilelektrifizierten Antriebsstränge werden nachgewiesen.

Hierfür ist es zunächst erforderlich relevante Nutzungsszenarien für die Region Karlsruhe zu identifizieren sowie relevante Regularien seitens Gesetzgebung und Normung zu identifizieren. Für die Entwicklung zweier Antriebsstränge wird ein Zielfahrzeug identifiziert, welches die erarbeiteten Bedarfe grundsätzlich erfüllen kann. Aus den identifizierten Nutzungsszenarien werden RDE-Zyklen abgeleitet, die ergänzend zu den seitens Gesetzgebung und Normung vorgeschriebenen Zyklen zur Auslegung und Bewertung herangezogen werden. Diese Arbeiten werden im Folgenden vorgestellt.

2 Forschungsumgebung und -partner

Die Arbeiten zielen auf die Konzeptionierung zweier hybrider Antriebsstränge ab, welche geeignet sind, sowohl die Belange des regionalen, wie auch des urbanen Raums zu bedienen. Ein Antriebsstrang nutzt die Verbrennungskraftmaschine als primäre Leistungsquelle, der zweite Antriebsstrang wird primär elektrisch betrieben, sodass zwei teilelektrifizierte Antriebssysteme mit dem jeweilig passendem Hybridisierungsgrad konzeptioniert werden.

2.1 Konsortium

Die beteiligten Partner bringen nachstehend beschriebene Kompetenzen in die Beantwortung der Fragestellungen ein:

Institut für Produktentwicklung (IPEK):

Das IPEK verfügt über einen umfangreichen Erfahrungsschatz im Bereich komplexer Antriebssysteme und der wissenschaftlichen Umsetzung energieeffizienter Topologien und Betriebsstrategien hybrider Antriebssysteme sowie in der Entwicklung und Umsetzung passender Validierungsmethoden und -umgebungen. [2] [3] [4]

Fraunhofer Projektgruppe Neue Antriebssysteme (NAS):

Die Projektgruppe Neue Antriebssysteme bringt die erforderlichen Kompetenzen im Bereich der thermodynamischen Rekuperation und dem Betrieb von Verbrennungskraftmaschinen für hybrid-elektrische Fahrzeuganwendungen in das Konsortium ein.

Elektrotechnisches Institut (ETI):

Mit der Integration der Stiftungsprofessur Hybridelektrischer Fahrzeuge stehen dem Konsortium umfangreiche Kompetenzen und innovative Herangehensweisen zur Realisierung höchsteffizienter elektrischer Maschinen zur Verfügung.

Institut für energieeffiziente Mobilität (IEEM):

Das Institut für energieeffiziente Mobilität der Hochschule Karlsruhe unterstützt das Initialisierungsprojekt mit Wissen über die Wechselspiele zwischen Telematik, Antriebsstrang und Betriebsstrategien. Damit werden adaptionsfähige Ansätze zur Reaktion des Antriebssystems auf die Gesamtfahrsituation möglich.

2.2 Vorgehensweise und Zielsetzung

Um die Bedürfnisse der Individualmobilität im urbanen und regionalen Raum zu bedienen, wird das Mobilitätsverhalten in der Region Karlsruhe analysiert. Fahrzeugdaten als auch Nutzerverhalten beim täglichen Gebrauch des PKW dienen als Grundlage, um das Kundenprofil und eine repräsentative Fahrstrecken sowie ein Zielfahrzeug für die Antriebssystementwicklung abzuleiten. Neben der Ermittlung des Anwendungsprofils welches in Zielgrößen überführt wird, werden gesetzliche Rahmenbedingungen, bspw. für Fahrzeugzertifizierung ermittelt. Eine entsprechende Auslegung des Antriebssystems kann u. a. wirtschaftliche Vorteile für den Anwender als auch für den Fahrzeughersteller mit sich bringen. Effizienzsteigerung und Reduktion des CO₂-Ausstoßes senken die Fahrzeughaltungskosten und werden durch den Staat gefördert. Diese Potenziale sollen genutzt werden, um Kaufanreize für die Hybridfahrzeuge zu schaffen.

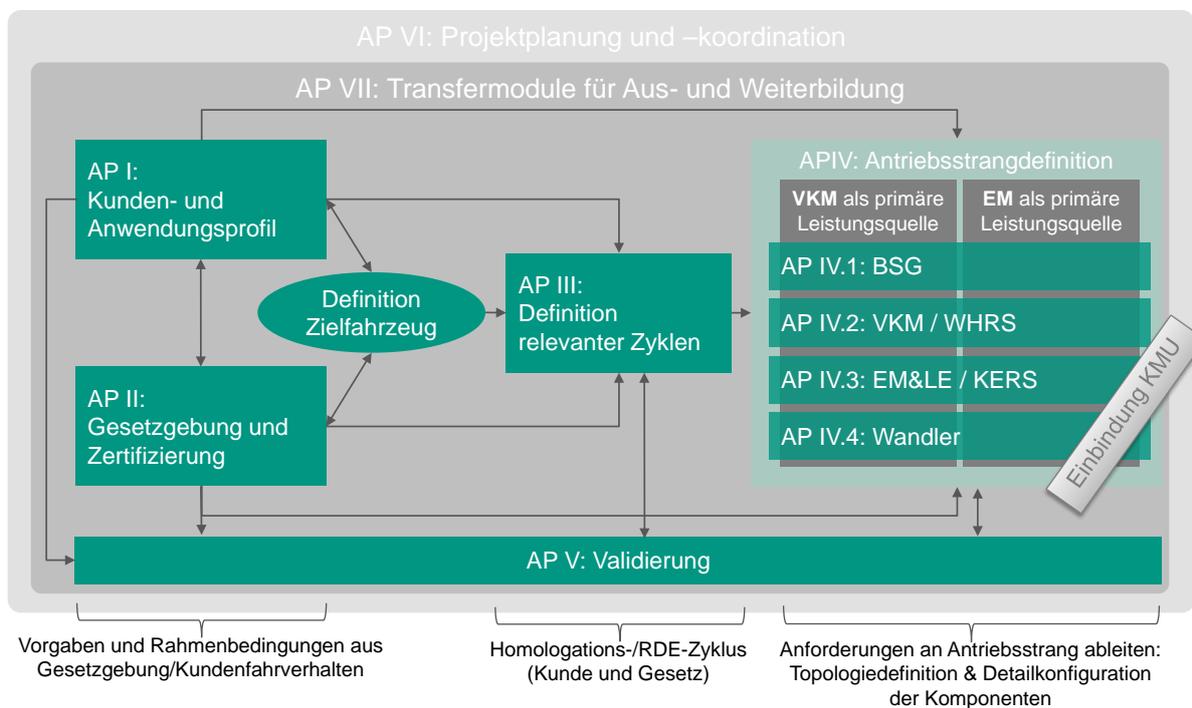


Abbildung 1: Arbeitsinhalte und Informationsfluss

Die Entwicklung und Erprobung der Antriebssysteme inklusive Betriebsstrategie erfolgt über verschiedene Fahrzyklen. Einerseits kommen genormte Zyklen zur Fahrzeugzertifizierung zum Einsatz, zum anderen wird im Rahmen des Projekts ein für die Region Karlsruhe repräsentativer Fahrzyklus entwickelt. Letztgenannter wird angewandt, um den Energieverbrauch des Fahrzeugs im realitätsnahen Einsatz zu prüfen. Aus der Vielzahl an möglichen Varianten von Hybridantrieben werden mittels Simulationen geeignete Antriebssystemtopologien identifiziert, welche die energetischen Mindestanforderungen an die jeweiligen Subsysteme erfüllen. Zum energieeffizienten Betrieb des Antriebssystems werden entsprechende Betriebsstrategien entwickelt. Das NAS konzipiert entsprechend der gewählten Topologie eine geeignete Verbrennungskraftmaschine und entwickelt zusammen mit dem ETI, welches für die Auslegung der E-Maschine mit zugehöriger Leistungselektronik verantwortlich ist, Energierückgewinnungssysteme. Diese nutzen die kinetische Energie des Fahrzeugs zur Rekuperation sowie die Abwärme der Verbrennungskraftmaschine. Der Wirkungsgrad der Antriebsmaschinen ist vom geforderten Drehmoment und der Drehzahl an den Rädern abhängig. Wandler zwischen Antrieb und Abtrieb beeinflussen das Drehmoment-Drehzahlverhältnis und damit den

Wirkungsgrad der Kraftmaschinen. Das IPEK legt das Getriebe unter Berücksichtigung der geforderten Maximalgeschwindigkeit und dem Anfahrmoment auf maximalen Antriebssystemwirkungsgrad aus. Die Validierung der Konzepte erfolgt virtuell über Simulationen, sowie bei Bedarf virtuell-physisch für ausgewählte Antriebssystemkomponenten auf den Prüfständen der Institutionen.

3 Bisherige Projektergebnisse

3.1 Gesetzgebung und Zertifizierung

Um ein Fahrzeug erfolgreich am Markt platzieren zu können, müssen in der Entwicklung lokal geltende Gesetzgebungen und Zertifizierungsrichtlinien berücksichtigt werden. Dies gilt im Speziellen auch für die Entwicklung hybrider Antriebsstränge für PKW. Im Rahmen des Teilprojekts V werden die in Deutschland geltenden Regelungen recherchiert und deren Auswirkungen auf die Entwicklung der Antriebssysteme bewertet. Im Folgenden werden die wichtigsten Gesetzgebungen für die Antriebssystementwicklung betrachtet.

Einzuhaltende CO₂-Grenzwerte auf Flottenebene und deren Berechnung spielen bei der Auslegung des Verbrennungsmotors im Hybridantriebsstrang eine entscheidende Rolle, um den Flottenverbrauch zu senken. Die CO₂-Grenzwerte werden jährlich anhand der durchschnittlichen Fahrzeugmasse in den vergangenen drei Kalenderjahren angepasst und sollen bis 2020 auf 95 g / km sinken [5]. Besonders verbrauchsarme Fahrzeuge gehen mehrfach in den Flottenverbrauch ein. Ein Fahrzeug mit einem Ausstoß von weniger als 50 g / km wird bis 2020 als 2 Fahrzeuge auf den Flottenverbrauch angerechnet. Ab 2021 soll der Anrechnungsfaktor sinken, sodass ab 2023 keine Mehrfachanrechnung mehr stattfindet. [6] Diesen Verbrauch im Normzyklus zu unterbieten stellt für den OEM einen besonderen Anreiz dar. Aber auch besondere Maßnahmen zur Verbrauchseinsparungen, sogenannte Ökoinnovationen, die in den Zertifizierungszyklen zu keiner Einsparung führen, kann mit bis zu 7 g / km CO₂-Einsparung auf den Flottenverbrauch angerechnet werden. [6] Darunter können Betriebsstrategien wie das Segeln fallen, um den Energieverbrauch zu senken.

Die blaue Plakette (Euronorm 6) ist eine Maßnahme um zukünftig lokale Überhöhungen von Schadstoffausstößen in Städten entgegenzuwirken. So werden heute schon in vielen Städten Grenzwerte für Stickstoffoxide in der Luft überschritten. [7] Auch die primär durch Dieselfahrzeuge verursachte Feinstaubbelastung in Großstädten wie Stuttgart führt zu einem Bedarf von lokal emissionsfreiem Fahren. Bei der Auslegung der elektrischen Fahranteile der Hybridantriebsstränge ist die elektrische Reichweite so zu dimensionieren, dass in feinstaubbelasteten Bereichen ohne Verbrennungsmotor gefahren werden kann.

Ab September 2017 soll der bisherige Zertifizierungsprozedur und der dabei herangezogene „Neue Europäische Fahrzyklus“ (NEFZ) durch die „Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure“ (WLTP) abgelöst werden. [8] Die Prozedur bezieht sich auf einen realitätsnäherer Fahrzyklus, der auf Basis realer Fahrdaten erarbeitet wurde – den WLTC. Dieser enthält auch Varianten für unterschiedliche Fahrzeugarten und Einsatzgebiete. Für voll- und hybrid-elektrische Fahrzeuge sowie für Plug-In-Hybride mit Maximalgeschwindigkeiten unter 120 km / h gilt die Variante WLTC 3a. Entsprechende Fahrzeuge, die höhere Spitzengeschwindigkeiten erreichen, gilt die Variante WLTC 3b. Des Weiteren müssen Plug-In-Hybride und vollelektrische Fahrzeuge zusätzlich im sogenannten WLTCcity geprüft werden. Dieser umfasst die Stadt-üblichen Geschwindigkeitsbereiche und ist eine Teilmenge des WLTC. [9]

Zwar bietet der WLTC und seine Varianten eine größere Realitätsnähe als der NEFZ, dennoch findet die Messung unter Laborbedingungen und einem exakten Geschwindigkeitsprofil folgend statt. Um den realen Verbrauch und Schadstoffausstoß zukünftig beurteilen zu können, wird aktuell die Messung während Realfahrten - Real-Driving-Emissions (RDE) - diskutiert. Um die gemessenen Verbrauchswerte vergleichbar zu machen, sollen die realen Fahrten gemeinsamen Kriterien unterliegen. So wird die Fahrt beispielsweise anhand der Fahrgeschwindigkeiten in die Anteile Stadt, Land und Autobahn unterteilt. Jeder Abschnitt sollte dabei mindestens 16 km lang sein. Auch die Abfolge der Abschnitte wird definiert, so muss die Fahrt in der Stadt beginnen und dann über Land und Autobahn fortgesetzt werden. Start- und Endpunkt dürfen dabei um maximal 100 m ü M abweichen. Um auch vergleichbare Verkehrssituationen während der Fahrt zu ermöglichen, muss diese während Arbeitstagen durchgeführt werden. [10]

Neben den genannten Anreizen für Fahrzeughersteller werden auch Anreize für Käufer geschaffen. So bezuschusst der Bund Erstzulassungen ab dem 18. Mai 2016 von vollelektrischen Fahrzeugen, Brennstoffzellenfahrzeugen und Plug-In Hybriden. Voraussetzung ist, dass sich das Fahrzeug auf der Liste der förderfähigen Fahrzeuge befindet und für mindestens sechs Monate in Deutschland auf den Antragsteller zugelassen bleibt. Plug-In-Hybride mit einem CO₂-Ausstoß von weniger als 50 g / km werden dabei mit 1.500 € vom Bund gefördert. Die Förderung wird jedoch nur dann gewährt, wenn der Fahrzeughersteller mindestens die gleiche Summe an Nachlass gewährt. Es ergibt sich für den Käufer also ein Vorteil von mindestens 3.000 €

3.2 Kunden- und Anwendungsprofil

Die Ermittlung der Kundenanforderungen basieren auf verschiedenen Datensätzen. Daten der Stadt Karlsruhe zu den aktuell zugelassenen Personenkraftwagen [11] liefern sowohl Rückschlüsse auf die vom Kunden gewünschte Motorleistung (siehe Abbildung 2), als auch Informationen über die jeweiligen Modelle und deren Charakteristika. Die weiterführenden Kenndaten beruhen auf 16 Fahrzeugmodellen, die im gewählten Leistungsbereich die größte Nachfrage erfahren haben.

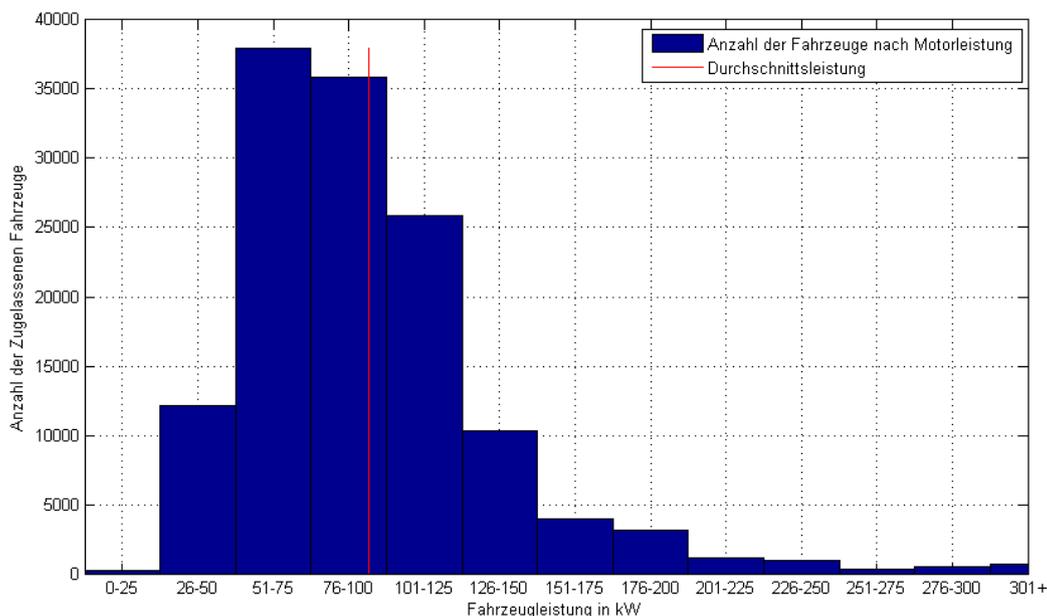


Abbildung 2: Motorleistung von Fahrzeugen mit Zulassung in Karlsruhe, Juni 2016

Als Grundlage für eine Abschätzung der täglichen Fahrstrecke dienen Daten über Pendler, die entweder ihren Wohnsitz in Karlsruhe haben und im Umland arbeiten (die sogenannten Auspendler), bzw. die in Karlsruhe arbeiten und im Umland wohnen (die sogenannten Einpendler). Diese Daten werden vom Statistischen Landesamt in Baden-Württemberg in regelmäßigen Abständen erfasst. [12]

Tabelle 1: Pendelentfernung Aus-/Einpendler Karlsruhe 2005 (einfache Strecke)

	bis 15 km	16 bis 30 km	31 bis 50 km	über 50 km
Auspendler	10.777	8.981	4.108	6.568
Auspendler [%]	35%	30%	13%	22%
Einpendler	30208	36907	16851	11983
Einpendler [%]	31%	38%	18%	12%

Aus den Daten in Tabelle 1 geht hervor, dass bereits eine zuverlässige Reichweite von 100 km ausreichen würde, um die tägliche Pendelstrecke von >85% der Pendler im Großraum Karlsruhe bewältigen zu können.

Basierend auf Frequentierung der einzelnen Pendelstrecken lässt sich ebenfalls aus diesen Daten eine realistische Verteilung von urbanem, rurealem und Autobahnverkehr ermitteln, dessen Daten in die Ermittlung eines Fahrzykluses einfließen können.

Tabelle 2: häufigste Pendlerstrecken von/nach Karlsruhe 2005

Strecke zwischen Karlsruhe und	Gesamtstrecke [km]	innerstädtisch [km]	Überland [km]	Autobahn [km]
Ettlingen, Stadt	9,9	5	4,9	0
Stutensee, Stadt	10,6	10,6	0	0
Rheinstetten, Stadt	11,5	4,6	6,9	0
Eggenstein-Leopoldshafen	10	4,5	5,5	0
Pfinztal	10,7	7	3,7	0
Bruchsal, Stadt	22,6	8,9	13,7	0
Wörth am Rhein, Stadt	14,2	4,5	9,7	0
Linkenheim-Hochstetten	17,3	4,8	12,5	0
Durmersheim	15,2	4,9	10,3	0
Malsch	18,7	5	13,7	0
Karlsbad	15,9	4,2	4,7	7
Rastatt, Stadt	26,6	4,5	6,5	15,6
Waldbronn	14,5	4,4	3,1	7
Weingarten (Baden)	13,8	4	9,8	0
Walzbachtal	19	7,4	11,6	0

Pforzheim, Stadt	28,7	5,8	3,3	19,6
Graben-Neudorf	21,6	4,7	16,9	0
Bretten, Stadt	25,9	7,6	18,3	0
Baden-Baden, Stadt	40,2	3	11,5	25,7
Dettenheim	20,1	4	16,1	0
Stuttgart	79,2	3,1	13,7	62,4
Heidelberg	53,2	3,8	5,3	44,1
Frankfurt	139	9,9	1,3	127,8
Walldorf	43,4	4,4	2,4	36,6

Als Konsequenz aus der vorgenannten Festlegung auf eine einfache Fahrstrecke von 50 km im Pendlerzyklus, sind für die weitere Betrachtung vor allem Strecken mit ähnlicher Länge besonders interessant. Ausgehend von den häufigsten Fahrstrecken aus Tabelle 2 bieten sich deshalb vor allem die Strecken von Karlsruhe nach Baden-Baden, Walldorf bzw. Heidelberg für die weitere Betrachtung an.

3.3 Fahrzyklen zur Antriebssystemoptimierung

Basierend auf den in 3.1 "Gesetzgebung und Zertifizierung" sowie 3.2 „Kunden- und Anwendungsprofil“ festgelegten Rahmenbedingungen werden Fahrzyklen generiert. Um verschiedene Anwendungsfälle und Energiebedarfe [13] abdecken zu können, werden neben dem Homologationszyklus WLTC, ein Pendlerzyklus und ein RDE-Zyklus betrachtet:

- Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle (WLTC): Zur Zertifizierung von Euro-6-Fahrzeugen wird ab 2017 der WLTC den Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ablösen. Die United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) legt hierfür drei Klassen in Abhängigkeit von Nennleistung und Fahrzeugleergewicht fest. Der WLTC für Klasse 3b mit $\frac{P_{Nenn}}{m_{leer}} > 34$ ist in Abbildung 3 zu sehen.

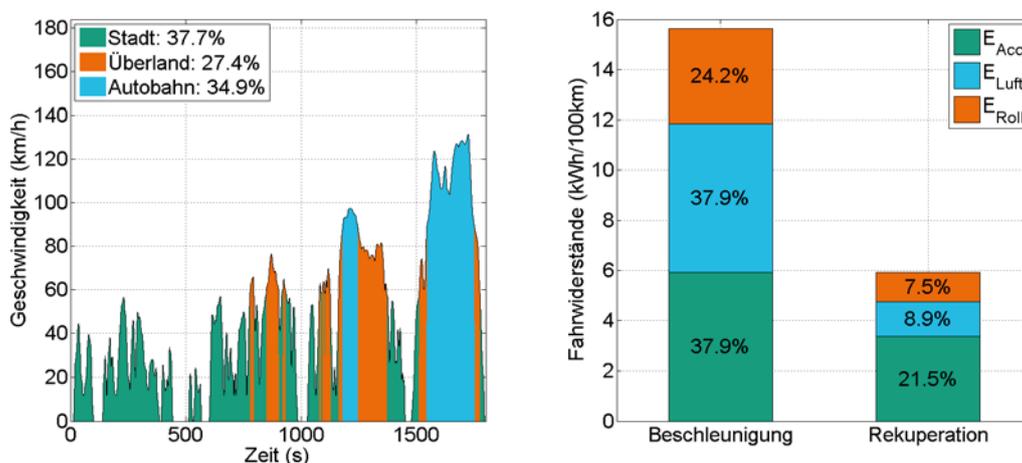


Abbildung 3: WLTC: Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm links. Abgeleitete Fahrwiderstände und Rekupe-rationspotential rechts.

- Real Driving Emissions (RDE): Um Abgasemissionen von PKWs im realen Fahrbetrieb bewerten zu können werden für Prüffahrten Randbedingungen durch das Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission festgelegt. Diese umfassen neben einer prozentualen Aufteilung in Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt auch die maximale Fahrstrecke und Dauer, sowie Geschwindigkeit, Beschleunigung und Temperatur. [14] Aus diesen Nebenbedingungen lassen sich auf Basis vorhandener Fahrdaten RDE-Fahrzyklen ableiten. Ein beispielhafter Fahrzyklus der alle RDE-Kriterien erfüllt ist in Abbildung 4 dargestellt.

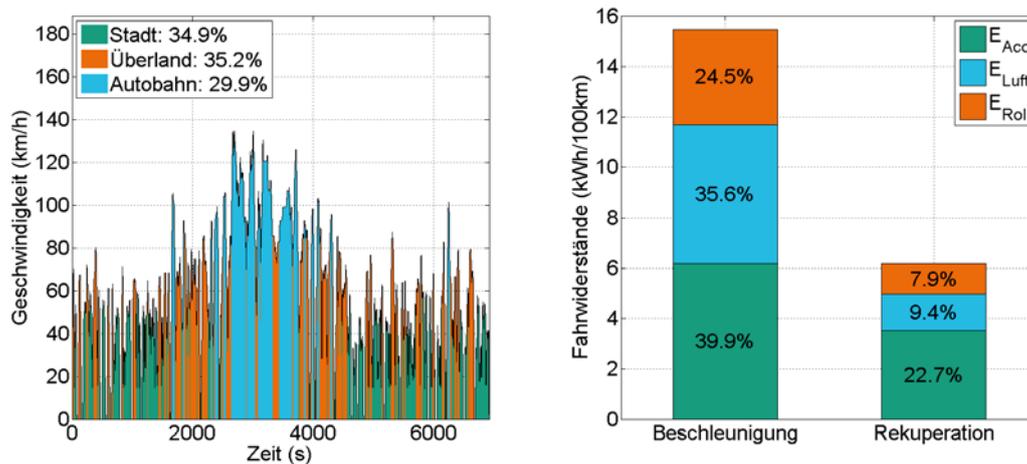


Abbildung 4: RDE-Fahrzyklus: Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm links. Abgeleitete Fahrwiderstände und Rekuperationspotential rechts.

- Repräsentativer Zyklus für die Individualmobilität in Karlsruhe: Auf Basis der in 3.2 „Kunden- und Anwendungsprofil“ ermittelten Kundendaten wird ein repräsentativer Zyklus für den Raum Karlsruhe entwickelt. Hierfür wird eine Matrix aus klassifizierten Fahrzeugbeschleunigungen und Folgebeschleunigungen genutzt, die kombiniert zu einer Geschwindigkeitsverteilung führen. Als Nebenbedingung wird die durchschnittliche Fahrstrecke und eine zugehörige Fahrstreckenverteilung aus 3.2 verwendet. Ein solcher Fahrzyklus ist in Abbildung 5 zu sehen.

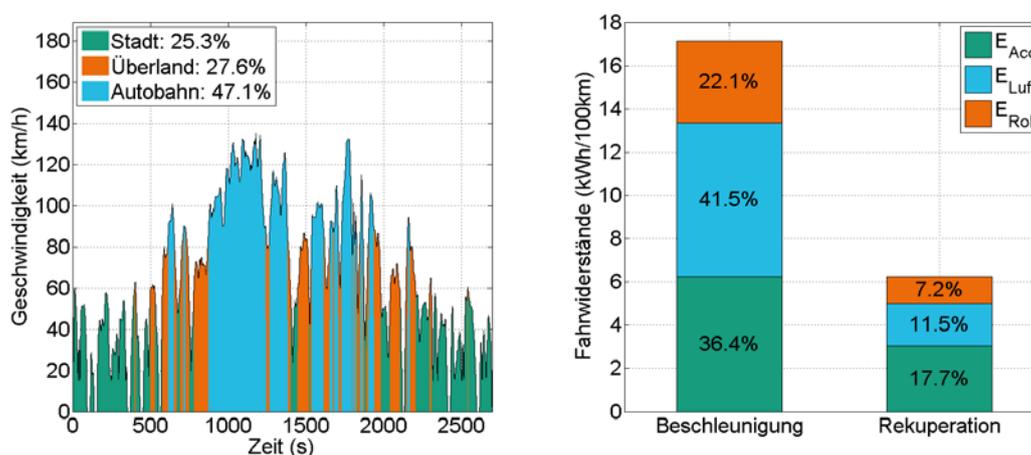


Abbildung 5: Pendler-Zyklus: Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm links. Abgeleitete Fahrwiderstände und Rekuperationspotential rechts.

Aus den Geschwindigkeit-Zeit-Daten der Fahrzyklen lassen sich, mit Hilfe eines beliebigen Zielfahrzeugs, Fahranforderungen ableiten. Im Folgenden ein beispielhaftes Zielfahrzeug aus dem Fahrzeugsegment M, siehe Tabelle 3:

Tabelle 3: Beispielhaftes Zielfahrzeug aus dem Fahrzeugsegment M [15]

Fahrzeugmasse m	1.390 kg
Strömungswiderstandskoeffizient c_W	0,29
Fahrzeugfrontfläche A	2,38 m ²
Rollwiderstandskoeffizient c_R	0,01
Luftdichte ρ_L	1,204 kg/m ³

Für eine erste Analyse werden folgende Fahrwiderstände betrachtet, vgl. [16]:

Beschleunigungswiderstand: $F_B = m \cdot a$

Kraft die aufgebracht werden muss um das Fahrzeug auf eine gewünschte Sollgeschwindigkeit zu beschleunigen.

Luftwiderstand: $F_L = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot \rho_L \cdot v^2$

Der Luftwiderstand wird abhängig vom fahrzeugspezifischen Strömungswiderstandskoeffizient c_W , der Fahrzeugfrontfläche A und der Luftdichte ρ_L berechnet.

Rollwiderstand: $F_R = c_R \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha$

Fahrwiderstand der aufgrund der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn, sowie Reifenverformung zustande kommt, mit Rollwiderstandskoeffizient c_R und Steigungswinkel α .

Steigungswiderstand: $F_S = m \cdot g \cdot \sin \alpha$

Fahrwiderstand aufgrund einer Höhendifferenz, mit Steigungswinkel α .

In Tabelle 4 sind die Fahranforderungen der drei verschiedenen Fahrzyklen zusammengefasst. Das Rekuperationspotential beschreibt den prozentualen Anteil der kinetischen Energie, abzüglich der dissipativen Anteile von Roll- und Luftwiderstand, welcher im Idealfall wieder vollständig in nutzbare Energieformen gewandelt werden kann (siehe Abbildung 3-5 rechts) und stellt somit das theoretische Maximum dar.

Tabelle 4: Strecken- und Fahranforderung der drei unterschiedlichen Fahrzyklen

	WLTC	RDE-Zyklus	Pendler-Zyklus
Gesamtzeit [min]	30	115	45
Fahrstrecke [km]	23,3	108,8	49,1
Max. Geschwindigkeit [km/h]	131,3	134,6	135,1
Mittlere Fahrgeschwindigkeit [km/h]	53,5	61,2	69,3
Mittlere Beschleunigung [m/s ²]	0,41	0,5	0,47
Mittlere Verzögerung [m/s ²]	-0,42	-0,49	-0,46
Anzahl der Stopps pro Kilometer	0,39	0,20	0,24
Anzahl der Beschleunigungen pro Kilometer	2,75	2,32	2,42

Rekuperationspotential [%]	21,5	22,7	17,7
Stillstandszeit [%]	13	7,7	5,6
Energie gesamt [kWh/100km]	15,6	15,5	17,1
Beschleunigung [kWh/100km]	5,92	6,18	6,24
Luftwiderstand [kWh/100km]	5,92	5,51	7,12
Rollwiderstand [kWh/100km]	3,79	3,79	3,79
Verteilung Stadt [%]	37,7	34,9	25,3
Verteilung Überland [%]	27,4	35,2	27,6
Verteilung Autobahn [%]	34,9	29,9	47,1

Der RDE-Zyklus stellt sowohl zeit-, wie auch streckenbezogen die mit Abstand höchsten Anforderungen an den Antriebsstrang. Durch die gewählte Streckenverteilung beim Pendler-Zyklus ist die mittlere Geschwindigkeit höher als bei den anderen Fahrzyklen, was direkte Auswirkungen auf den zu überwindenden Luftwiderstand hat. Der Rollwiderstand ist, wie oben beschrieben, für diese erste Betrachtung nicht abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit und unterscheidet sich relativ gesehen für die Fahrzyklen nicht. Das Rekuperationspotential beim Pendlerzyklus mit 17,7% aufgrund des hohen Autobahnanteils am geringsten.

Für die Auslegung der Antriebssystemtopologie stehen damit drei grundverschiedene Fahrzyklen zur Verfügung die für jede Systemkomponente andere Anforderungen stellt und damit die Optimierungsgrundlage bildet.

4 Ausblick

Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens integriert entwickelte Antriebssystem wird kann durch die Verknüpfung mit Forschungsergebnissen aus den Bereichen Systemleichtbau, CO₂-Neutrale Mobilität – wie sie auch in der Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe – gewonnen werden unter Energieeffizienzaspekten weiterentwickelt. Die Forschungsarbeiten im Bereich des vernetzten und autonomen Fahrens bilden die Basis für neue Fahr- und Betriebsstrategien. Diese werden unter der Zielsetzung minimale Energieverbräuche zu realisieren, zusammen mit weiteren innovativen Antriebssystemlösungen in der Profilregion erforscht und gemeinsam mit industriellen Partnern industrialisiert.

5 Förderhinweis

Diese Veröffentlichung ist entstanden im Rahmen der Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe, gefördert aus Mitteln der Ministerien für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau des Landes Baden-Württemberg und als nationales Leistungszentrum aus Mitteln der Fraunhofer-Gesellschaft.

6 Literatur

- [1] A. Albers, M. Behrendt, und S. Klingler, „Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess“, in *Handbuch Produktentstehung*, Carl Hanser Verlag, 2016.
- [2] K. Matros, F. Schille, M. Behrendt, und H. Holzer, „Manoeuvre-based validation of hybrid powertrains“, *ATZ*, Nr. 02/2015, 2015.
- [3] A. Albers, K. Bause, S. Klingler, R. Puls, M. Behrendt, und IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), „Schaltbare Getriebe für Elektrofahrzeuge am Beispiel urbaner Nutzungsszenarien“, 2015.
- [4] A. Albers, T. Reuschlé, A. Babik, und A. Schönknecht, „Multi-Objective Optimization of Plug-In Hybrid Powertrains – Certification Procedure Sensitivity“, in *Elektrische Traktions- und Hilfsantriebe für die Elektrifizierung und Hybridisierung von Kraftfahrzeugen*, Expert-Verlag, 2016.
- [5] Europäisches Parlament, *Verordnung (EG) zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*. 2009.
- [6] „CO₂ Regulierung bis 2020 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge - VDA“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/co2-regulierung-bis-2020/co2-regulierung-bis-2020-fuer-pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge.html>. [Zugegriffen: 20-Okt-2016].
- [7] heise online, „Blaue Umweltplakette soll kommen – Diesel bleibt billiger als Benzin“, 08-Apr-2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Blaue-Umweltplakette-soll-kommen-Diesel-bleibt-billiger-als-Benzin-3165391.html>. [Zugegriffen: 20-Okt-2016].
- [8] „Der WLTP für realitätsnahe Testprozeduren - VDA“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/abgasemissionen/wltp-weltweit-harmonisierter-zyklus-fuer-leichte-fahrzeuge.html>. [Zugegriffen: 20-Okt-2016].
- [9] UNECE, *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure*. .
- [10] S. Lipp, „Gesetzliche Randbedingungen RDE (Real Driving Emissions)“, gehalten auf der Haus der Technik, 06-Juli-2016.
- [11] „Aufstellung aller in Karlsruhe Stadt zugelassenen PKW“, 14-Juni-2016.
- [12] „Berufspendler in Baden-Württemberg“, 2005.
- [13] D.-I. Burkert, „WLTP heizt die CO₂-Debatte an“, *ATZ*, S. 32–37, 2014.
- [14] European Commission, *Commission Regulation: amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6)*, Bd. 692/2008. 2016.
- [15] Europäische Kommission, *Leitfaden zum Kraftfahrzeugvertrieb und Kundendienst in der Europäischen Union.*, Bd. 1400/2002. 2002.
- [16] J. Liebl und M. Lederer, *Energiemanagement im Kraftfahrzeug: Optimierung von CO₂-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*, 1. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014.