

# **Hybridbetriebsstrategien mit elektronischem Horizont – ein Gemeinschaftsprojekt der Daimler AG, der Volkswagen AG und dem ika**

## *Hybrid Operating Strategies with Electronic Horizon – A Cooperative Project of Daimler AG, Volkswagen AG and ika*

Dipl.-Ing. Felix **Töpler**

Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen University, Aachen

Dipl.-Ing. Peter **Antony**, Dipl.-Ing. Sebastian **Langhammer**

Daimler AG, Stuttgart

Dr.-Ing. Roland **Kube**, Dipl.-Ing. Siegfried **Köhle**

Volkswagen AG, Wolfsburg

### **Zusammenfassung**

Mit der Markteinführung von hybriden Fahrzeugantrieben wechselt der Fokus in der Entwicklung dieser Systeme. Die Frage nach dem generellen Einsatz der Hybridtechnik wird durch die Überlegung, welches Hybridsystem zu realisieren ist, abgelöst. Zudem gewinnt ein weiterer Aspekt immer mehr an Bedeutung: „Die optimale Regelung und Steuerung des Antriebssystems im Hybridfahrzeug“. Hier steht neben der Verbesserung der Hybrid-Basissteuerung die Einbeziehung von Umgebungs- und Vorausschauinformationen mit dem Ziel der Kraftstoffverbrauchsreduktion im Fokus der derzeitigen Forschungsaktivitäten.

Arbeitsinhalte zum Thema der Integration von Vorausschau- und Umgebungsinformationen in Hybridfahrzeugen der neuesten Generation sind in dem hier vorgestellten Projekt „Energiemanagement II“ zusammengefasst. Projektpartner bei diesem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Vorhaben sind die Daimler AG, die Volkswagen AG und das ika. Alle Partner waren bereits am Vorgängerprojekt („Energiemanagement I“) beteiligt und haben auf Basis der dort gewonnenen Erkenntnisse Algorithmen zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen entwickelt. Es wurden unterschiedliche Regelalgorithmen für ein Fahrzeug der Luxusklasse (Daimler AG), der Mittelklasse (Volkswagen AG) und der Subkompaktklasse (ika) realisiert und angepasst. Die Gesamtlaufzeit des Vorhabens betrug 45 Monate.

## Summary

With market introduction of hybrid powertrains the main focus of development has changed. The question if hybrid technology should be used in future has been replaced by the question which hybrid concept should be realised. Furthermore there is another aspect getting more and more importance: "The optimal control strategy for propulsion systems in hybrid electric vehicles". Besides an optimisation of the basic operating strategy the usage of environmental information and advance driver assistance systems (ADAS) is in focus of current research activities aiming on a further reduction of fuel consumption.

The presented project "Energy Management II" covers the integration of predictive driving information and environmental information in hybrid vehicles of the second generation. Project partner within this by the federal ministry of economics and technology funded activity are the Daimler AG, the Volkswagen AG and the ika. All partners have also participated in the previous project ("Energy Management I") and have developed algorithms for an energy optimised operating of hybrid vehicles based on the previously gained results. Different control algorithms have been realised and calibrated for a luxury class vehicle (Daimler AG), a mid-seize vehicle (Volkswagen AG) and a subcompact class vehicle (ika). The overall project duration was 45 months.

## 1 Einführung

Klimawandel, steigende Energiekosten und Schadstoffemissionen stellen die Rahmenbedingung für die Entwicklung verbrauchs- und emissionsarmer Fahrzeuge dar. Ein vielversprechender Ansatz, den Energiebedarf eines Fahrzeugs im Betrieb zu reduzieren, ist der Hybridantrieb [1]. Praxistests mit Hybridfahrzeugen zeigen jedoch, dass das tatsächliche Verbrauchsminderungspotential stark von der Verkehrsart und der Fahrweise des Fahrzeugführers abhängt.

Im Allgemeinen sind jedoch Verbrauchseinsparungen von mehr als 25 % möglich. Ein weiteres Einsparpotential erschließt sich dem mitdenkenden und vorausschauenden Fahrer bzw. einer entsprechenden Betriebsstrategie [2], [3]. An dieser Stelle setzt das vorliegende Projekt an: Aufbauend auf modernsten Antriebsstrangkonzzepten wird ein vorausschauendes Funktions- und Energiemanagement für Hybridfahrzeuge entwickelt und in drei Fahrzeugen unterschiedlicher Klassen im Praxisbetrieb demonstriert. Ziel der vorausschauenden Betriebsstrategie für hybride Antriebssysteme ist, den Kraftstoffverbrauch weiter zu senken ohne das Komfortverhalten und damit die Nutzerakzeptanz zu beeinträchtigen. Um diese Ziele und damit einen bestmöglichen und effizienteren Betrieb von Hybridfahrzeugen sicherzustellen, ist eine Optimierung der bisher eingesetzten Betriebsstrategien notwendig.

Diese Optimierung beinhaltet die Einbeziehung nicht fahrzeugspezifischer Parameter [4], [5]. Ein großes Potential bietet die Adaption der sog. „vorausschauenden Fahrweise“ an die spezifischen Eigenschaften von hybriden Antriebssträngen. Die Implementierung von nicht fahrzeugspezifischen Parametern in die Antriebstrangsteuerung, die sich z. B. aus dem umgebenden Verkehr, der Streckentopographie und der Beschilderung ergeben, setzt eine geeignete Informationsquelle über diese Parameter im Fahrzeug voraus. Grundsätzlich können diese Informationsquellen fahrzeugautonom oder infrastrukturgestützt sein.

Im Rahmen des hier beschriebenen Projekts hat die Daimler AG ein Forschungsfahrzeug der Luxus-, die Volkswagen AG eines der Mittel- und das ika eines der Subkompaktklasse aufgebaut. Die Vorausschauoftware, welche über die Digitalkarte Informationen für das Antriebsmanagement bereitstellt, stammt in allen drei Fahrzeugen vom ika. Die eigentliche Betriebsstrategie sowie der Aufbau der Fahrzeuge ist hingegen von jedem Projektpartner selbstständig durchgeführt worden.

In den Regelkreis der Fahrzeugführung kann der Fahrer über zwei Prinzipien der Mensch-Maschine-Schnittstelle eingebunden werden.

1. Leistungswunsch des Fahrers wird optimal vom Antriebsmanagement umgesetzt, oder
2. Dem Fahrer werden Vorgaben für den Leistungswunsch gemacht.

Aus älteren Forschungsvorhaben und Fahrversuchen ist bekannt, dass bei dem ersten Prinzip die Fahrerakzeptanz höher ist, das Verbrauchspotenzial jedoch geringer ist. Bei dem zweiten Prinzip mit der direkten Geschwindigkeitsbeeinflussung ist hingegen eine geringere Nutzerakzeptanz zu erwarten, da sich einige Fahrer bevormundet fühlen könnten. Allerdings ist das Verbrauchssenkungspotential höher.

In dem beschriebenen Projekt hat sich die Daimler AG für die erste Variante der vorausschauenden Betriebsstrategie entschieden, während die Volkswagen AG und das ika die direkte Geschwindigkeitsbeeinflussung gewählt haben. Das Projekt nutzt die Ergebnisse des Vorprojektes „Ganzheitliche fahrzeugautonome und infrastrukturgestützte vorausschauende Energiemanagement-Strategien für hybride Antriebssysteme“. Dieser Vorläufer des hier beschriebenen Projektes hat eine rein simulationsgestützte Optimierung der Betriebsstrategien von Hybridfahrzeugen durchgeführt.

Auf Basis dieses Nachfolgevorhabens wurde die Realisierung der in der Simulation umgesetzten Konzepte in Form real aufzubauender Hybridfahrzeuge, in denen die vorausschauende Fahrweise adaptiert wird, durchgeführt. Hierzu haben die bisherigen Projektpartner ika, Daimler AG und Volkswagen AG je einen Demonstrator aufgebaut. Insgesamt sind die Fahrzeugklassen von Subkompakt bis hin zur Luxusklasse abgedeckt worden.

## 2 Aufbau der Hybridfahrzeuge

Die vorausschauende Betriebsstrategie soll so ausgelegt werden, dass sie in Hybridfahrzeuge der neuesten Generation integriert werden kann. Neben der Anbindung einer Elektromaschine in den bestehenden konventionellen Antriebsstrang stellt vor allem die Wahl und Integration eines geeigneten Energiespeichers eine Herausforderung dar. Die Li-Ionen Batterietechnologie zeichnet sich gegenüber bisher verwendeten Akkumulatoren u.a. durch eine höhere Energie- und Leistungsdichte, eine geringere Selbstentladung sowie einen größeren zulässigen Ladehub aus.

Das Potenzial der Li-Ionen Technologie hat bei allen drei Projektpartnern zu der Entscheidung geführt, eine Li-Ionen Batterie einzusetzen. Die Antriebsstrangkongfiguration entspricht bei allen Fahrzeugen der eines Parallelhybrids. Die installierte elektrische Leistung und die Anordnung der Elektromaschine ermöglicht alle typischen Hybridfunktionen, sodass die Fahrzeuge als Vollhybride anzusehen sind.

### 2.1 Forschungsfahrzeug der Daimler AG

Beim Versuchsfahrzeug der Daimler AG handelt es sich um einen Mercedes Benz CLS mit 3,5 l 6 Zylinder Ottomotor mit Direkteinspritzung und Schichtladung. Das Getriebe basiert auf dem in diesem Fahrzeug serienmäßig verfügbaren 7-Gang-Automatgetriebe, welches durch die Integration einer 45 kW E-Maschine zum Hybridgetriebe umgebaut wurde. Mit dem so entstandenen Parallelhybriden sind sowohl rein verbrennungsmotorische Fahrt, hybridische Fahrt, rein elektrische Fahrt wie auch Bremsrekuperation und Boostbetrieb möglich. Damit sind die wesentlichen Fahrfunktionen für eine optimale Nutzung einer Vorausschaustrategie gegeben. Die Batterie basiert auf der Li-Ionen Technologie und hat eine Nennspannung von 360 V, einem Energieinhalt von 2,5 kWh und einer max. Entladeleistung von ca. 50 kW. Das Fahrzeug mit den Hybridkomponenten ist in Abb. 1 zu sehen.

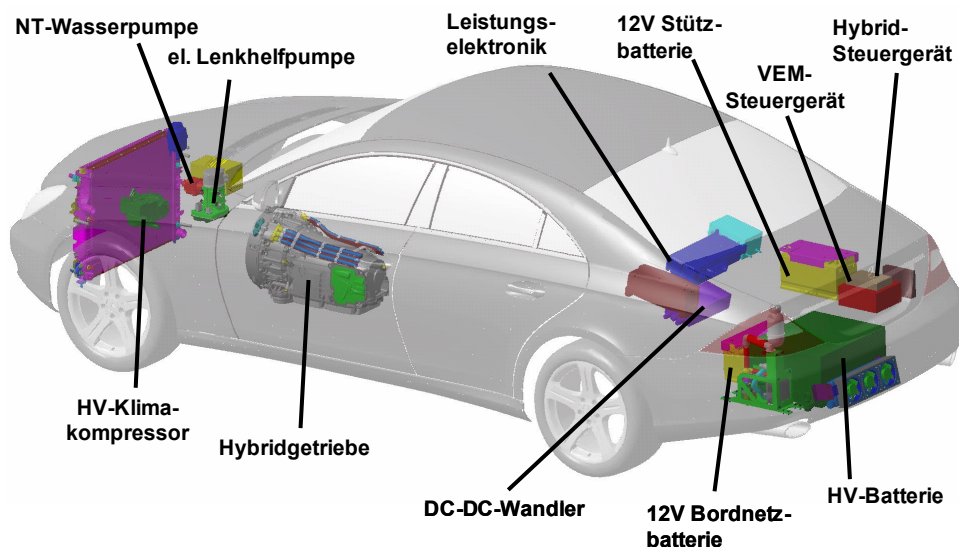


Abb. 1: Mercedes-Benz CLS Forschungsfahrzeug  
*Mercedes-Benz CLS Research Vehicle*

Neben dem Motorsteuergerät welches über einen Freischnitt mit einer MicroAutoBox (Hybridsteuergerät) kommuniziert, wurde ein weiteres Steuergerät für die Bereitstellung der Vorausschautdaten installiert (VEM-Steuergerät). Auf der MicroAutoBox und in der Motorsteuerung laufen die Basisfunktionen für die Verbrenner- und Hybridsteuerung. Zusätzlich wurde auf der MicroAutoBox die vorausschauende Betriebsstrategie implementiert. Über einen Taster am modifizierten Infotainmentsystem des Fahrzeugs kann der Fahrer zwischen der vorausschauenden- oder der Basisbetriebsstrategie wählen.

Verbrennungsmotor	3,5 l V6 / 215 kW / 365 Nm
Kraftstoff/Brennverfahren	Otto/DES
Elektromotor	45 kW / 350Nm
Batteriezelltyp	Li-Ionen
Batterienennspannung	360 V
Batterienennkapazität	7 Ah

Tab. 1: Technische Fahrzeugdaten der Daimler AG  
*Technical Vehicle Data Daimler AG*

Ein auf dem Armaturenbrett verbautes Display versorgt im Testbetrieb den Fahrer mit Informationen über die Vorausschautstrecke. Wegen der noch nicht flächendeckend verfügbaren Topologiedaten wurde die Bereitstellung der Streckendaten des vermessenen Aachener Rundkurs auf Basis von dem für alle Projektpartner identischen Vorausschausystem des ika realisiert. Darauf aufbauend wurden von den Projektpartnern unterschiedliche Ansätze für die vorausschauende Betriebsstrategien verfolgt und umgesetzt.

## 2.2 Projektfahrzeug der Volkswagen AG

Abb. 2 zeigt den von der Volkswagen AG auf Basis des Touran aufgebauten Demonstrator. Sein Antriebsstrang besitzt einen TFSI Motor mit einem maximalen Drehmoment von 200 Nm und einer Leistung von 85 kW.



Abb. 2: Projektdemonstrator der Volkswagen AG  
*Project Demonstrator of Volkswagen AG*

Das Getriebe wird durch ein 7-Gang Doppelkupplungsgetriebe (DSG) dargestellt. Beim elektrischen Antrieb handelt es sich um eine über Permanentmagnete erregte Synchronmaschine (PSM), die für Drehzahlen von bis zu 6000 U/min bei einer Spitzenleistung von 22 kW betrieben werden kann. Das auf Li-Ionen Technologie basierende Traktionsbatteriesystem besitzt einen nominellen Energieinhalt von 1,51 kWh resultierend aus einer nominellen Spannung von 216 V und einer nominellen Kapazität von 7 Ah. Die Leistung liegt mit 25 kW leicht über der des Elektromotors. Das Gewicht des Traktionsbatteriesystems beträgt 44 kg bei einem Volumen von 50 Litern.

Alle Aggregate sind über CAN-Bus miteinander vernetzt und werden über diesen in ihrer Funktion koordiniert. Das entsprechende Funktionsmanagement hat zum Ziel, einen maximalen Fahrkomfort bei gleichzeitig minimalem Kraftstoffverbrauch darzustellen. Unter Berücksichtigung des jeweiligen Energieinhalts der Traktionsbatterie wird dabei für den aktuellen Fahrzustand die energieoptimale Betriebsart, wie elektrisches oder verbrennungsmotorisches Fahren, aktiviert. Um mit Hilfe des Vorausschaumoduls auch zukünftige Fahrzustände mit in das Funktions- und Energiemanagement einbeziehen zu können, ist ein zusätzliches Rechnersystem zwischen den Steuergeräten von Antriebsstrang und Li-Ionen Batterie vorgesehen (Abb. 4).



1,4l TSI-Verbrennungsmotor  
1,4l TSI Combustion Engine



Direktschaltgetriebe  
Direct Shift Gear Box



Elektrotraktion  
Electrotraction



Li-on-Traktionsbatterie  
Li-on-Traction Battery

Abb. 3: Antriebskomponenten  
Drivetrain Components

Es stellt Informationen über zukünftig maximal mögliche Fahrzeuggeschwindigkeiten, resultierend aus Straßenkategorien, Geschwindigkeitsbeschränkungen sowie Kurvenradien bereit und ermöglicht somit eine Prädiktion der für minimalen Kraftstoffverbrauch erforderlichen Hybridmodi als Funktion der Fahrstrecke. Spezieller Fokus liegt dabei auf den Verzögerungsphasen des Fahrzeugs, die so gestaltet werden, dass sich ein maximales Rekuperations- bei gleichzeitig minimalem mechanischen Bremsmoment ergibt.

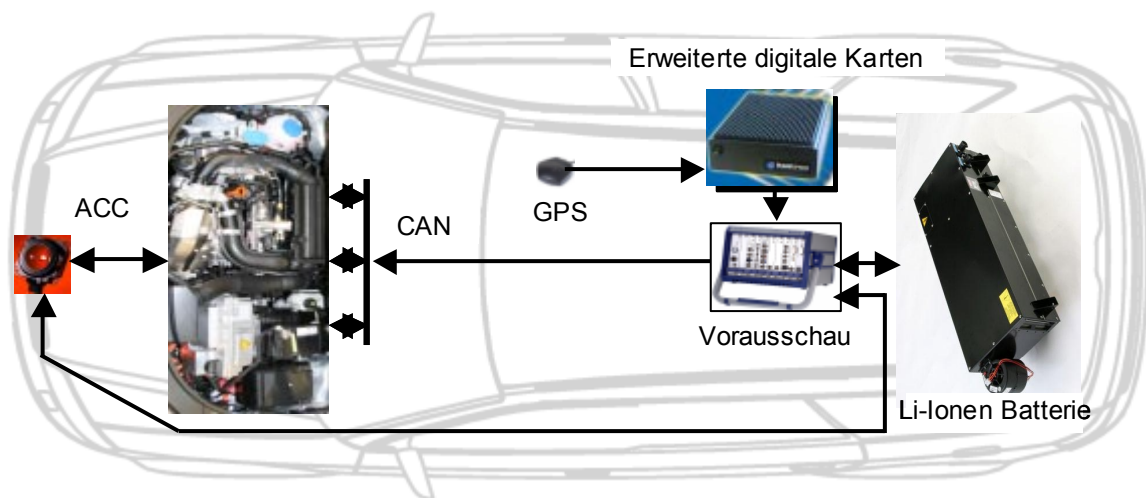


Abb. 4: Demonstratorsystem der Volkswagen AG  
*Demonstrator System of Volkswagen AG*

Fahrzeugmasse	1650 kg
Leistung des Verbrennungsmotors	110 kW
Kraftstoff	Otto
Leistung des Elektromotors	21 / 12 kW
Batteriezelltyp	Li-Ionen
Batterienennspannung	216 V
Batterienennkapazität	7 Ah

Tab. 2: Technische Fahrzeugdaten der Volkswagen AG  
*Technical Vehicle Data of Volkswagen AG*

Das Fahrzeug besitzt hierfür ein Adaptive Cruise Control (ACC)-System (Abb. 4), dessen Sollgeschwindigkeit vom Vorausschaurechnersystem im energieoptimalen Sinn vorgegeben wird.



### 2.3 Projektfahrzeug ika Hybrid III

Das ika hat im Rahmen des hier beschriebenen Projekts den Auftrag erhalten, ein Fahrzeug der Subkompaktklasse zu hybridisieren und mit einer vorausschauenden Betriebsstrategie auszustatten. Mit Hilfe von Simulationsprogrammen hat sich ein Fahrzeug mit den in Tab. 3 aufgeführten technischen Eckdaten als sinnvolle Variante herausgestellt. Das konventionelle Basisfahrzeug wurde dem ika von der Adam Opel GmbH freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Der Antriebsstrang ist mit einem automatisierten Schaltgetriebe ausgestattet und entspricht einem Parallelhybrid mit einem zwischen Getriebe und Differential angeordneten Elektromotor. Zur Realisierung des erweiterten ACC Betriebes ist das Fahrzeug mit einem Lidar-Sensor von Hella ausgestattet, um die Relativgeschwindigkeit und den Abstand zum Vorderfahrzeug zu messen.

Fahrzeugmasse	1250 kg
$c_w \cdot A$	0.62 m <sup>2</sup>
Leistung des Verbrennungsmotors	44 kW
Kraftstoff	Otto
Leistung des Elektromotors	37 kW
Batteriezelltyp	Li-Ionen
Batterienennspannung	288 V
Batterienennkapazität	7,5 Ah

Tab. 3: Technische Fahrzeugdaten ika Hybrid III  
*Technical Vehicle Data ika Hybrid III*

Die E-Maschine dient als Bremsaktuator während des ACC Betriebs und wird bei Bedarf von einem aktiven Bremskraftverstärker von TRW unterstützt. Ein großes Infodisplay dient als zusätzliche Informationsquelle und Eingabemöglichkeit für den Fahrer. Abb. 5 zeigt die vorgesehene Antriebstrangstruktur des Fahrzeugs.

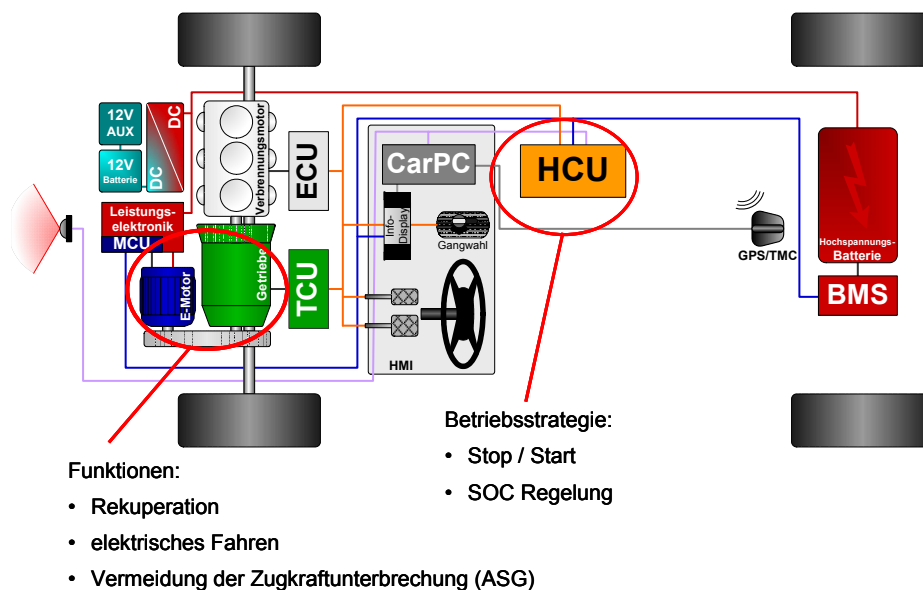


Abb. 5: Antriebstrangstruktur  
*Drive Train Structure*



Der konventionelle Antriebsstrang des Fahrzeuges wird um eine E-Maschine, einen Umrichter, einen DC/DC-Wandler und eine HV-Batterie erweitert. Der Elektromotor ist über einen Kettentrieb mit der Getriebeausgangswelle verbunden. Um den Elektromotor im Motorraum unterbringen zu können, ist es notwendig, den Verbrennungsmotor und das Getriebe durch eine Neuordnung der Motorlager in Fahrtrichtung gesehen nach rechts zu rücken. Der Umbau des Fahrzeugs ist vom ika mit Unterstützung der General Motors Powertrain – Germany GmbH durchgeführt worden.

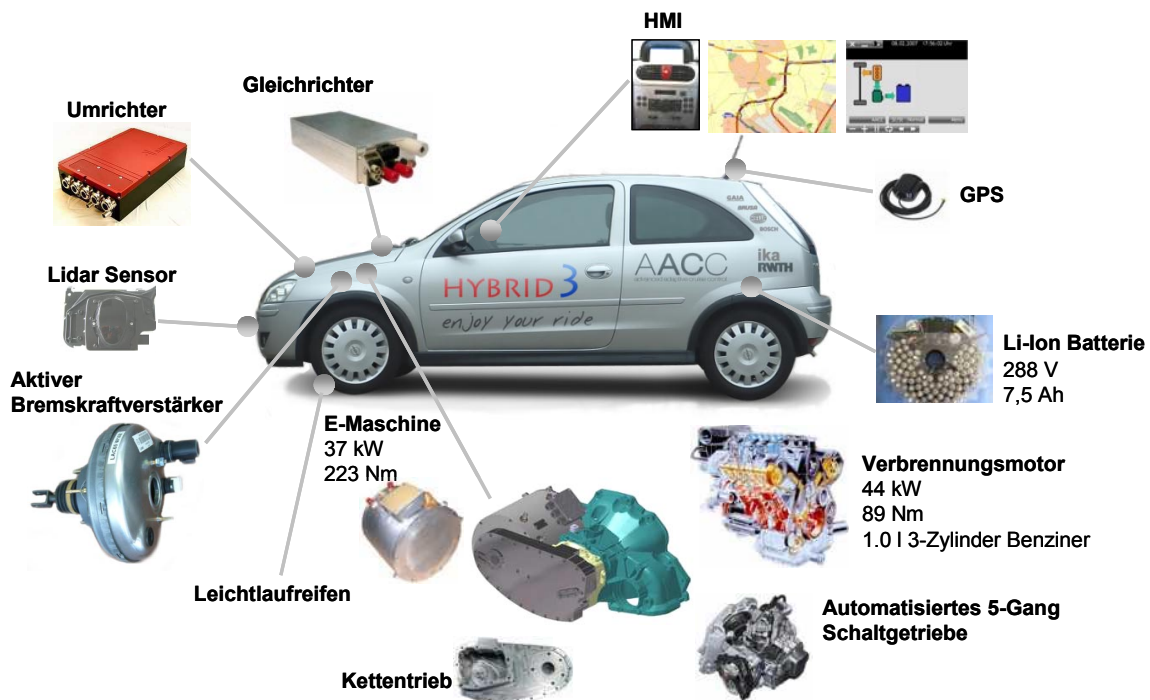


Abb. 6: Forschungsfahrzeug ika Hybrid III  
*Research Vehicle ika Hybrid III*

Die Li-Ionen Batterie wird in der Reserveradmulde untergebracht. Um den Rollwiderstand zu reduzieren, ist der Wagen mit Michelin Energiesparreifen ausgerüstet. In Abb. 6 ist das Fahrzeug mit den zusätzlich eingebauten Komponenten zu sehen.

### 3 Vorausschauendes Energiemanagement

Grundsätzlich können Informationen über die Fahrzeugumgebung in statische und dynamische Informationen eingeteilt werden. Die statischen Streckeninformationen können einer Digitalkarte entnommen werden. Während aktuelle Karten keinerlei Informationen über die Straßeninfrastruktur aufweisen, ist dies bei der nächsten Generation der digitalen Karten anders. Diese Karten enthalten sowohl Steigungsinformationen, als auch Informationen über Kurvenradien und Beschilderung. Eine Digitalkarte mit zusätzlichen Attributen wie Geschwindigkeits- und Höhenprofil ist vom ika im Rahmen des hier vorgestellten Projekts erstellt worden.

In Abb. 7 ist die Teststrecke als Beispiel für eine Digitalkarte mit zusätzlichen Attributen zu sehen.

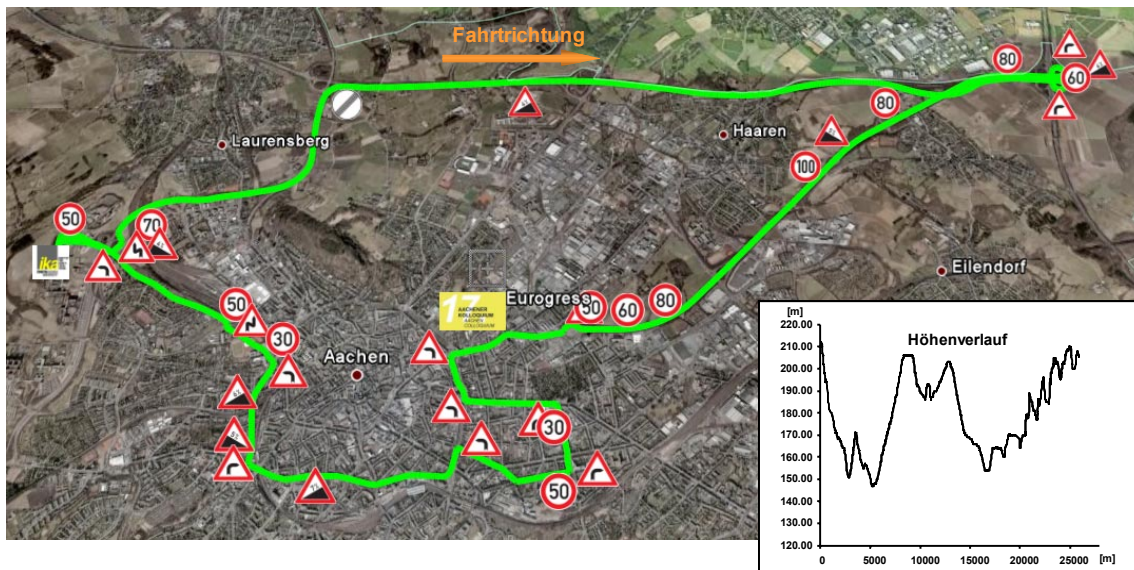


Abb. 7: Teststrecke mit Vorausschautdaten [6]  
*Test Track with Prediction Data*

Dynamische Informationen über den vorausfahrenden Verkehr können bereits heute mit üblichen Abstandssensoren ermittelt werden. Eine Stauerkennung kann in einer einfachen Version, über die Nutzung der heute europaweit verfügbaren RDS/ TMC (Radio Data System/ Traffic Message Channel)-Nachrichten realisiert werden. Eine lokale and aktuellere Stauerkennung lässt sich mit Hilfe der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ermöglichen.

Technologien, die bereits heute verfügbar sind:

- Abstand und Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug mit Hilfe eines Radar- oder Lasersensors aus serienmäßigen Abstandsregelsystemen (z.B. DISTRONIC/ Daimler AG, ACC/ Volkswagen AG)
- Stauerkennung mittels Verkehrsdatenfunk RDS/TMC
- digitale Karten (zum Ermitteln der restlichen noch zu fahrenden Strecke)

Technologien, die kurzfristig verfügbar sein werden:

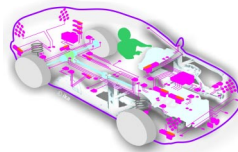
- Generation der digitalen Karten: Informationen über Höhenverlauf, Kurvenradien und Beschilderung

Technologien, die mittelfristig zu erwarten sind:

- Fahrzeug-Baken-Kommunikation: Informationen über aktuelle Ampelphase und Zeitpunkt des nächsten Umschaltens
- Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation: lokale Stauerkennung

Das Vorhaben konzentriert sich zur Realisierung der vorausschauenden Antriebsstrangregelung ausdrücklich auf Technologien, die heute verfügbar sind oder kurzfristig verfügbar sein werden, siehe Abb. 8.

- **Ego-Fahrzeug**  
(Geschwindigkeit, Beschleunigung, Gierrate)
- **Vorderfahrzeug**  
(Abstand, Geschwindigkeit)
- **Verkehrssituation**  
(Stadt, Überland, Autobahn)
- **Verkehrszustand**  
(Stop and Go, freie Fahrt)
- **Streckeninformationen**  
(Geschwindigkeitsbeschränkungen, Kurvenradien, Höhenverlauf)



Quelle: Bosch

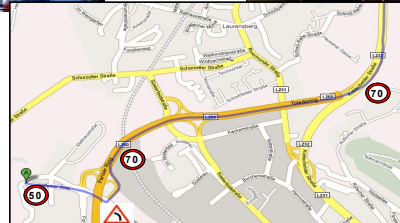


Abb. 8: Nutzbare Daten zur Vorausschau  
*Available Data for a Prediction System*

Die zur Verfügung stehenden Vorausschaudaten werden für die Geschwindigkeits- bzw. Ladegradregelung genutzt.

### 3.1 Vorausschauende Betriebsstrategie des Daimler AG Forschungsfahrzeugs

In der Philosophie der Daimler-Vorausschaustrategie wurde eine Beeinflussung des Fahrers ausgeschlossen. Das heißt, daß das Fahrzeug jederzeit den Pedalvorgaben des Fahrers gehorcht und die gewünschten Momente stellt. In Abb. 9 ist das Prinzip der Daimler-Vorausschaustrategie schematisch dargestellt.

In der Vorausschaustrategie wird zunächst aufgrund der Streckendaten ein Fahrleistungsprofil für die vorausliegende Strecke gebildet. Zur Optimierung der Rechnerbelastung wurde in Simulationen gezeigt, dass hierbei ein betrachteter Zeithorizont von < 2 min ausreichend für die Ausschöpfung des Verbrauchspotenzials ist. Im Vorausschausteuergerät ist der komplette Antrieb als Modell abgebildet. Zur Minimierung der erforderlichen Rechenleistung wurden hier Modellvereinfachungen vorgenommen, soweit diese keinen nennenswerten Einfluß auf das Verbrauchsergebnis haben. Die vorausschauende Betriebsstrategie berechnet nun auf Basis des Leistungsprofils mit Hilfe mathematischer Optimierungsfunktionen und ausgerichtet auf einen minimalen Verbrauch die Momententrajektorie für den Elektromotor, die

notwendigen Zustände des Verbrennungsmotors sowie den Sollgang. Diese Größen werden dann als Vorgabe an die Fahrzeugkomponenten gestellt. Durch eine Bilanzierung des Fahrerwunschs moments abzüglich des E-Maschinen moments zum Verbrennersollmoment wird zu jeder Zeit die Bedingung erfüllt, dass ein Gesamtmoment entsprechend des aktuellen Fahrerwunsches gestellt wird. Als weitere Nebenbedingung wird berücksichtigt, dass am Ende des Prädiktionshorizontes der Solladezustand der Traktionsbatterie wieder eingestellt sein soll.

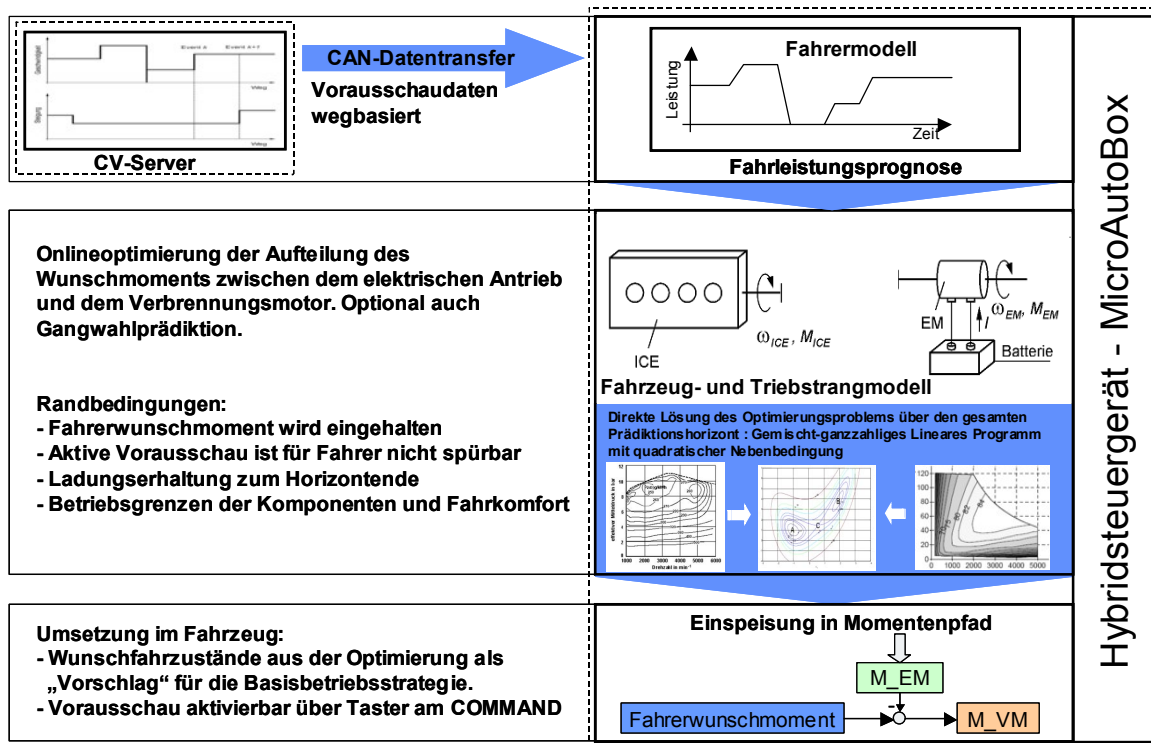


Abb. 9: Vorausschauende Betriebsstrategie der Daimler AG  
*Predictive Operating Strategy of Daimler AG*

Damit ergibt sich die Möglichkeit für die Vorausschaustrategie die Start-Stops des Verbrennungsmotors, den temporären Solladezustand der Batterie, die Nachladestrategie über den Verbrennungsmotor hinsichtlich Zeitpunkt und Intensität, den Einsatz rein elektrischer Fahrt und die Gangwahl gegenüber einer statischen Betriebsstrategie zu variieren.

### 3.2 Vorausschauende Betriebsstrategie der Volkswagen AG

Die Vorausschaufunktion der Volkswagen AG arbeitet überlagert zum konventionellen Hybridmanager [7] und hat zum Ziel, die Geschwindigkeitsübergänge unter Berücksichtigung des aktuellen und prädizierten Fahrzeugzustands energieoptimal zu gestalten. Hierfür stellt ein Kartenrechner in Abhängigkeit der über GPS ermittelten Fahrzeugposition Informationen über die Lage der Geschwindigkeit begrenzenden Events, wie Kurven, Ortschaften oder Beschilderungen zur Verfügung.



Die Vorausschaufunktion ermittelt auf Basis dieser Informationen für die Phasen der Verzögerung eine ACC-Sollgeschwindigkeitstrajektorie, die das maximal mögliche Rekuperationspotenzial ausschöpft und Eingriffe der mechanischen Bremse minimiert. Hierfür wird die benötigte Strecke für die Verzögerung des Fahrzeugs von der aktuellen Geschwindigkeit auf den aus der nächsten Geschwindigkeitsbegrenzung resultierenden Wert auf Basis der Fahrzeuglängsdynamik berechnet (Abb. 10).

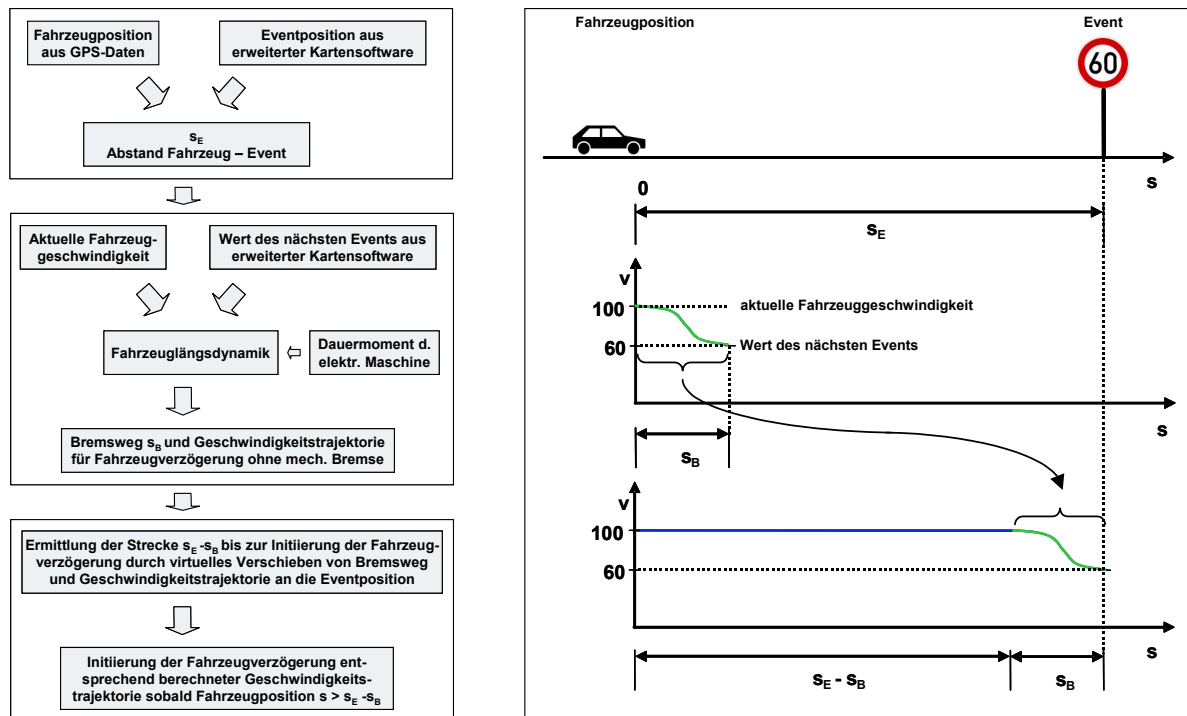


Abb. 10: Vorausschauende Betriebsstrategie der Volkswagen AG  
*Predictive Operating Strategy of Volkswagen AG*

Um Temperaturprobleme zu vermeiden und die Verfügbarkeit der elektrischen Maschine in den Verzögerungsphasen sicherzustellen, findet dabei in der entsprechenden Differentialgleichung eine dem Dauermoment der elektrischen Maschine entsprechende externe Bremskraft Berücksichtigung. In das resultierende Streckenintervall wird eine Trajektorie eingepasst, deren Funktionswerte auf den Sollwerteingang des implementierten Geschwindigkeitsreglers geschaltet werden, sobald der Abstand zwischen Fahrzeug und Geschwindigkeit begrenzendem Event die berechnete Länge des Verzögerungsintervalls unterschreitet. Durch Abstimmung der Sollgeschwindigkeitstrajektorie auf die Charakteristik des implementierten Geschwindigkeitsreglers ist es möglich, Über- bzw. Unterschwingen der Fahrzeuggeschwindigkeit zu vermeiden und damit einen gleichmäßigen Übergangszustand verbunden mit dem erforderlichen, hohen Fahrkomfort sicherzustellen.

### 3.3 Vorausschauende Betriebsstrategie des ika

Das ika hat sich entschieden, die Vorausschaufunktion in einen adaptive Geschwindigkeitsregelung zu integrieren. Das System wird im folgenden AACC genannt (advanced adaptive cruise control). Das Einschalten des Systems hat zur Folge, dass die Längsdynamik des Fahrzeugs innerhalb der Systemgrenzen automatisiert wird. Dem Fahrer wird folglich die direkte Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeit entzogen, er muss allerdings noch die Querregelung vornehmen und in Situationen, die beispielsweise eine Notbremsung erfordern, eingreifen. Die Daten zur Geschwindigkeitsregelung erhält das System über den Lidar Sensor und die Digitalkarte.

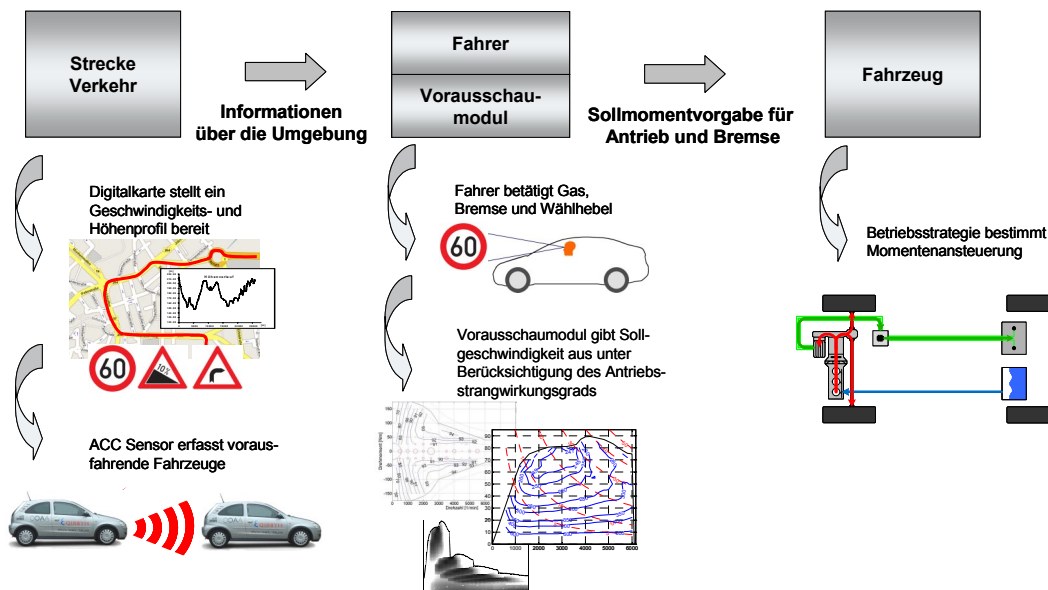


Abb. 11: Vorausschauende Betriebsstrategie des ika Fahrzeugs  
*Foresighted Energy Management of the ika Vehicle*

Das AACC System gibt eine Sollgeschwindigkeit vor, die neben den vorliegenden Umgebungsinformationen den Wirkungsgrad des Antriebsstrang berücksichtigt. Das Antriebsstrangmanagement unterscheidet dabei zwischen vier Betriebszuständen:

- Start/ Stop des Verbrennungsmotors
- Beschleunigung
- Verzögerung
- Konstantfahrt

Da die Wirkungsgrade der einzelnen Antriebsstrangkomponenten bekannt und im Hybridsteuergerät hinterlegt sind, kann das AACC System eine Geschwindigkeitstrajektorie berechnen, die eine möglichst energieeffiziente Fahrt realisiert. Das System ist während der Versuchsfahrten ausschließlich im Überlandverkehr genutzt worden, im Stadtverkehr übernimmt der Fahrer die Steuerung des Fahrzeugs.

## 4 Versuchsergebnisse

Es wurden von den drei Projektpartnern gemeinsam Fahrversuche in Aachen durchgeführt. Da die notwendigen Vorausschaudaten nicht flächendeckend zur Verfügung stehen, wurden die Fahrten auf der in Abb. 7 zu sehenden Rundstrecke in Aachen durchgeführt. Diese Strecke ist insgesamt 25,6 km lang, wobei 61 % (15,6 km) außerhalb geschlossener Ortschaften liegen und 39 % (10 km) innerhalb.

### 4.1 Versuchsergebnisse der Daimler AG

Im Folgenden werden die Vergleichsfahrten beschrieben, die die Daimler AG in Aachen durchgeführt hat. Insgesamt wurden 22 Fahrten mit statisch optimierter Basisstrategie und mit vorausschauender Strategie absolviert. Um die Vergleichbarkeit zu erhöhen, wurden alle Fahrten vom gleichen Fahrer, bei gleichem Beladungszustand und einheitlichem Start- Ladezustand der Batterie gefahren. Es hat sich gezeigt, dass die Verbrauchswerte dennoch leicht streuen. Selbst bei gleicher Einstellung des Fahrzeuges hat es bis zu 4,5 % Abweichungen gegeben. Dies ist bedingt durch unterschiedliche Verkehrssituationen und eine variierende Verkehrsdichte. Trotz der Streuungen konnte durch eine hinreichend hohe Anzahl von Fahrten ein Verbrauchsvorteil der vorausschauenden Betriebsstrategie von etwa 3 % im Vergleich zu der von Daimler implementierten Basisstrategie nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis deckt sich mit den vorab erstellten Simulationsrechnungen. In Abb. 12 ist die Verbrennungsmotorleistung über alle 22 Versuchsfahrten untergliedert in Basisstrategie und Vorausschaustrategie zu sehen. Deutlich zu erkennen ist die wesentlich stärkere Belastung des Verbrenners bei aktiver Vorausschau. Die Betriebsbereiche schlechten Verbrennerwirkungsgrades werden durch den Optimierungsalgorithmus weitgehend vermieden und stattdessen größtenteils elektrisch gedeckt. Im Gegenzug wird bei aktivem Verbrenner sehr intensiv nachgeladen. Insgesamt ist die Anschaltzeit des Verbrenners bei aktiver Vorausschau so um ca. 20 % geringer als in der Basisstrategie.

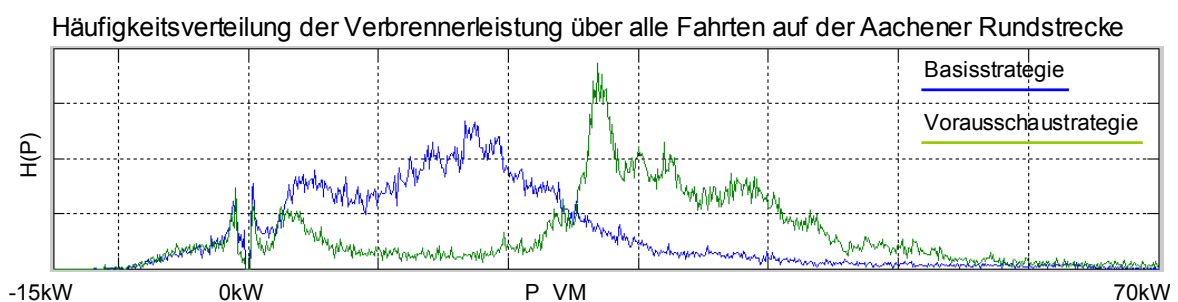


Abb. 12: Verbrennungsmotorleistung mit und ohne Vorausschaustrategie  
*Combustion Engine Power with and without Predictive Operating Strategy*

Als größtes Problem hat sich die Einbeziehung vorausfahrender Fahrzeuge in die Leistungsprognose erwiesen. Das Abbiegen und Einscheren von Fremdfahrzeugen sowie der Umstand, dass diese in engen Kurven aus dem Radarbereich geraten, um



gleich danach wieder aufzutauchen, bringen erhebliche Unruhe in das prädierte Leistungsprofil hinein. Deshalb wurde die Einbeziehung von Fremdfahrzeugen mittels der DISTRONIC unterlassen und das Leistungsprofil nur aufgrund von Streckendaten ermittelt. Positiv bleibt zu erwähnen, dass das Fahrzeug sich mit der Vorausschaustrategie normal fahren ließ, d.h. es traten keine auffälligen Fahr- oder Antriebszustände auf. Der Algorithmus hat sich in Vorabprüfungen als robust genug erwiesen auch bei einem völlig von den Vorausschautdaten abweichendem Fahrverhalten den Ladezustand der Batterie im vorgegebenen Rahmen zu halten. Ein negativer Einfluss auf das empfundene Fahrzeugverhalten wurde nicht festgestellt.

#### 4.2 Versuchsergebnisse der Volkswagen AG

Der Rundkurs in Aachen setzt sich aus einem Autobahn- und einem Innenstadtteil zusammen (Abb. 7) und ermöglicht es daher, das Potenzial einer vorausschauenden Betriebsstrategie, wie sie von der Volkswagen AG entwickelt wurde, unter verschiedensten Randbedingungen zu untersuchen. Speziell bei Durchführung einer Vielzahl von Messfahrten mit unterschiedlichen Fahrertypen zu verschiedenen Tageszeiten können sehr repräsentative Ergebnisse erzielt werden. Abb. 13 zeigt einen Auszug der von der Volkswagen AG erzielten Ergebnisse und lässt erkennen, dass speziell bei aktivierter Vorausschau (Versuch 2, 3, 8, 10, 11) Fahrzeugsoll- und -istgeschwindigkeit auf dem Autobahnanteil auf Grund der vergleichsweise geringen Dichte des umgebenden Verkehrs nah beieinander liegen, da die vorausschauende Betriebsstrategie weitestgehend ungestört umgesetzt werden kann.

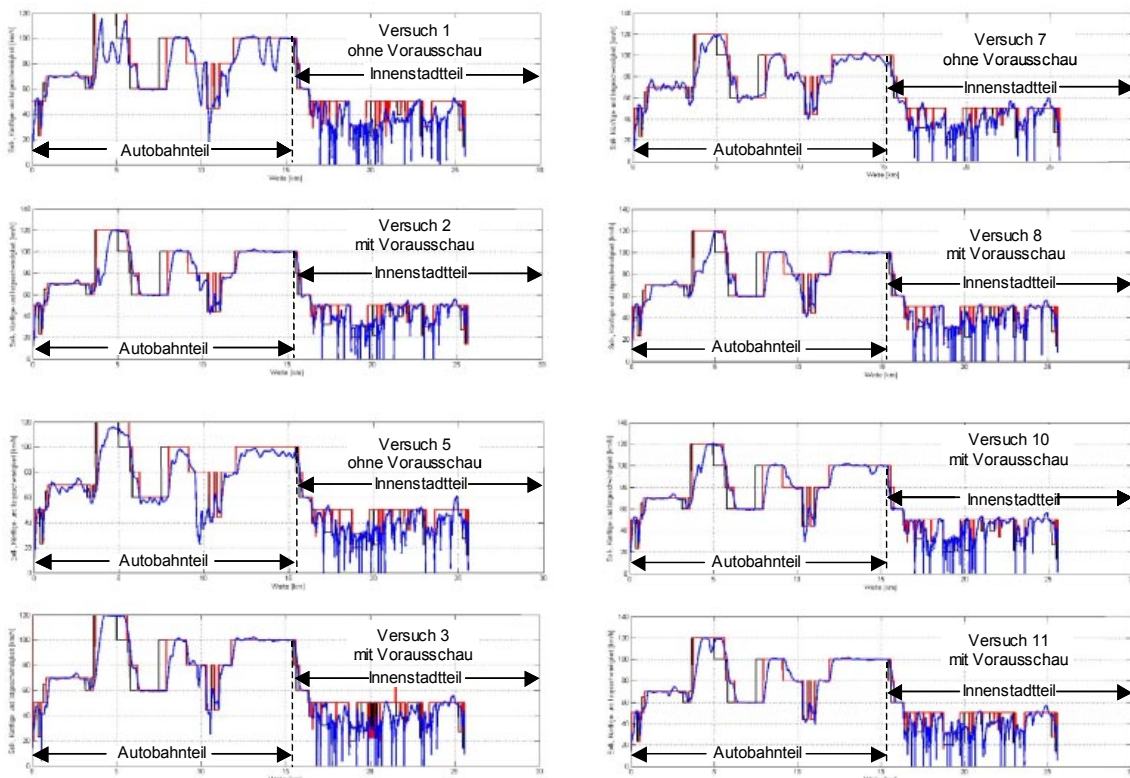


Abb. 13: Soll-/ Istgeschwindigkeit auf dem Aachener Rundkurs  
*Desired / Actual Speed on Aachen Track*

Im innerstädtischen Bereich hingegen treten auf Grund des dichteren Umgebungsverkehrs verstärkt Störungen auf, so dass Fahrzeugsoll- und –istgeschwindigkeit häufiger voneinander abweichen. Dennoch ergibt sich, wie Abb. 13 zeigt, bei Aktivierung der vorausschauenden Betriebsstrategie ein geringerer Kraftstoffverbrauch als ihn der Durchschnittsfahrer erzielen kann. Lediglich bei einem versierten Fahrer mit manuellen Vorausschaufähigkeiten ergeben sich ähnliche Ergebnisse, wie im automatisierten vorausschauenden Fahrzeugbetrieb.

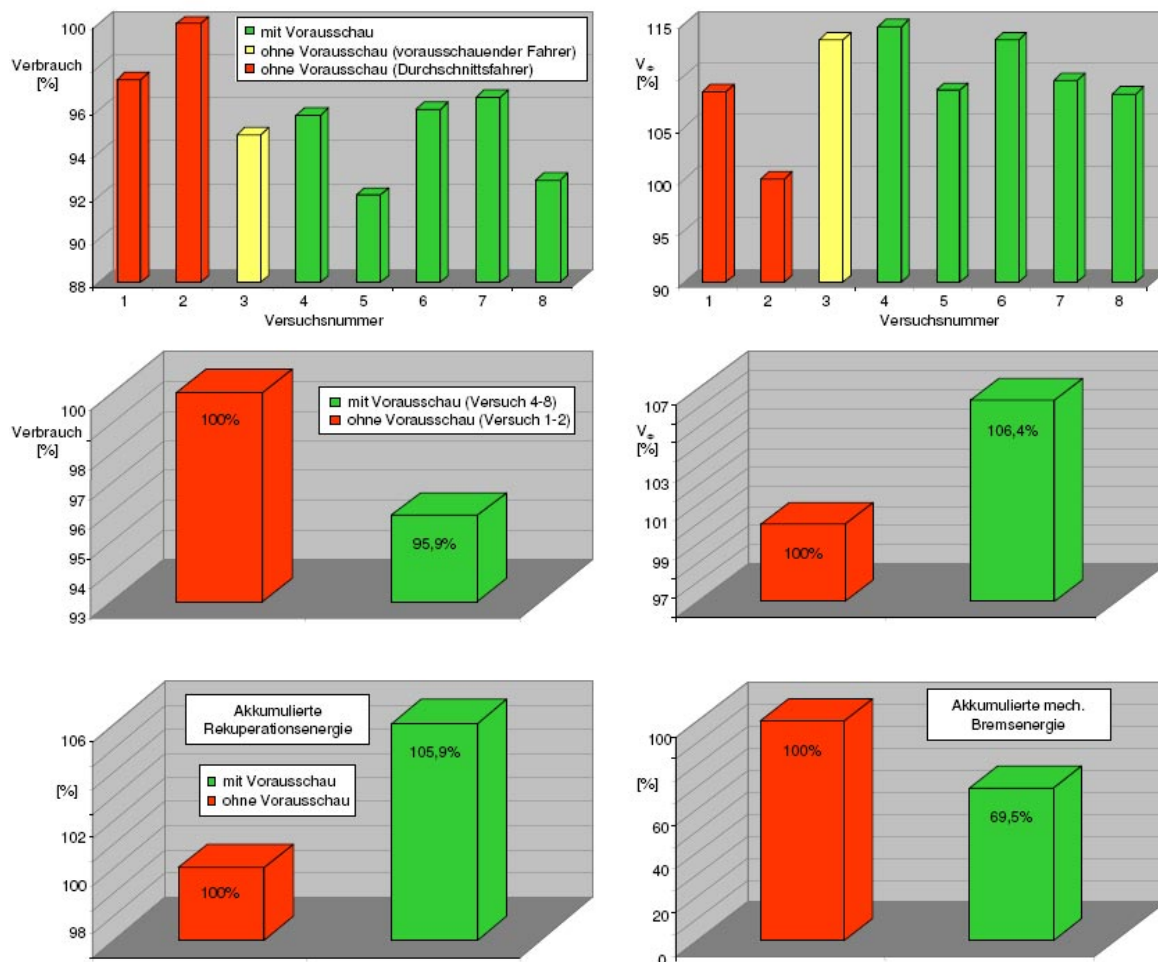


Abb. 14: Kraftstoffverbrauch, Durchschnittsgeschwindigkeit und akkumulierte Energie auf dem Aachen Rundkurs  
*Fuel Consumption, Average Speed and Accumulated Energy on Aachen Track*

Relativ zum Durchschnittsfahrer ist jedoch bei Anwendung der vorausschauenden Betriebsstrategie, wie sie von der Volkswagen AG entwickelt wurde, im Mittel eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von ca. 4 % bei gleichzeitiger Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 6 % möglich. Dabei resultiert die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs aus einer Erhöhung der Rekuperationsenergie zu Lasten der Bremsenergie.

### 4.3 Versuchsergebnisse ika

Die Ergebnisse des ika beziehen sich auf die Versuchsfahrten in Aachen, welche gemeinsam mit der Daimler AG und der Volkswagen AG durchgeführt wurden. Zudem hat das ika zusätzliche Fahrten mit zwölf Probanden durchgeführt, die die Strecke einmal mit und einmal ohne das Vorausschausystem gefahren sind. Eine weitere Fahrt wurde mit einem konventionellen Serienauto durchgeführt, welches mit dem gleichen Verbrennungsmotor und automatisiertem Getriebe ausgestattet ist.

Die strikte Geschwindigkeitsvorgabe des AACC Systems eröffnet die Möglichkeit, bei Beschleunigungen und Verzögerungen den Antriebsstrang möglichst effizient zu betreiben. In der Simulation konnte dadurch auf der Aachenrunde ein Verbrauchsvorteil zwischen 3 und 5 % gegenüber dem ohne Vorausschau fahrenden Hybrid erzielt werden. In Abb. 15 ist aus einer Simulation heraus die Verbrennungsmotorleistung bei aus- und eingeschaltetem AACC zu sehen. Insbesondere bei Annäherung an eine niedrigere Geschwindigkeitsbegrenzung ist eine energieeffiziente Wahl einer Geschwindigkeitstrajektorie möglich.

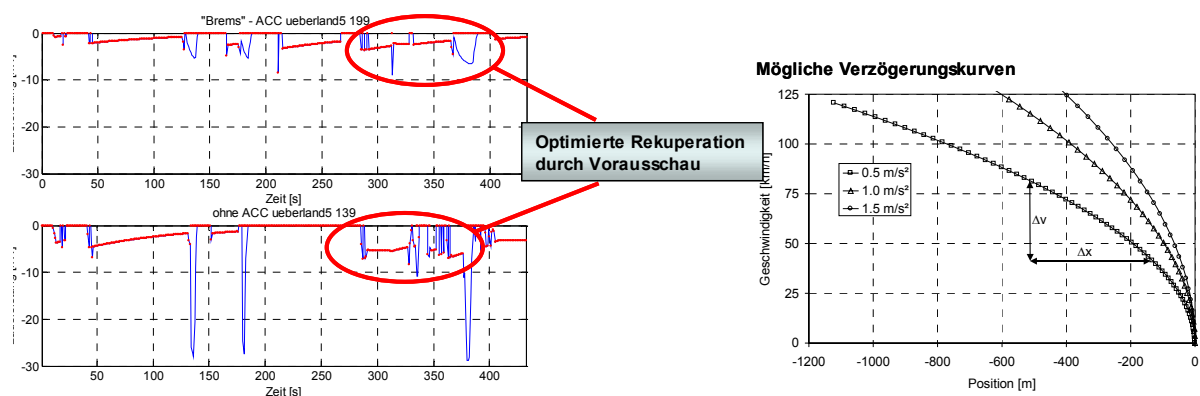


Abb. 15: Verbrennungsmotorleistung mit und ohne AACC; Geschwindigkeitsverläufe bei Ortsannäherung  
*Engine Power with and without AACC; Velocity Records while City Approach*

Die vom ika durchgeführten Antriebsstrangsimulationen haben jedoch auch gezeigt, dass die stärkere Lastpunktanhebung und die größeren Energiemengen bei der Rekuperation zu einer leicht erhöhten Belastung der Batterie führen.

Ziel der Fahrversuche war neben der Überprüfung der Verbrauchswerte im Realverkehr die Untersuchung der Nutzerakzeptanz. Im Prinzip ist das AACC System als Weiterentwicklung des Tempomaten bzw. ACC zu sehen, sodass es nicht nur den Kraftstoffverbrauch, sondern auch das Komfortverhalten und die aktive Sicherheit beeinflusst. Gegenüber einem bisherigen ACC zeichnet sich das Aachener AACC dadurch aus, dass es nicht nur die Fahrerwunschgeschwindigkeit unter Berücksichtigung des direkt vorausfahrenden Fahrzeugs einregelt, sondern auch streckenbedingte Geschwindigkeitsbegrenzungen in die Fahrzeugsollgeschwindigkeit einbezieht. Da dies eine weitergehende Bevormundung des Fahrers nach sich zieht als

bei bisher verwendeten Systemen, ist die Nutzerakzeptanz ein wichtiges Kriterium der durchgeführten Probandenversuche.

Bei der Auswertung lag der Schwerpunkt bei regelmäßig vorkommenden Bremsvorgängen, da die optimierte Rekuperation nach den Simulationsergebnissen das größte Potenzial des Vorausschau-systems ergab. In Abb. 16 sind die Geschwindigkeitsverläufe verschiedener Messfahrten mit und ohne AACC vor einer Autobahnbaustelle zu sehen. Gut zu erkennen ist der annähernd identische, stufenförmige Geschwindigkeitsverlauf bei eingeschaltetem AACC, während die manuell gefahrenen Geschwindigkeitsverläufe zum einen ein häufiger Wechsel zwischen Verzögerung und Beschleunigung und zum anderen eine zwischen den einzelnen Probanden größere Streuung auszeichnet. Zudem regelt das AACC die neue Geschwindigkeitsbegrenzung mit einem deutlich kleineren Überschwinger ein.

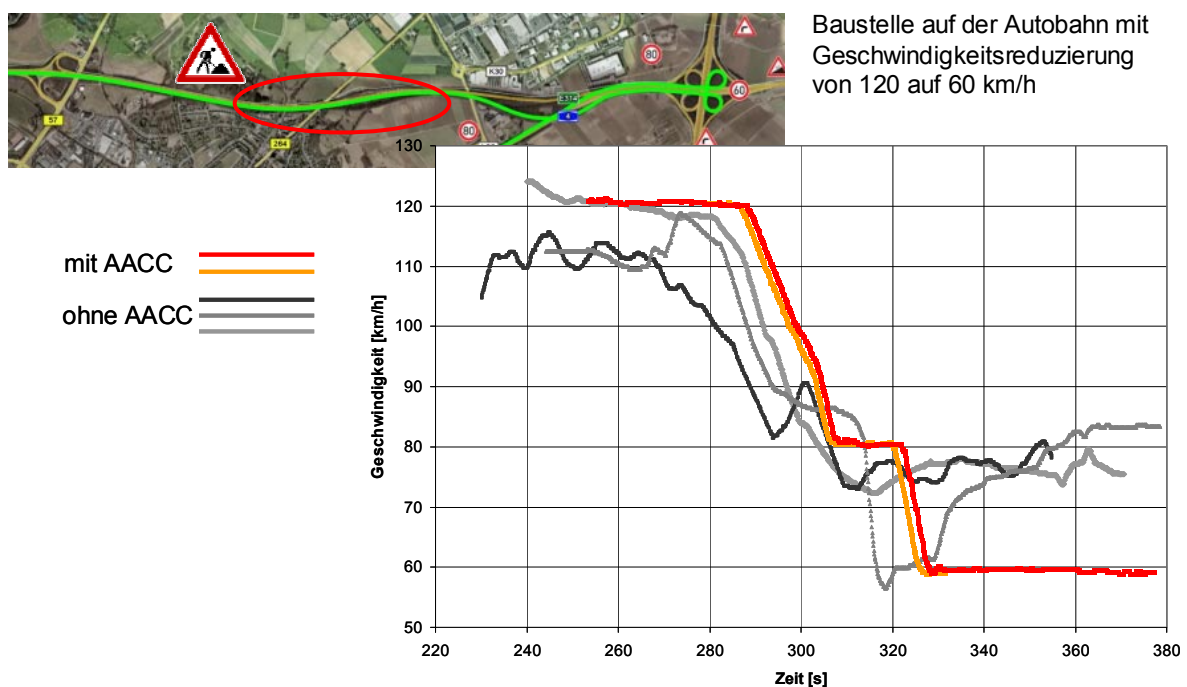


Abb. 16: Geschwindigkeitsverläufe vor einer Autobahnbaustelle mit und ohne AACC

*Velocity Records before Road Works on the Autobahn with and without AACC*

Bei der Betrachtung des reinen Verzögerungsvorgangs zeigt sich, dass das AACC System zu einer durchschnittlichen Energieeinsparung von 6,5 % führt. Dabei wurden die Geschwindigkeit und der SOC Wert vor und nach der Verzögerung sowie der Kraftstoffverbrauch berücksichtigt. In der Nachbefragung gaben die meisten Probanden an, dass sie mit dem Hybridfahrzeug ohne Vorausschau am zufriedensten waren. Insbesondere die strikte Geschwindigkeitsvorgabe des AACC Systems ist teilweise kritisiert worden. Das System wurde allerdings auch als komfort- und sicherheitssteigernd bewertet.

## 5 Ausblick

Die in dem hier beschriebenen Projekt entwickelten Systeme und Strategien haben sowohl in der Simulation als auch im Realverkehr gezeigt, dass sich der Verbrauch von Hybridfahrzeugen mit Hilfe einer vorausschauenden Betriebsstrategie weiter reduzieren lässt. Dies gilt sowohl für den Ansatz, bei der die Vorausschaudaten für eine adaptive Batterieladeregulierung genutzt werden, als auch für den Ansatz der energieoptimalen Geschwindigkeitsvorgabe. Der u.U. geringeren Nutzerakzeptanz bei letzterem stehen jedoch Sicherheitsvorteile und das etwas höhere Verbrauchssenkungspotenzial entgegen. Zudem lässt sich die Nutzerakzeptanz durch eine optimierte Bedienung und verbesserte Mensch-Maschine-Schnittstelle verbessern.

Daher erscheint es mit den zukünftig vorliegenden Informationen über Fahrstrecken aus digitalen Streckenkarten sinnvoll, mit den hier beschriebenen Vorausschaustrategien die Entwicklung einer serientauglichen Betriebsstrategie anzustoßen.

## 6 Literatur

- [1] STEIGER, W.; SCHOLZ, I.; PETERSEN, R.; KUBE, R.  
Faszination Fahrzeugantrieb; VDI Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2006;  
Friedrichshafen, 2006
- [2] KUBE, R.; BÖCKL, M.; HOMMEL, M.; KÖHLE, S.  
Energy Management Strategies for Hybrid Drive Train Systems Using  
Infrastructure Information;  
2. Aachener Elektronik Symposium Energiemanagement – heute und morgen;  
Aachen, 2004
- [3] WILDE, A.; SCHNEIDER, J.; HERZOG, H.-G.  
Fahrstil- und fahrsituationsabhängige Ladestrategie bei Hybridfahrzeugen;  
ATZ 05/2008, Jahrgang 110, S. 412 – 421, Vieweg Verlag;  
Wiesbaden, 2008
- [4] SCHRAUT, M.  
Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur  
vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen;  
Dissertation am Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme der TU München;  
München, 2000
- [5] NEUNZIG, D.; LACHMAYER, R.  
Licht und Fahrerassistenz als Systeme zur Verbesserung der  
Fahrzeugsicherheit;  
ATZ 06/2002, Jahrgang 104, S. 574 – 582, Vieweg Verlag;  
Wiesbaden, 2002

- [6] TÖPLER, F.; QIHUI, H.; EL GHAOUTY, M.  
ika Digitalkarte der AC2 Rundstrecke, Google Earth;  
Aachen, 2008
  
- [7] BÖHM, T.; KUBE, R.; HOFMANN, L.  
Energiemanagement für Hybridantriebsstränge;  
3. Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement;  
Braunschweig, 2006