

Hochschule Heilbronn · Max-Planck-Str. 39 · D-74081 Heilbronn

**BMBF-Förderlinie
IngenieurNachwuchs 2011
(Fachrichtung Maschinenbau)
Projektträger FZ Jülich Berlin**

FKZ 17N1811

**Fakultät T1
Studiengang ASE
automotive systems
engineering**

**Prof. Dr.-Ing.
Hermann Koch-Gröber**

Heilbronn, 10.03.2016

Abschlussbericht = Verwendungsnachweis Sachbericht

formal folgend der Vorgabe nach BNBest-BMBF 98 Stand 2006

Berichtszeitraum = Projektlaufzeit 01. 08. 2011 bis 30. 06. 2015*

(*Verlängerung ggü. ursprünglich 30.07.2014 beantragt und genehmigt)

ECC Economic Cruise Control

Fahrstrategie einer verbrauchsoptimierten Überland- und Autobahnfahrt, insbesondere mit hügeligem Profil

Zuwendungsempfänger und Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hermann Koch-Gröber

Studiengang ASE (Automotive Systems Engineering)

Fakultät für Mechanik und Elektronik Technik 1 der Hochschule Heilbronn

Fachgebiet der Professur: Antriebe und Antriebsstrang des Kfz



I. Kurze Darstellungen

1. Aufgabenstellung

Zur notwendigen Limitierung des Klimawandels muss der Betrieb von Kraftfahrzeugen einen signifikanten Beitrag leisten. Durch hohe spezifische Kilometerleistungen tragen solche Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (NfZ), die in Europa auf Autobahnen oft mit Geschwindigkeiten von 90 bis 140 km/h gefahren werden, überproportional zu den CO₂-Emissionen bei. Bei der gesetzlich vorgeschriebenen Reduktion der CO₂-Emission ist diese Betriebsweise im Testzyklus EUDC nur marginal abgebildet sowie ausschließlich eine Fahrt auf ebener Strecke definiert. In der Realität werden jedoch hohe Anteile nicht auf ebenem Streckenprofil gefahren. Schon eine Steigung von 1% verändert die Fahrwiderstände um mehr als 20% (VW Golf 5 mit 1,5 t auf Asphalt).

Ziel dieses Vorhabens war, eine verbrauchsoptimierte Fahrstrategie für diesen Betriebsbereich bei konventionellen Antrieben mit Verbrennungsmotor zu untersuchen. Ansatz dazu ist das Prinzip des "pulse and glide" (inzwischen wurde im deutschen Sprachraum dafür der Begriff „Segeln“ geprägt), d. h. die Integration von Rollphasen und Phasen höherer Motorlast. Eine Übertragung auf hügeliges Gelände und deren theoretische Durchdringung sowie Nachweis der realen Einsparpotenziale bei Serienfahrzeugen lag bei Projektstart nicht vor.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Voraussetzungen entsprachen in den meisten Punkten dem bei der Beantragung zu erwartenden Sachverhalten: Projektleiter als Prof. an der Hochschule nach < 3 Jahren im Lehrbetrieb etabliert, entlastet durch Deputatsreduktion über das Projekt und durch das Glück, mit Dipl.-Ing. H. Slocinski einen anerkannten Lehrbeauftragten dauerhaft engagieren zu können (was nicht immer leicht ist). Gute Kooperationen in der Projektabwicklungen mit den Kolleginnen der Finanzverwaltung der HHN (Dank an Frau Lilov und Frau Janusch) sowie mit den Projektträgern (insbesondere Dank an Frau Öhler vom PTJ, aber auch im ersten Jahr an Frau Ebermann vom PT AiF; Übergang der Projektträger problemlos).

Die Personalgewinnung, insbesondere die zur Projektmitte vorgesehene Besetzung der Promotionsstelle, erwies sich als schwieriger als erwartet: Masterabsolventen einer Hochschule haben nur zu einem sehr geringen Anteil die Absicht zu promovieren, Uni-Absolventen haben eher die bekannten eigenen Lehrstühle im Blick (und umgekehrt); die Mehrheit gute Masterabsolventen zieht es in die Industrie. Auch wenn mit Frau M. Sc. Jue Wang schließlich eine gute Besetzung gefunden werden konnte, musste doch der Start der Mitarbeit der/des Promovierenden um 6 Monate verschoben werden. Von Anfang an war – wie in der Ausschreibung IngNachwuchs 2011 ermöglicht – die Budgetierung des Promotionsvorhabens so geplant, dass es nicht im Zeitrahmen dieses Projektes abzuschließen war.

Wichtige Voraussetzung war die Zusammenarbeit mit den Partnern, dazu ref. 5.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die mit der Antragsstellung aufgestellten drei Projektphasen konnten sehr weitgehend realisiert werden, allerdings aus verschiedenen Gründen zu verschobenen Zeitpunkten. Die Phasen waren aus jeweils zwei oder drei AP zusammengesetzt:

Phase A war geplant bis 02.2012 (+8 Monate nach Projektstart)

Arbeitspaket A1: Analyse / Simulation / Optimierung

Arbeitspaket A2: Erstes Versuchsfahrzeug Handschalter ausrüsten

Erfüllungsgrad-Einschätzung: 98 % zum 3. Quartal 2012 (+14 Monate nach Projektstart)

Die vom neu forschenden Projektleiter (PL, gleich ZE wie Zuwendungsempfänger) angenommenen Dauern zur Auswahl, Beschaffung und Ausrüstung des Projektfahrzeugs waren zunächst zu optimistisch. Ohne eingearbeitete Projektmitarbeiter konnte das AP1 erst in der vorlesungsfreien Zeit nach dem Sommersemester 2012 zu einem belastbaren Stand gebracht werden im Zuge der Erarbeitung der ersten Veröffentlichung [KoGr12a].

Phase B war geplant bis 02.2013 (+20 Monate nach Projektstart)

Arbeitspaket B1: Analyse / Simulation / Optimierung

Arbeitspaket B2: Versuchsprogramm Fahrzeug Handschalter

Arbeitspaket B3: Akzeptanzbewertung durchführen

Erfüllungsgrad-Einschätzung: 95 % zum 30. April 2014 (+32 Monate nach Projektstart)

Diese Phase B dauerte trotz inzwischen etablierter Einbindung von studentischen Projektmitarbeitern und der Doktorandin auch 12 Monate länger als ursprünglich vorgesehen. Hintergrund ist auch eine in dieser Phase sich einstellende Verschiebung der Phase C (ref. dazu sowie Abschnitt 5.), so dass die Inhalte von B umfangreicher bearbeitet wurden. Mit dem Projektfahrzeug Handschalter wurden in vielfältigen Fahrsituationen breite Erfahrungen der Nutzung des Segelns erreicht. Das AP B3 wurde durch die Bachelorarbeit von Frau S. Springer, Studentin der Kognitionswissenschaft an der TU Chemnitz mit dem Titel „Fokusgruppen-Studie zur Akzeptanz von „Segeln“ als Teil einer ökonomischen Fahrstrategie von Pkw“ erarbeitet, deren Lastenheft in engem Austausch mit der Projektleitung der HHN entstand.

Phase C war geplant bis 07.2014 (+36 Monate nach Projektstart gemäß ursprünglich geplanter Projektlaufzeit 3 Jahre)

Arbeitspaket C1: Analyse / Simulation / Optimierung

Arbeitspaket C2: Versuchsprogramm Demofahrzeug mit DCT

Arbeitspaket C3: Akzeptanzbewertung abschließen

Erfüllungsgrad-Einschätzung: 70 % zum Projektende 2. Quartal 2015

Der zentrale Punkt einer automatisierten ECC-Fahrstrategie hing an der Zusammenarbeit mit Partner GETRAG in Form der Nutzung eines zweiten Prototypfahrzeugs mit Doppelkupplungsgetriebe, weswegen das Projekt um ein knappes Jahr verlängert wurde. Wesentliche Inhalte der Automatisierung konnten durch eine Rückfalllösung dargestellt werden; diese war jedoch nur durch eingewiesene Versuchsfahrer nutzbar und erlaubte so nicht, eine breite Akzeptanzuntersuchung durchzuführen. Die vorgesehenen Studien einer Nutzung des Segelns auch bei Hybridfahrzeugen konnten bereits veröffentlicht werden [KGWa14], [WaKG15].

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bekannt war einer einschlägig vorgebildeten Fachperson, dass eine Fahrstrategie, welche hochlastigen und damit wirkungsgrad-günstigen Betrieb eines Verbrennungsmotors mit Phasen von Nulllast, heute als Segeln bezeichnet, kombiniert, günstige Streckenverbräuche ergibt. Als eine der wenigen wissenschaftlich belastbaren Quellen hat J. Lee in seiner Dissertation [Lee09] diese Fragestellung untersucht, allerdings begrenzt auf ebene Streckenprofile. Darüber hinaus wurde das Verfahren bei so genannten Eco-Marathons oder auch von Journalisten vermarkteten Rekordfahrten („mit einer Tankfüllung von Paris nach Berlin“ o. ä.) eingesetzt. Fahrzeughersteller boten einzeln in Kombination mit einem Doppelkupplungsgetriebe DKG an (z. B. Volkswagen im Passat B7 von 2010), bei Fahrerwunsch Null (Fuß vom Fahrpedal) eine Freilauffunktion statt des üblichen Schubbetriebs („Motorbremse“) zu realisieren. Eine Übertragung auf hügeliges Gelände und deren theoretische Durchdringung sowie Nachweis der realen Einsparpotenziale bei Serienfahrzeugen lag bei Projektstart nicht vor.

Durch die Allgemeingültigkeit des Grundprinzips wird eingeschätzt, dass eine solche Fahrstrategie nicht schutzrechtsfähig ist. Entsprechende Recherchen z. B. in depatisnet bestätigten dies. Für die eingesetzte Fachliteratur sei auf das Verzeichnis am Ende dieses Berichtes verwiesen, zu deren Identifikation übliche netzbasierte Kataloge vor allem der Hochschulbibliothek Heilbronn eingesetzt wurde.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die mit den LOI der Antragsstellung dokumentierten Partner wurden alle erfolgreich in das Projekt einbezogen:

(1) IPETRONIK GmbH & Co. KG, Baden-Baden

Von Firma IPetronik wurde das Datenaufzeichnungsgerät „MLog“ in das handgeschalteten Projektfahrzeug Ford Focus fest verbaut und kontinuierlich genutzt, sozusagen als Basisstation für alle Messdaten. Der nicht ganz triviale Einbau in ein Serienfahrzeug wurde vor Ort bei Fa. Ipetronik durch studentische Projektmitarbeiter, mit Unterstützung der Firmen-MA realisiert. Der Driverecorder von IPetronik wurde gegen Projektende gespendet und kann somit dauerhaft im Fahrzeug verbleiben, welches für das Folgeprojekt weiterhin genutzt wird.

(2) RA Consulting GmbH, Bruchsal

Schon seit Projektbeginn wird die PC-gestützte Software „silver scan“ vielfach genutzt, um Testfahrten mit Serienfahrzeugen zu vermessen. Zentral war die dadurch erfolgte Identifikation des Typs Ford Focus, der im Gegensatz zu den meisten anderen Serienfahrzeugen an der OBD-Schnittstelle ausreichend Daten physikalischer Größen zur Verfügung stellt. Aber auch bei Vergleichsfahrten mit anderen Fahrzeugen sowie die Versuche mit DKG wurde die Software erfolgreich eingesetzt.

Eine große Unterstützung kam von Mitarbeitern von GF A. Rupalla, indem mittels eines reduzierten A2L-Files einzelne Parameter des Serien-Steuergerätes direkt aus den Signalen auf dem CAN-Bus gelesen werden konnten, was dynamischere Messungen erst ermöglichte.

(3) Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK – Institut für Produktentwicklung bei Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers; Karlsruhe

Seit Mitte 2013 arbeitet Frau M. Sc. Jue Wang in intensiver wissenschaftliche Betreuung seitens des IPEKs an ihrem Promotionsvorhaben: Ein neuartiges Vorgehen für eine verbrauchsoptimale Betriebsstrategie eines Hybridfahrzeuges, welche Segelphasen und damit Erkenntnisse aus dem Projekt ECC integriert. Daraus erarbeitete Frau Wang weitgehend selbständig ihre ersten wissenschaftlichen Publikationen [KGWa14], [WaKG15], welche sie mit den Kollegen am IPEK während der vereinbarten Präsenz am KIT abstimmte. Die Zusammenarbeit mit dem IPEK wird im neuen Projekt „AHeAD“ fortgeführt.

(4) GETRAG Getriebe- und Zahnradfabrik Hermann Hagenmeyer GmbH & Cie KG, Untergruppenbach

Die Zusammenarbeit mit GETRAG war in der Projektmitte durch eine hohe Priorisierung der Serienprojekte des Hauses für die Mitarbeiter geprägt, welche den Austausch mit der Hochschule wahrnahmen. In der Abschlussphase des deswegen bis M 2015 verlängerten Projektes ECC wurde eine sehr fruchtbare fachliche Betreuung bei der Erarbeitung des automatisierten DKG-

Fahrzeuges (BA M. Umnus, s. u.) realisiert. Auch die Zusammenarbeit mit GETRAG wird im neuen Projekt „AHeAD“ fortgeführt.

Über die Projektpartner hinaus wurde mit anderen Stellen erfolgreich zusammengearbeitet: Zuvor-derst sei die Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeitspsychologie / Verkehrspsychologie der TU Chemnitz (Prof. J. Krems und seinem Mitarbeiter Mag. M. Beggato) hervorgehoben: Frau S. Springer führte in ihrer Bachelorarbeit eine erste Akzeptanzstudie der ECC-Fahrstrategie durch. Die Beschaffung und Fahrzeuginstallation von phys. Verbrauchsmesstechnik sowie optischer Wegmesstechnik brachte intensive Kontakte der studentischen Projektmitarbeiter mit den Anwen-derfirmen, denn die fortgeschrittene Messtechnik von Fzg-Versuchsträgern folgt in auch heutiger Realität nicht dem Prinzip „Plug an Play“. Gleiches gilt für die Nutzung des Prototypen-Steuergerätes der Fa. dspace in der Projektphase C.

II. Eingehende Darstellungen

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele Aufgabenstellung

Die mit der Antragsstellung aufgestellten drei Projektphasen A bis C konnten sehr weitgehend realisiert werden, allerdings aus verschiedenen Gründen zu verschobenen Zeitpunkten. Für eine vollständige Darstellung sei auf die Zwischenberichte ECC vom 30. April 2012, 2013 und 2014 sowie vom 31. März 2015 verwiesen; hier zur Dokumentation der wichtigsten durch die Zuwendung erzielten inhaltlichen Ergebnisse:

„Meilenstein nach Phase A: Die erste Version der ECC-Fahrstrategie ist auf Basis von Simulation und Analyse ausgearbeitet, zu ihrem Nachweis steht das erste Versuchsfahrzeug bereit und die Methodik und Durchführung der Akzeptanzstudie sind festgelegt.“

1.1 Identifikation Projektfahrzeug

Da die Kraftstoffeinsparung durch die ECC-Fahrstrategie bei günstigen Streckenprofilen zwar zweistellige Prozentwerte erreichen kann, jedoch auch niedriger einstellige Einsparungen messbar sein sollten, war es eine Hauptanforderung, aus den an der OBD-Schnittstelle eines Serien-Kfz jedem zugänglichen Größen durch Integration einen Streckenverbrauch ermitteln zu können. Durch fachliche Hilfe des Partners RAConsulting wurden die entsprechenden sog. „PIDs“ (Parameter Identifier) identifiziert, welche relevante Werte wie „Drehzahl“ etc. enthalten. Allerdings wurde schnell klar, dass nicht alle von Seiten der Zulassungsbehörden vorgesehenen PIDs tatsächlich mit Werten belegt sind: Gerade die Größen wie „Durchflussmenge Kraftstoff“ oder „Einspritzmenge“, die eine direkte Verbrauchsinformation gegeben hätten, waren in keinem Fahrzeug belegt. Indirekt kann auf die Kraftstoffmenge theoretisch exakt zurückgerechnet werden aus den Werten der Luftmasse und des Lambda-Wertes, die teilweise belegt waren. So wurden in einer Studienarbeit Testfahrten vergleichend ausgewertet, bei denen ein potentielles Demo-Fahrzeug via OBD mit dem „silver scan tool“ von Partner RAC vermessen wurde, mit folgenden Ergebnissen:

- Fahrzeuge eines jungen Entwicklungsstandes zeigen tendenziell mehr Wert am OBD
- Je nach Menge der abgefragten PIDs ergeben sich Messwiederhol-Frequenzen zwischen 0,1 und 0,4 Sekunden.
- Bei Diesel-Fahrzeugen ist die Rückrechnung des Verbrauches aus dem Lambda-Wert nicht möglich oder deutlich ungenauer als bei Benzinern: Wegen der Qualitätsregelung werden teilweise sehr hohe Lambda-Werte bis über 10 gefahren, deren Messung ungenau ist und deren gemessene Werte oft SW-seitig begrenzt werden. Deswegen wurde der ursprüngliche Ansatz verlassen, für Überlandfahrten weit verbreitete Diesel-Fahrzeuge zu untersuchen.

Abbildung 1 (Folgeside) zeigt, dass der Ford Focus 1,6 T ecoboost eines der besten Datenangebote bereithält, so dass er als Demo-Fahrzeug gewählt wurde.

Übersicht Fahrzeuge und PIDs

vorhanden, notwendig für KST Berechnung

vorhanden, nicht notwendig für KST Berechnung

nicht vorhanden, notwendig für KST Berechnung

nicht vorhanden, nicht notwendig für KST Berechnung

vorhanden und notwendig, jedoch nicht verwendbar da ungenau

		Ford Focus 1.6 EcoBoost	Ford Focus 1.6 TDCI	Renault Grand Scenic dCi 130 Energy	Renault Megane Expression dCi 110 ec	Peugeot 307SW 1.6d	Citroen DS4 2.0	VW C Touran d	Audi A3 2.0 TDI	Audi A5 2.0 TDI	Volvo XC60d5	BMW 118d
		O	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
Fahrzeugdaten	Motortyp Otto/Diesel	O	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
	Hubraum in l	1.6	1.6	1.6	1.5	1.6	2.0	-	2.0	2.0	2.4	2.0
	Anzahl unterstützter PID's in Mode1	29	36	18	14	21	20	27	26	15	45	21
	Maximale Leistung in PS	150	115	130	106	-	163	-	140	170	185	143
	Maximales Drehmoment M.max	240	270	320	240	-	340	-	320	350	400	320
	Mittelwert min. Abtastzeit über OBD Schnittstelle (eine PID) in ms	-	-	103	103	96	41	-	-	-	101	-
	Mittelwert max. Abtastzeit über OBD Schnittstelle (alle PID) in ms	366	439	276	245	281	253	371	-	-	1257	371
	Standardabweichung der minimalen Abtastzeit in ms	-	-	28	23	11	5	-	-	-	9	-
	Standardabweichung der max. Abtastzeit in ms	32	54	46	29	15	34	10	-	-	34	10
PID Tabelle	PID\$04 Calculated Load Value, max value=1.0; teilw. in %	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	PID\$05 Kühlmitteltemperatur in GradC	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	PID\$43 Absolute Load Value	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PID\$0C Engine in RPM	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	PID\$0D Vehicle Speed in km/h	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	PID\$0F Intake Air Temperature in GradC	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	PID\$2F Fuel Level Input in %	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PID\$33 Barometric Pressure in kPa	X	X	-	-	X	X	X	-	-	X	X
	PID\$46 Ambient Air Temperature AAT in GradC	X	X	-	-	X	X	X	X	-	X	X
	PID\$5E Engine fuel rate [l/h@0.05l/h]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PID\$61 Drivers demand Engine Torque in %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PID\$62 Actual engine torque in %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PID\$63 Engine reference torque in Nm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PID\$64 Engine torque data in %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PID\$11 Throttle Position absolute in %	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	PID\$1F Runtime since Engine Start in s	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	X
	PID\$24 Lambda Wert Linearsonde []	-	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X
	PID\$34 Lambda Wert ist []	X	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-
	bis 39 Lambda Wert soll []	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PID\$0B Saugrohrdruck in kPa	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	PID\$10 Luftmassenstrom in g/s	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	PID\$23 Kraftstoffdruck bez. Auf Umgeb. Druck in kPa	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-
	PID\$31 Fahrstrecke seit letztem Fehlerlöschen in km	X	X	X	X	-	-	X	X	-	X	X
	PID\$45 Drosselklappenstellung relativ in %	X	-	-	-	-	-	X	-	-	-	X
	PID\$47 Drosselklappenstellung absolut in %	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PID\$5A Fahrpedalposition relativ in %	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Abbildung 1: Übersicht der untersuchten Fahrzeuge und Parameter

1.2 Analyse der Theorie – Kraftstoffeinsparung durch Segeln

Die theoretische Auslegung der Fahrstrategie konnte im Rahmen der ersten Publikation [KoGr12a] dargestellt werden, ob und wie Segelphasen im Fernverkehr den Streckenverbrauch reduzieren. Nachdem die bisherigen studentischen Arbeiten zwar Hinweise, aber keine grundlegende Klärung erreichten (was evtl. auch ein zu hoher Anspruch an solche Arbeiten wäre), brachte die fokussierte Erarbeitung der ersten Veröffentlichung [KoGr12a] für die VPC-Konferenz im August 2012 einen Durchbruch, indem ein eigenes Berechnungstool aufgebaut wurde, das die Fahrphysik reduziert auf ihren Kern abbildet und damit vollkommene Nachvollziehbarkeit bringt, was bei kommerziellen Simulationstools leider nicht immer gegeben ist.

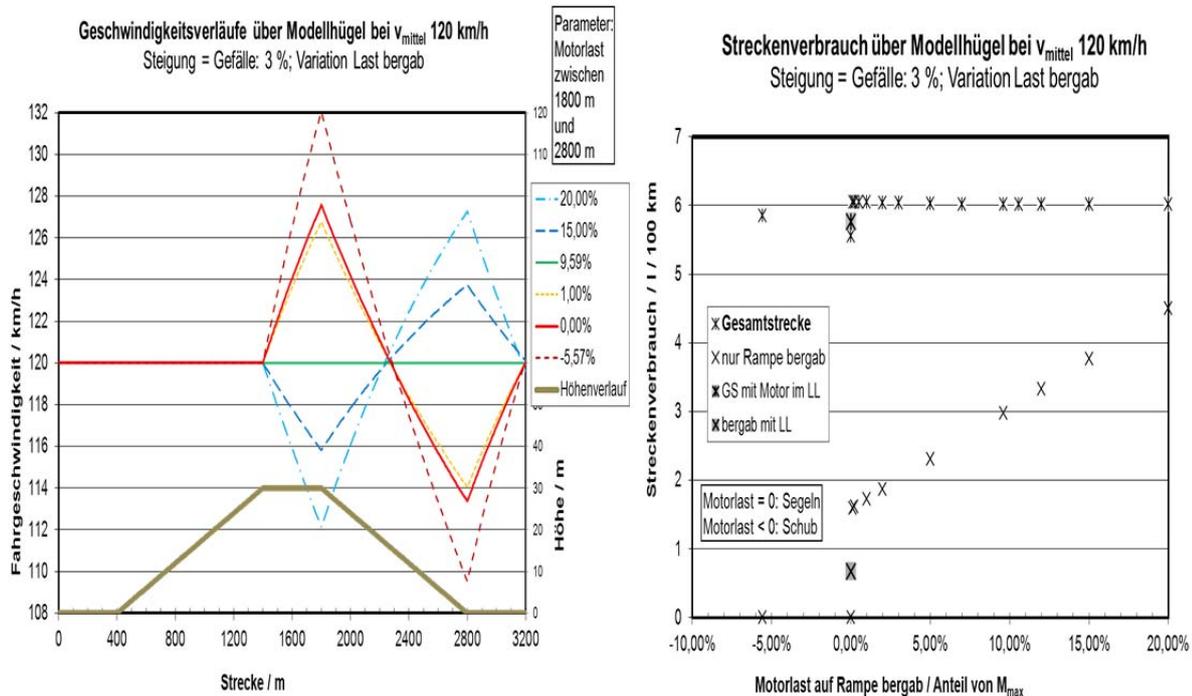


Abbildung 2: Verlauf von Höhe, Geschwindigkeiten und Verbrauch bei Variation Motorlast bergab

An einem Modellhügel konnte gezeigt werden (Abb. 2), dass der Streckenverbrauch sprunghaft um 5 bis 10 % sinkt, sobald Segelphasen integriert werden. Demgegenüber ändert sich der Streckenverbrauch nur in sehr geringem Maße mit dem variierenden Geschwindigkeitsverlauf. Die sprunghafte Verbrauchsminderung ergibt sich dabei, wenn die die Motorlast in einer Bergabphase immer weiter verkleinert und schließlich zu Null gebracht wird, denn bei minimaler Motorleistung geht der Geschwindigkeitsverlauf stetig in denjenigen mit Segeln über, der Verbrauch zeigt jedoch eine Unstetigkeit, da der uneffiziente Motorbetrieb bei niedrigsten Lasten vermieden wird. Randbedingungen sind dabei eine konstante mittlere Geschwindigkeit (typischerweise 120 km/h gewählt) bei mäßiger Varianz der Momentan-Geschwindigkeit (typischerweise innerhalb 100 bis 140 km/h). Im Detail sind die Zusammenhänge in der Veröffentlichung [KoGr12a] dargestellt.

„Meilenstein nach Phase B: Benefits der ECC-Fahrstrategie sind auf Referenzstrecken quantifiziert. Die erste Phase der Akzeptanzstudie validiert Methodik. Beide Ergebnisse definieren Anforderungen für Darstellung automatisierter ECC-Fahrstrategie in Phase C und ermöglichen erste wissenschaftliche Publikationen und Präsentationen in der Öffentlichkeit.“

Die Quantifizierung der Benefits einer ECC-Fahrstrategie konnten sowohl in vertieften Simulationen als auch realen Fahrversuchen erreicht werden. Wissenschaftlicher und allgemeiner Öffentlichkeit wurden die Ergebnisse mehrfach vorgestellt, was auch für die Projektteilnehmer bereichernde Diskussionen ergab [KoGr12a], [KoGr13], [KoGr14]. Im Einzelnen hervorzuheben ist:

1.3 Simulation und Optimierung der ECC-Fahrstrategie auf Referenzstrecken

In Vorbereitung der zweiten Veröffentlichung, die diese Erkenntnisse auf reale hügelige Streckenverläufe übertragen sollte, gab Dr. Karsten Wittek, damals FEV und seit März 2013 neue Kollege als Prof. für Kolbenmaschinen an der HHN (Nachfolge Prof. Windisch) einen entscheidenden Tipp: Dr. K. Rohde-Brandenburger von VW hatte schon 1996 in einem Tagungsbeitrag ausgeführt, dass der Nulleistungs-Verbrauch, also der energetische Aufwand an Kraftstoff, den der Motor benötigt, um seine Funktionen bei gegebener Drehzahl aufrecht zu erhalten, ohne dass auch nur das erste Joule an effektiver mechanischer Arbeit in den Antriebsstrang geleitet wird, den gesamten Streckenverbrauch bestimmt [RoBr96].

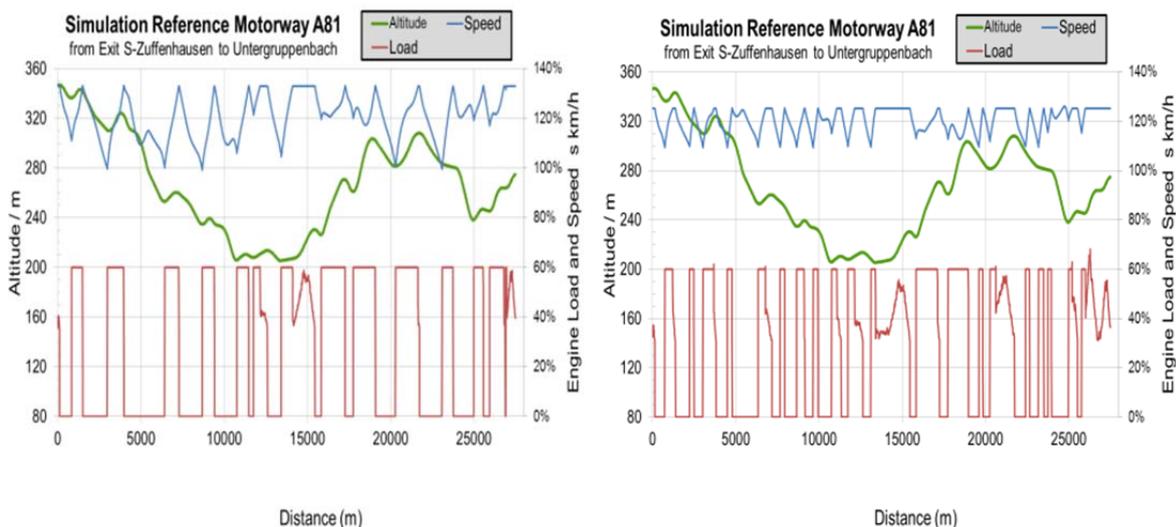


Abbildung 3: Simulation Fahrstrategie ECC auf realer Referenzstrecke bei Variation von v_{\min}

Somit konnte in der zweiten Veröffentlichung [KoGr13] durch die explizite Berücksichtigung des Nulleistungs-Verbrauches auch für reale Hügelverläufe am Beispiel einer Referenzstrecke die Verbrauchsminderungen durch Segeln quantifiziert werden (Abbild. 3). Es wurden die genannten 5 bis 10 % bestätigt, wobei vorausgesetzt ist, dass der Motor bei Segelphasen abgeschaltet wird. Aber auch wenn der Motor im niedrigen „normalen“ Leerlauf ($\sim 800 \text{ min}^{-1}$) weiterläuft, sind Einsparungen von 2 bis 6 % zu erzielen. Diese Werte beziehen sich auf eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit des gleichen Wertes von v_{mittel} , also auf eine konventionelle Tempomatfunktion. Gegenüber realen Werten eines „normalen“ Fahrers würde schon eine solche Fahrt mit Tempomat zu Minderverbräuchen führen, so dass eine Fahrstrategie mit Segeln Potenzial zeigt, real höhere Verbrauchsminderungen zu „erfahren“. Die genannten einstelligen Einsparungen durch Segeln, die bewusst nicht in einem „Best-Case“ Szenario auf maximale Werte optimiert sind, erscheinen nicht phänomenal beeindruckend. Wenn jedoch der Aufwand bei der Weiterentwicklung von Komponen-

ten und Teilsystemen am Kfz betrachtet wird, die zu einer CO₂-Minderung von teilweise unter 1 % führen, ist die Effizienz des Segelns durchaus beachtlich.

Das Grundprinzip einer effektiven ECC-Fahrstrategie ist damit geklärt: Der Zeitanteil von Segelphasen muss maximiert werden! So lässt sich der Nulleistungsverbrauch weitestmöglich vermeiden.

Als zweite Leitlinie sind die Beschleunigungsphasen, welche zum Ausgleich der beim Rollen typischerweise verminderten Momentan-Geschwindigkeiten notwendig sind, so darzustellen, dass möglichst wenige Fahranteile bei niedriger Last sich einstellen. Es ist also keine optimale Fahrstrategie, die Beschleunigungen im Bestpunkt des spezifischen Verbrauches auszuführen.

1.4 Validierung der ECC-Fahrstrategie in Fahrversuchen auf Referenzstrecken

Der Abschnitt der BAB 81 zwischen Stuttgart, Abfahrt Zuffenhausen und Heilbronn, Abfahrt Untergruppenbach, eignet sich gut als Referenzstrecke: er weist einen hügeligen Verlauf aus, ohne dass er als günstigster gelten kann. Des Weiteren ergaben sich Gelegenheiten zu einer größeren Zahl von Fahrten auf dieser Strecke.

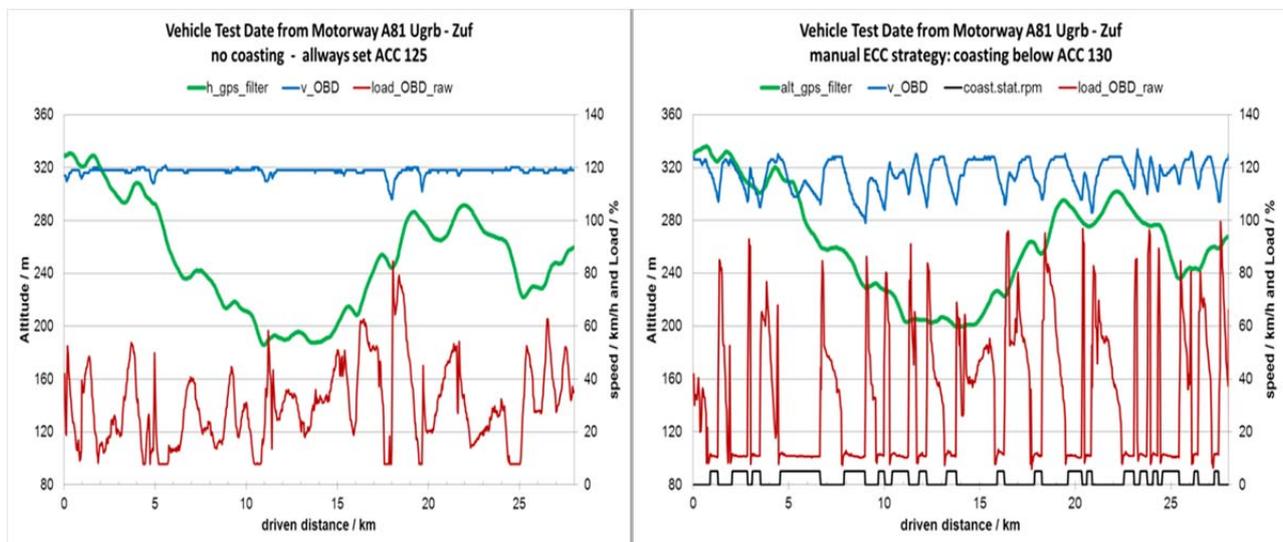


Abbildung 4: Fahrversuche Tempomat-Fahrt (ACC) und ECC-Fahrstrategie auf Referenzstrecke

Exemplarisch sind in Abbild. 4 aus der Publikation [KoGr13] zwei „extreme“ Fahrstrategien dargestellt: Zunächst eine Fahrt mit Tempomat bei weitgehend konstanter Geschwindigkeit. Die kurzzeitigen Abweichungen nach unten sind der Verkehrssituation geschuldet, so dass das Fahrzeug über die Radarsensorik verlangsamt wurde, direkt im Anschluss wurde die Strecke dann mit der ECC-Fahrstrategie eines maximierten Segelanteils durchfahren. Das Segeln wurde manuell über Einlegen des Neutralganges realisiert. Folgerichtig ergibt sich als blaue Kurve ein erheblich variierender Geschwindigkeitsverlauf mit dem Ziel, eine gleiche mittlere Geschwindigkeit zu erreichen, was über den Bordcomputer kontrolliert werden konnte und mit 117,1 km/h gegenüber 118,6 km/h auch ausreichend genau gelang.

Interessant sind die Unterschiede im Verlauf der Motorlast, dargestellt als rote Kurven. Ihre Skalierung entspricht dem über die offene OBD-Schnittstelle ausgegebenen Lastwert, d. h. +8 % entsprechen dem Motorbetrieb im niedrigen Leerlauf, 100 % bedeuten „Vollgas“. Durch das hügelige Streckenprofil zeigt auch die Fahrt mit Tempomat eine große Variationsbreite der Motorlast. Auffällig ist der hohe Anteil an Fahrzuständen mit niedriger Motorlast zwischen 10 und 40 % - wo ein Verbrennungsmotor mit geringem Wirkungsgrad läuft.

Im Diagramm zur ECC-Fahrt wird eine größere Variationsbreite der Motorlast sofort augenscheinlich: das Ziel der Fahrstrategie, möglichst hohe Anteile des Motor-LL zu erzielen wurde mit einem

Wert von 40 % der Strecke erreicht und ist durch den digitalen Verlauf des eingeführten Parameters „coast.stat.rpm“ dokumentiert, der Motorbetrieb unterhalb der Drehzahlschwelle von 1000min^{-1} als LL interpretiert, was bei den gezeigten Geschwindigkeiten sicher erfüllt ist. Die bei der ECC-Fahrt auftretenden Fahrzustände hoher Motorlast, die für die Beschleunigung nach einer Segelphase eingesetzt werden, lassen mit dem „zackigen“ Geschwindigkeitsverlauf den Eindruck einer unkomfortablen Fahrweise entstehen. Trotz des mit $110\text{ kW} / 240\text{ Nm}$ überdurchschnittlich motorisierten Fahrzeugs der Kompaktklasse ($m_{\text{real}} = \text{ca. } 1350\text{ kg}$) täuscht dieser Eindruck: da es um Kraftstoffsparen geht, wurde natürlich alles im höchsten 6. Gang gefahren und Abbild. 5 zeigt an Hand einer gezoomten Darstellung aus diesem Fahrversuch: Nach einer Segelphase von 40 s steigt innerhalb von 6 s die Geschwindigkeit von knapp 100 km/h hier auf ca. 115 km/h , was keineswegs die Mitfahrer unangenehm „in die Sitze drückt“.

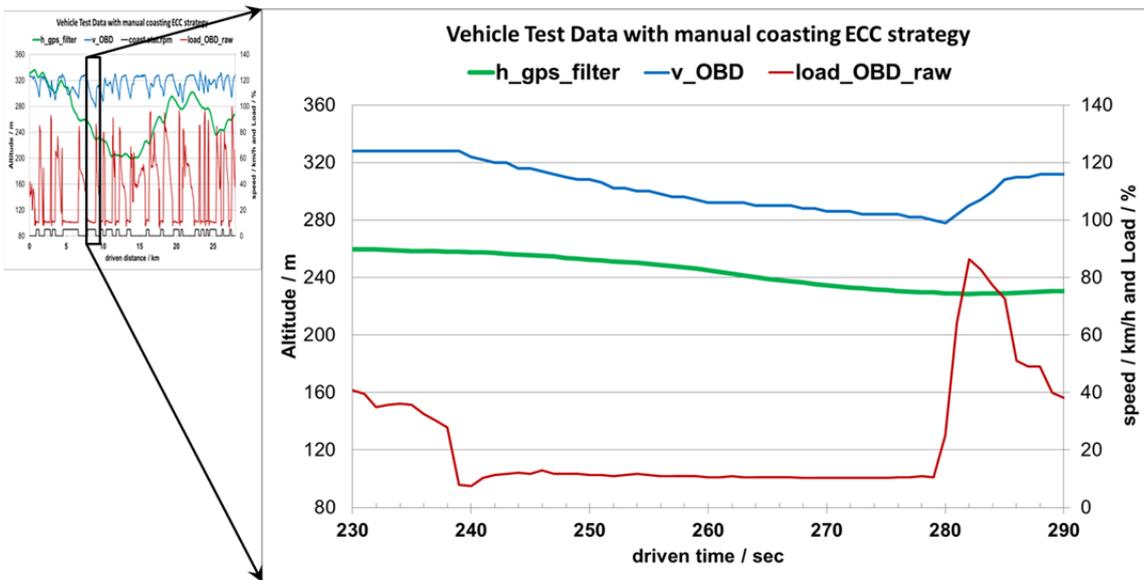


Abbildung 5: Geringe Dynamik des Fahrversuches ECC-Fahrstrategie in gezoomter Darstellung

Auch der subjektive Eindruck des NVH-Verhaltens erscheint unkritisch: die erhöhte Motorlast ist wahrnehmbar, aber bei den auftretenden Drehzahlen zwischen 2000 min^{-1} (entspricht 88 km/h im 6. Gang) und 3000 min^{-1} (entspricht 132 km/h im 6. Gang) nicht störend, zumal Abroll- und Windgeräusche dominieren.

Strategie		A81 nord 28km -70m Δh_{tot}			A81 süd 28km +70m Δh_{tot}		
		v.mittel	Verbrauch	Segeln	v.mittel	Verbrauch	Segeln
		km/h	l/100km	%	km/h	l/100km	%
ACC125	log	118,6	5,71	0	118,7	6,86	
ECC	log	117,1	5,49	40,0	117,6	6,78	31,2
ECC Motorstopp		117,1	5,25	40,0	117,6	6,64	31,2
Verbrauchsminderung_{cor}		6,8 %			2,4 %		
ACC125	BC	120	5,6	0	120	6,9	0
ECC	BC	119	5,4	-	119	6.7	-

Tabelle 1: Kraftstoffeinsparungen auf Referenzstrecke im Fahrversuch

Tabelle 1 dokumentiert die Effekte auf den Kraftstoffverbrauch. Dabei wurde bei den Daten aus der On-Board Messtechnik (Kennzeichnung „log“) die geringere mittlere Geschwindigkeit korrigiert, indem der gemessene Verbrauch mit dem Faktor 0,05 (l/100km) pro km/h mittlere Geschwindigkeit aus Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit erhöht wurde. Mit der so gemessenen Ersparnis von knapp 7 % konnten die Werte aus der Simulation bestätigt werden. Bei diesem Wert wurde der LL-Verbrauch in den Segelphasen herausgerechnet („Motorstopp“), wobei jeweils 40 ml Kraftstoff für einen Wiederstart des warmen Motors angesetzt wurde.

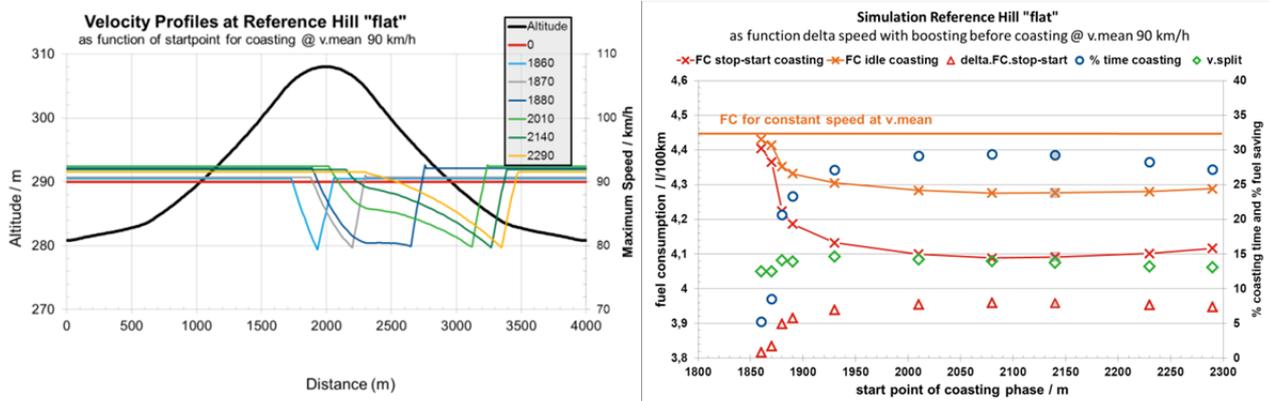
1.5 Kriterium CPL zur Nutzung des Segelns für Pkw

Aus den veröffentlichten Arbeiten – [KoGr12a], [KoGr13] – erwuchs die Notwendigkeit, das Optimum des Einleitens einer Segelphase zu quantifizieren, gerade im Hinblick auf das Gesamtziel dieses Projektes ECC, eine automatisierte Fahrstrategie zu entwickeln. Diese Fragestellung konnte in einer Veröffentlichung (peer-reviewed bei SAE World Congress 2014) im Wesentlichen geklärt werden. [KGWa14]

1.5.1 Optimaler Beginn einer Segelphase

Die Parameterstudie wurde an zwei quasi-realen symmetrischen Modellhügeln durchgeführt (Abbildung 6). Sie wurden durch Spiegeln zweier Steigungen im schon früher genutzt Streckprofil der Referenzstrecke Autobahn A 81 gewonnen. Im Folgenden als „steep“ = steil und „flat“ = flach bezeichnet, dienen sie dazu, allgemeine Aussagen zu typischen Streckenprofilen bei Überlandfahrt zu gewinnen.

Wichtig ist, dass alle Vergleiche sich immer auf gleiche mittlere Geschwindigkeiten beziehen, da sonst die relativ geringen Unterschiede im einstelligen Prozentbereich immer fragwürdig bleiben – das langsamere Fahren den Kraftstoffverbrauch i. A. reduziert muss nicht erforscht werden. Des Weiteren wird von einer Leitgeschwindigkeit und einer maximal erlaubten, absolut vorgegebenen Differenzgeschwindigkeit ausgegangen. Zu Grunde liegen die Parameter des Projektfahrzeugs Ford Focus.



Abbild. 6: Verlauf von Höhe, Geschwindigkeiten und Verbrauch bei Variation Startpunkt der Segelphase mit konstanter mittlerer Geschwindigkeit 90 km/h

Abbildung 6 zeigt, dass ein zu früher Beginn vor der Hügelkuppe nur eine zu kurze Segelphase ergibt. Sobald jedoch die Segelphase ausreichend spät initiiert wird, ergeben sich mit längerer Segelphase die ermittelten Einsparungen (rechtes Diagramm im Abbild. 6). Zentrale Erkenntnis ist dabei, dass der Kraftstoffverbrauch ein sehr flaches Minimum aufweist. Das ist günstig, denn damit erreicht man einen weiteren Freiheitsgrad in der Applikation einer automatisierten Fahrstrategie: naheliegend ist es, die Segelphase dann einzuleiten, wenn das Verkehrsumfeld es als opportun erscheinen lässt. Diese Erkenntnis (u. a.) führte zum Folgeantrag des Forschungsprojektes „AHeAD“, welches die Einbindung moderner Umfeldsensoren zum Ziel hat.

1.5.2 CPL-Funktion als Kriterium zur Applikation des Beginns einer Segelphase

In derselben Veröffentlichung [KGWa14] konnte mit der CPL-Funktion (Coasting Preview Length CPL) ein Kriterium aufgestellt werden, wann bei bekanntem Streckenprofil die Segelphase frühestmöglich eingeleitet werden kann. Es wird mit der CPL eine kontinuierliche Vorschau der Länge einer Segelphase ermittelt, die mit nur geringem Rechenaufwand verbunden ist:

Die CPL wird aus der Energiebilanz (1) der Segelphase abgeleitet, die ja durch Entfall einer Antriebskraft definiert ist zu:

$$\int_2^1 F_{res} ds = \Delta E_k + \Delta E_p \quad (1)$$

mit

$$F_{res} = m \cdot g \cdot f_r + \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot v^2 = k_r + k_d \cdot v^2 \quad (2)$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} m_\lambda \cdot (v_1^2 - v_2^2) = m_\lambda \cdot \Delta v \cdot v_{mean} \quad (3)$$

Damit bekommt man die Differenzgleichung

$$ds = \frac{m_\lambda \cdot dv \cdot v + m \cdot g \cdot dh}{k_r + k_d \cdot v^2} \quad (4)$$

Durch die schrittweise Integration ergibt sich eine Funktion

$$CPL(s_0) = s_{CP} - s_0 \quad (5)$$

Die Segelvorausschaulänge CPL wird an jedem Punkt s_0 unter den Randbedingungen von bekannter Geschwindigkeit $v(s_0)$ und Höhe $h(s)$ ermittelt und von einem bestimmten maximale Δv begrenzt. Abbildung 7 zeigt die CPL-Funktion für verschiedene Δv über beide Referenzhügel, das linke Diagramm entspricht dem Szenario in Abbild. 6.

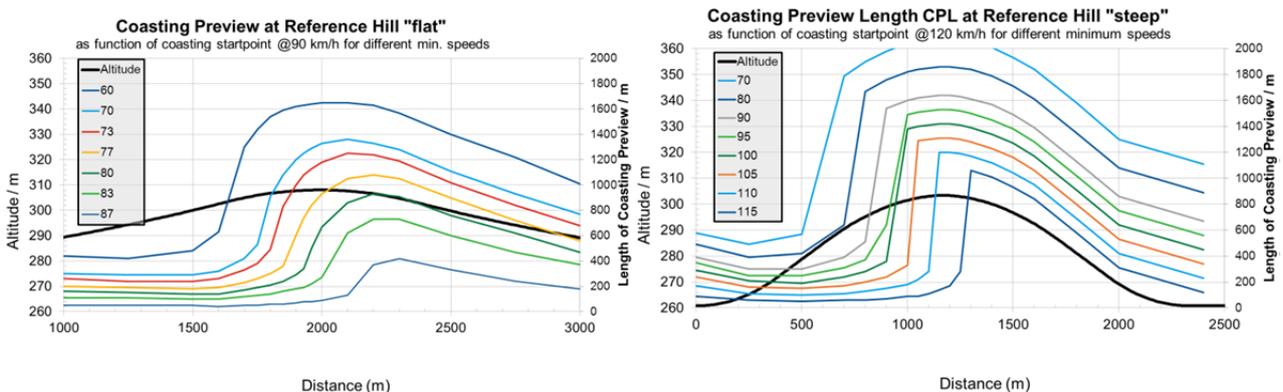


Abbildung 7: Verlauf von CLP bei Variation Minimum Geschwindigkeit für mittleren Geschwindigkeiten 90 und 120 km/h

Es ergibt sich, dass der klar zu identifizierende Wendepunkt der CPL-Funktion ein geeignetes Kriterium ist für den frühesten Zeit- bzw. Streckenpunkt ist, eine Segelphase sinnvoll einzuleiten.

1.5.3 Einfluss der Mindestgeschwindigkeit zu Ende einer Segelphase

Die Minimum-Geschwindigkeit erscheint als ein wichtiger Parameter für die Akzeptanz einer Fahrstrategie mit Segeln, wobei es ein Spannungsfeld zwischen Kraftstoffeinsparung und Akzeptanz gibt. Abbildung 8 zeigt die Untersuchung des Einflusses von v_{min} :

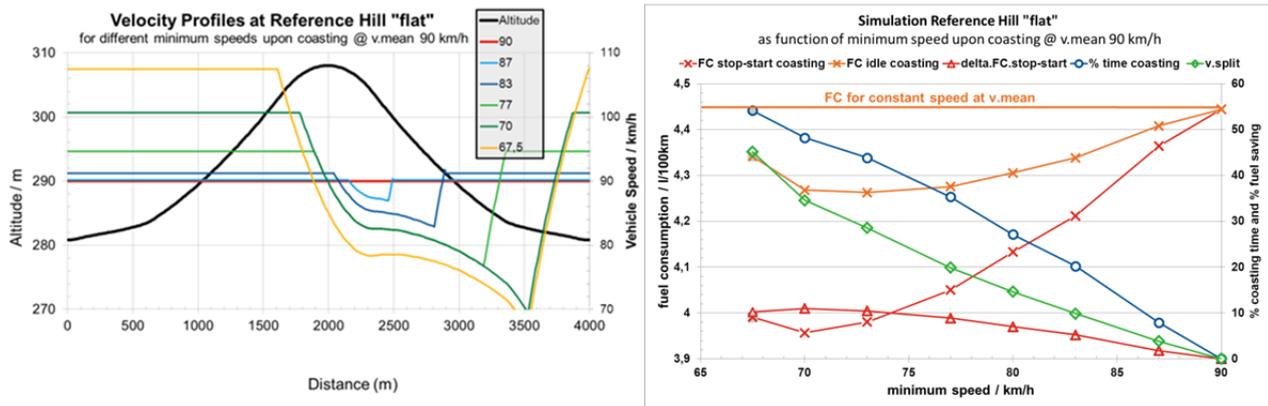


Abbildung 8: Verlauf von Höhe, Geschwindigkeiten und Verbrauch bei Variation Geschwindigkeitsabweichung Δv mit konstanter mittlerer Geschwindigkeit 90 km/h

Hier für den Fall des „flachen“ Referenzhügels und der niedrigen mittleren Geschwindigkeit, aber durchaus auch für andere Orte des Parameterraumes geltend, zeigt sich, dass eine nennenswerte Geschwindigkeitsabweichung realisiert werden muss, um die Kraftstoffeinsparung zu erzielen: Erst bei v_{min} von 80 km/h oder darunter wird nahezu das volle Potenzial erschlossen. Die Segelphase zu noch geringeren Geschwindigkeiten auszudehnen, bringt anschließend kaum weiteren Benefit. Bei extremer Auslegung, in dem bis herunter zu Geschwindigkeiten unter 70 km/h gesegelt wird, steigt der Verbrauch sogar wieder an. Das ist durch eine Überkompensation zu erklären, wenn außerhalb der Segelphase umso schneller gefahren werden muss, um die konstanter mittlere Fahrgeschwindigkeit aufrecht zu erhalten.

1.5.4 „Sägezahn“-Geschwindigkeitsprofil: Segelphasen auf ebener Strecke

Für den eher „populärwissenschaftlichen“ Vortrag beim HIN-Kolloquium der Audi AG in

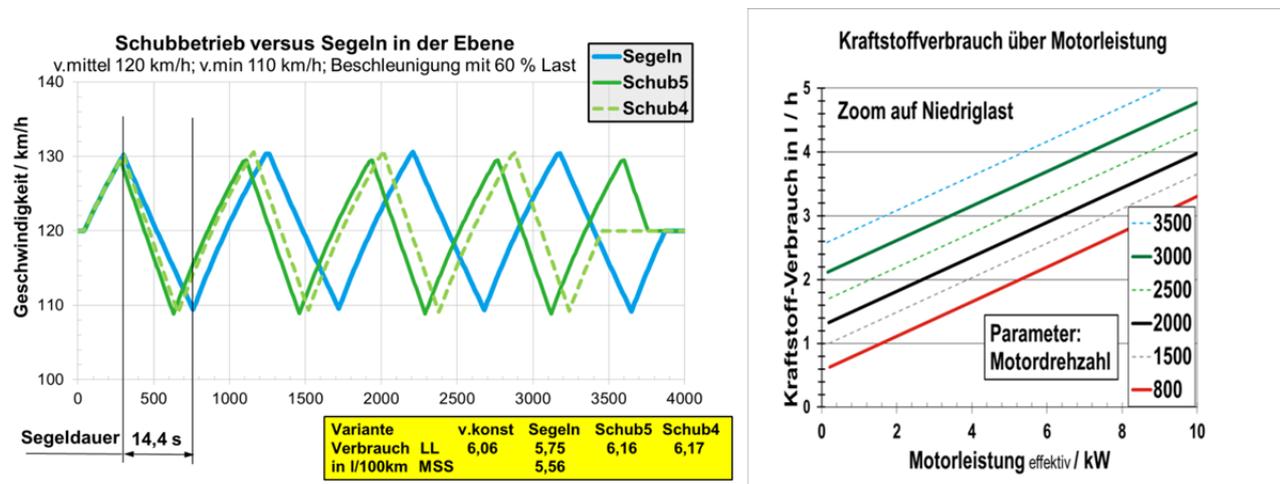


Abbildung 9: Verlauf der Geschwindigkeiten und Verbrauchseffekt von Segeln im Vergleich zu Schubphasen auf ebener Strecke

Neckarsulm am 16. Januar 2014 wurde simuliert, welche Effekte ein Segeln auf ebener Strecke haben würde. Die lebhafte Diskussion erwartend, wurde zunächst dargestellt, dass Segeln auch dann Kraftstoff spart, wenn der Motor im Leerlauf weiterläuft. Viele interessierte Autofahrer unterliegen dem Irrglauben, dass die seit Jahrzehnten etablierte Schubabschaltung den dominanten Effekt bei der Minderung des Kraftstoffverbrauches bringe. Das Willans-Diagramm rechts in Abbildung 9 quantifiziert den Anteil des Nulleistungsverbrauchs. Dessen Dominanz bei der Herleitung des Minderungspotenzials durch Segeln ist bereits erläutert und veröffentlicht worden. [KoGr12a], [KoGr13].

„Meilenstein nach Phase C: Automatisierte ECC-Fahrstrategie läuft über Entwicklungstools im Versuchsfahrzeug mit DCT. Die zweite Phase der Akzeptanzstudie erlaubt die Ausarbeitung eines Konzeptes zur Serieneinführung der ECC-Fahrstrategie. Ergebnisse zur Technik und Usability sind wissenschaftlich publiziert und in der Öffentlichkeit präsentiert.“

Der zentrale Punkt einer automatisierten ECC-Fahrstrategie basierte auf der Zusammenarbeit mit Partner GETRAG, weswegen das Projekt um ein knappes Jahr verlängert wurde. Wesentliche Inhalte der Automatisierung konnten durch eine Rückfalllösung dargestellt werden; diese war jedoch nur durch eingewiesene Versuchsfahrer nutzbar und erlaubte so nicht, eine breite Akzeptanzuntersuchung durchzuführen. Die vorgesehenen Studien einer Nutzung des Segelns auch bei Hybridfahrzeugen konnten bereits veröffentlicht werden [KGWa14], [WaKG15] und waren fundamentale Basis für den erfolgreichen Projektantrag zu „AHeAD“, der uns ermöglicht, die Forschungsarbeiten in diesem Feld zusammen mit dem Kollegen Prof. R. Zöllner fortzuführen.

1.6 Eine Automatisierte Segelstrategie in einem Pkw mit Doppelkupplungs-Getriebe (DKG, englisch DCT) wurde erreicht

1.6.1 Realisierung der Automation des Wählhebels

Ausproben mit angemieteten Serienfahrzeugen ergaben, dass in allen relevanten Fahrzuständen das manuelle Segeln durch ein Verschieben des Wählhebels von D nach N, als auch die umgekehrten Aktion inkl. sofort folgender Betätigung der RES-Taste und dadurch Wiederbeschleunigung auf die Sollgeschwindigkeit des Tempomaten nicht gesperrt ist. Dies bezieht sich auf Fahrzeuge des VW-Konzerns, die mit den eigenen „DSG“-Getrieben marktführend speziell bei DKG-Anwendung in Deutschland ist. Fahrzeuge mit DKG des Partners GETRAG sind gerade bei Mietfahrzeugen weiter weniger verbreitet oder mit veralteten Motorisierungen, wie z. B. beim Ford Focus. Daher war die Idee geboren, als Backup-Lösung diese Wählhebelverschiebung zu automatisieren, um darüber eine Segelstrategie autonom darzustellen.

Als studentische Projektarbeit „ECC 17“ haben Steffen Albrecht und Moritz Jakob diese Aufgabe in einer der besten Leistung aller Studienarbeiten umgesetzt: aus Zielvorgabe ein eigenes Pflichtenheft, Konzeptklärung Aktuator, auch durch Kraft-Wegmessung am Wählhebel, CAD-Konstruktion einer flexible Anbringung im Fzg., Realisierung eines einfachen Steuergerätes inkl. externer Schnittstelle für Folgearbeiten, welches den Aktuator operiert, Anfertigung und Inbetriebnahme der vorzeigbaren Konstruktion im Mietfahrzeug – alles pünktlich zum Zieltermin Anfang Januar. Damit haben viele Studierende große Schwierigkeiten.



Abbildung 10: Ausführung Wählhebel-Aktuatorik

Die Wählhebel-Aktuatorik wurde durch eine Sonder-Taste am Lenkrad aufgerufen – das System der Studierenden hat sehr weitgehend zuverlässig funktioniert. Mehr noch: in den manuellen Fahrversuchen zeigte sich, dass ein solch einfach per Knopfdruck eingeleitetes Segeln erhebliches Potenzial bietet in Fahrsituationen, die bei ECC nicht primär im Fokus stehen: im Stadt- und Stadtumgebungsverkehr ergeben sich Notwendigkeiten, die Fahrgeschwindigkeit im überblickten Horizont zu vermindern: z. B. ist eine Ampel rot in der Stadt mehrere 100 m voraus. Konventionell fährt man über das Fahrpedal weiter („sie kann ja jederzeit grün werden“) um relativ kurz vorher abzubremesen. Wird stattdessen ab Erkennen der roten Ampel gesegelt, verliert ein Fahrzeug (zumindest auf ebener Strecke) so langsam an Geschwindigkeit (im Gegensatz zu Schub = Motorbremse), dass Segeln gut akzeptabel wird. Und per Knopfdruck wird es deutlich nutzerfreundlicher als die konventionell ja mögliche Alternative, den Wählhebel auf dem Mittelunnel zu verschieben. Diese Erkenntnisse sind nicht grundsätzlich neu, ihr praktisches Erleben durchaus beeindruckend. Umgesetzt sind sie in Serienfahrzeugen des VW-Konzerns, in den per Fahrmodul-Vorwahlschalter gesegelt wird, sobald der Fahrer den Fuß vom Fahrpedal nimmt. Die übliche Systemreaktion ist ja Schubbetrieb = Motorbremse. Leider sind diese Fahrzeuge im Fuhrpark der VW-eigenen Vermietung bislang nicht identifiziert, denn eine unabhängige Untersuchung des Einsparpotentials dieser Funktion erscheint ein lohnendes Folgeprojekt (z. B. für eine Abschlussarbeit).

1.6.2 Umsetzung in einem Serien-Fahrzeug mit Automation des Wählhebels

Herr Michael Umnus erarbeitete in seiner Bachelorarbeit, eine Erstversion einer automatisierten Segelstrategie im Fahrzeug darzustellen. Wie in der Industrie üblich, wird eine solche neue Funktionalität im „Bypass“, d. h. in einem Prototyp-Steuergerät (oder SW-Modul) realisiert, separat („in the loop“) getestet und zuletzt im Fahrzeug validiert. Über Projektmittel konnte dafür die μ -Autobox der Fa. dspace angeschafft werden, welche sehr flexibel für verschiedenste Entwicklungsaufgaben genutzt werden kann und weit über das Projekt ECC studentische Projektarbeit einem Industriestandard entsprechend erlauben wird – ECC fördert damit sehr direkt den Ingenieur-Nachwuchs!

Kern der Arbeit von M. Umnus war es, die Fahrstrategie im universellen Tool Matlab/SIMULINK in sauberer Struktur der einzelnen Funktionsblöcke aufzubauen, was direkt auf die Grundalgenausbildung im Studiengang ASE aufbaut. Diese anspruchsvolle Aufgabe erreichte er auch mit beispielhafter Unterstützung von GETRAG-Systemingenieur Dr.-Ing. R. Richter. Ein Kernelement war die Umsetzung des Entscheidungskriteriums ‚Änderung der voraussichtlichen Segellänge‘ (CPL-Funktion) [KGWa14]. Die Tests erfolgten zunächst mit der μ -Autobox im Labor, indem bei virtueller Fahrt die korrekte Ausgabe des Segelbeginns verifiziert wurde. Daneben wurde als wesentlicher Teil der Bachelorarbeit die Kraftstoffeinsparung im Vergleich mit einer Excel-Berechnung quantifiziert, was Resultate ganz in der Nähe der von Projektleiter veröffentlichten Ergebnisse zeigte.

So konnte Herr M. Umnus in seine BA zeigen, dass eine Rückschaltung nach einer Segelphase, um im kleineren Gang schneller auf die Sollgeschwindigkeit zurückzukehren, grundsätzlich mit Mehrverbrauch verbunden ist, was vorher intensiv diskutiert worden ist.

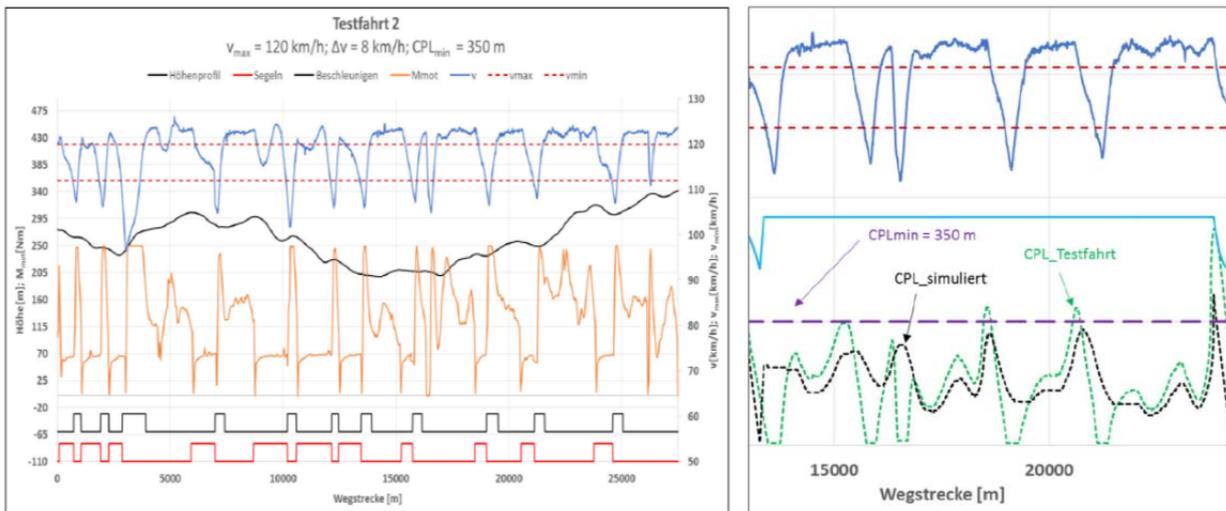


Abbildung 11: Validierung automatisierte Segelstrategie

Die sehr gute Bachelorarbeit wurde abgerundet, indem im angemieteten DKG-Fahrzeug VW-Golf erste Fahrten auf der Referenzstrecke durchgeführt wurden:

Das primäre Ziel – auch des Gesamtprojektes ECC – wurde damit erreicht: das Fahrzeug leitet selbständig Segelphasen ein, wo sie vom Streckenprofil her Kraftstoffeinsparungen bringen.

Der Umfang der Validierung war allerdings sehr begrenzt, z. B. nur auf eine Fahrtrichtung der Referenzstrecke. Des Weiteren zeigte sich, dass je nach Setzung der Parameter wie CPL-Grenzwert an einigen Stellen Beginn und Ende der Segelphase suboptimal gesetzt wurden, z. B. nach einer Senke zu spät in der Gegensteigung wieder beschleunigt wurde. Solche Nachjustierungen einer doch im Detail komplexen neuen Funktion kommen keineswegs unerwartet. Die Weiterentwicklung ist inzwischen in einer anschließenden Studienarbeit aufgenommen worden.

1.7 Vorausschauende Betriebsstrategie für Hybridfahrzeug mit Segeln-Funktion

Im ersten Ansatz der ECC-Fahrstrategie für Hybridfahrzeug wurde in [KGWa14] gezeigt, dass mit Hybridantriebe bei hügeligem Streckenprofil durch Integration der Segeln-Funktion ein Einsparpotenzial bis zu 6 % erreicht werden kann. Um die ECC-Fahrstrategie weiter zu entwickeln, wird eine neue vorausschauende Betriebsstrategie mit Segeln-Funktion für Hybridfahrzeug erstellt und erste Simulationsergebnisse präsentiert [WaKG15].

1.7.1 Methodik

Unser erster Lösungsansatz ist eine gemischte heuristische und lokale Optimierung anhand eines abgeschätzten Geschwindigkeitsprofils. Diese Strategie ist nur die Längsdynamik berücksichtigend. Sie besteht aus zwei Teilen, Geschwindigkeits-Prognose und regressive Bestimmung des Betriebsmodus.

Geschwindigkeit-Prognose

Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird durch Nutzung der Verkehrskontexte abgeschätzt, die vom Navigationssystem, Adaptive Cruise Control System und evtl. weiteren Sensoren erfasst werden. Zur Minimierung des Rechenaufwands der Strategie und verschiedener Reichweiten der Sensoren werden zwei Bereiche definiert, Nah- und Fernbereich (short-/long-distance zone in Abbildung 12). In diesen zwei Bereichen werden die Fahrzeuggeschwindigkeiten abgeschätzt und die Betriebsmodi bestimmt. Anhand des abgeschätzten Geschwindigkeitsprofils wird die Segeln-Funktion integriert.

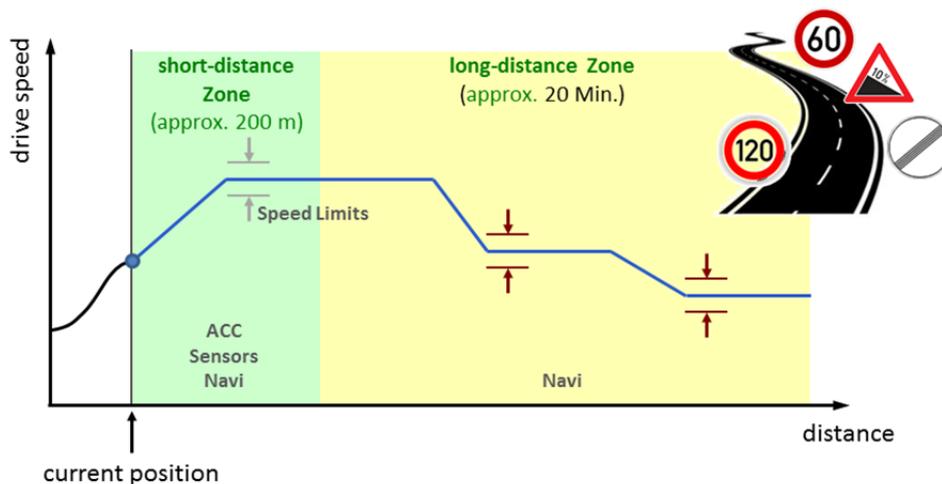


Abbildung 12: Geschwindigkeit-Prognose im Nah- und Fernbereich

regressive Bestimmung des Betriebsmodus

Anhand des Geschwindigkeitsprofils werden die Betriebsmodi regressiv zunächst im Fernbereich und dann im Nahbereich bestimmt. Jeder Teil der Strategie wird während der Fahrt aktualisiert. Die Aktualisierungszeit für Geschwindigkeit-Prognose und Modi-Bestimmung im Fernbereich ist ca. 10-fach länger als die Aktualisierungszeit für Modi-Bestimmung im Nahbereich aufgrund des Reichtumsaufwands.

Eine gemischte heuristische und lokale Optimierung wird als der Algorithmus für Modi-Bestimmung im Nah- und Fernbereich verwendet. Beide Bereiche werden mit Stützpunkten diskretisiert. Nach dem Fahrgeschwindigkeitsprofil und Fahrzeugstatus werden die möglichen Modi als Kandidaten ausgewählt. Jeder Kandidat wird mit einer Note bewertet. Die Note wird durch eine Kostenfunktion (Formel (6)) kalkuliert, die aus drei Teilnoten - Effizienz, Betriebsmodi-Wechsel Komplexität und SOC-Leveling - und Gewichtungsfaktoren $w_{1,2,3}$ besteht. Der Kandidat mit der höchsten Note wird als Betriebsmodus ausgewählt. Diese Bewertung und Auswahl angewendet schrittweise bis zum Punkt, die am Beginn des Fern-/Nahbereich ist.

$$Note = w_1 \cdot Note_{Effizienz} + w_2 \cdot Note_{Komplexität} + w_3 \cdot Note_{SOC-Leveling} \quad (6)$$

Die Note-Effizienz wird als Tank-to-Wheel Effizienz definiert. Die Teilnote Komplexität bewertet die Betriebsmodi-Wechsel zwischen den vorhergehenden Betriebsmodus und dem aktuellen. Die Teilnote SOC-Leveling ermöglicht eine Vorsorge von der Laden und Entladen der Batterie, die von der SOC-Änderung der künftigen Strecke abgeleitet ist. Das Hauptziel des Fernbereichs ist der SOC-Ausgleich, daher wird diese Teilnote SOC mit Hilfe der Gewichtungsfaktor w_3 im Fernbereich priorisiert. Das Ziel der Betriebsstrategie im Nahbereich konzentriert sich mehr auf den Fahrkomfort, und liefert daher einen anderen Satz von Gewichtungsfaktoren, die die Teilnote-Komplexität mit höherer w_2 Wert betont.

1.7.2 Simulationsergebnisse

Der Ford Focus als Referenzfahrzeug wird virtuell hybridisiert mittels Axle-Split-Konzept [WaKG15] und auf der Referenzstrecke simuliert. Die Referenzstrecke ist eine hügelige Strecke auf der deutschen Autobahn A81 zwischen den Ausfahrten Pleidelsheim und Ilsfeld, insgesamt 11,4 km. Die vorausschauende Betriebsstrategie realisiert eine Versorgung des Energiemanagements, z. B. Ausnutzung der Rekuperationsenergie durch vorheriges rein elektrisches Fahren und vorgeschaltetes Laden der Batterie, um eine lange elektrische Fahrt zu ermöglichen. Mit mehr Berücksichtigung der Komplexität im Nahbereich schaltet diese Strategie den Verbrennungsmotor früher vor den Segelphasen und vermeidet unnötiges An- und Ausschalten der elektrischen Maschine.

Vergleicht man den Verbrauch mit einer regelbasierten Strategie ohne Segeln-Integration zeigt diese vorausschauende Betriebsstrategie ca. 13% Optimierung (Tabelle 2). Die mittlere Geschwindigkeit dieser Strategie ist niedriger als jener der regelbasierten Strategie wegen der Segeln-Integration. Vergleich den Verbrauch mit der regelbasierten Strategie mit gleicher mittleren Geschwindigkeit hat diese vorausschauende Betriebsstrategie ca. 10% geringeren Verbrauch.

	Kraftstoffverbrauch (L/100km)	elektrischer Verbrauch (kWh)
vorausschauende Strategie	5,43	0,04
regelbasierte Strategie	6,3	0,14
regelbasierte Strategie (gleiche v_{mittel})	6,1	0,06

Tabelle 2: Kraftstoffverbrauch bei vorausschauender Strategie und regelbasierter Strategie

1.8 Ergebnisse zur Technik und Usability

Hervorzuheben sind die zwei unabhängigen studentische Arbeiten, ein Bachelorprojekt und das Masterprojekt, die beide das Ziel hatten, einem (Versuchs-) Fahrer ein ‚human machine interface‘ HMI bereit zu stellen, um zu einer Fahrstrategie mit Segeln angeleitet zu werden. Die Studienarbeit mit Hilfe eines Linux-basierten Rechners und dessen Bildschirm, das Masterprojekt als App auf einem Android-System. Abbildung 13 zeigt zwei Beispiele für Teilfunktionen der App: das Anlernen einer Route wie eine Option der Fahrerinformation.

Es zeigte sich dabei auch, wie herausfordernd eine vermeintlich „einfache“ Aufgabenstellung, den Fahrer zu informieren, wann gesegelt werden soll, unter den komplexen Anforderungen der Fahr-funktionen ist.



Bild 13: Beispiele für HMI aus Masterprojekt „ECC-APP“ mit Symbol 

Aspekte des HMI wurden unter dem Leitbegriff der „Akzeptanz“ auch aktiv von Frau S. Springer als Abschlussarbeit ihres Studium „Sensorik und kognitive Psychologie“ an der TU Chemnitz bearbeitet. Sie setzt Methodiken Ihres Fachbereiches ein, z. B. eine geführte und dokumentierte Fokusgruppensitzung, deren Inhalte mit mir als Projektleiter in mehreren Fachgesprächen abgestimmt wurden. Es ist besprochen, nach dieser ersten Bachelorarbeit weitere Themenstellungen zu prüfen; gerade die ersten Erfahrungen der technischen Gestaltung eines HMI bieten verschiedene Ansätze zu fruchtbarer Kooperation über die Fachgrenzen hinaus, die auch für das neue Projekt „AHEAD“ vereinbart worden ist.

2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Investitionen:	77710,19 €
Personalkosten:	133.676,55 €
Mieten	3.655,61 €
Sonst. Allg. Verwaltungsausgaben	22.574,20 €
Reisekosten (Ausgabeart 0846)	5.104,26 €

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit inklusive des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen (Punkt II 5. des Musterberichtes BNBest-BMBF 98)

Die Grundidee des Forschungsprojektes ECC zum Zeitpunkt der Antragstellung 2010, Kraftstoff sparend zu fahren, indem gezielt das Fahrzeug rollen gelassen wird, hat seit dem eine stark ausgeweitete Aufmerksamkeit erhalten. Ein Beleg dafür ist, dass es im deutschsprachigen Wikipedia.org seit Mitte 2014 eine eigene Seite gibt „Segeln (Kraftfahrzeuge)“ [wikS16]. Der ZE dieses Projektes hat sich bislang dort nicht eingebracht. Die dort in der Diskussion aktuell aufgeführte Behauptung, dass Motor-Stopp den größten Einspareffekt hätte, konnte in diesem Projekt widerlegt, bzw. geklärt werden [KoGr13].

Fahrstrategien unter Nutzung von Segelphasen werden bei großen OEMs und Systemzulieferern intensiv entwickelt. Die Elektronik-Experten bei Hella haben eine Funktion entwickelt, die Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb hilft, zu segeln. Fa. Bosch hat Entwicklungen einer so genannten E-Clutch veröffentlicht: Durch eine elektromechanische Kupplungsbedienung wird auch ein automatisiertes Öffnen des Antriebsstranges und damit Segeln möglich, während das HMI eines konventionellen, in Europa am weitesten verbreiteten MT-Fahrzeugs mit Kupplungspedal und Schalthebel erhalten bleibt.

Aus naheliegenden Gründen des Wettbewerbs werden die kurz vor Serieneinsatz des Segelns laufenden Aktivitäten nicht in wissenschaftlichen Publikationen nachvollziehbar dargelegt.

Dennoch gibt auch aus jüngster Vergangenheit neue relevante Publikationen, zum Beispiel [Graf13] und [Fleh14]. Des Weiteren haben Porsche im Oberklassenfahrzeug „Panamera“ sowie Audi im Typ A4 B9 ab MJ 2015 eine Fahrstrategie mit Segeln inzwischen in die Serie eingeführt. Das Themenfeld dieses Projektes ECC erscheint somit aktueller denn je. Auch wenn viele Aspekte der technischen Umsetzung einer Fahrstrategie mit „Segeln“ nur bei Zulieferern und OEMs erarbeitet werden können, so gibt es weiterhin Forschungsbedarf, herstellerunabhängig und fahrerzentriert Umsetzungsmöglichkeiten zu bewerten, nicht zuletzt, um einen hohen Grad an Akzeptanz und damit realisierter Ressourcenschonung im breiten und heterogenen Markt der Pkw zu erzielen.

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

In der Ausschreibung des Programmes IngenieurNachwuchs 2010 wurden als Ziele formuliert, „eine Plattform (zu) bieten, eigene Forschungskompetenzen aufzubauen“ und „die Wahrnehmung seiner Fach- und Forschungsinhalte zu erhöhen“. Diese Ziele sind in hohem Maße verwirklicht; ohne das Projekt wären die Möglichkeiten dazu deutlich geringer, so dass der ZE sehr dankbar ist. Von den im ursprünglichen Projektantrag (Vorhabens-Beschreibung vom 21. Oktober 2010) unter Kapitel I c aufgeführten neun wissenschaftlich/technischen Arbeitszielen sind zu allen Ergebnisse erzielt worden, mit Ausnahme von Nr. 8: die angedachten Einbindung in das Umfeld von Verkehr und Infrastruktur ist innerhalb von ECC nicht inhaltlich bearbeitet worden. Nach den ersten zwei Jahren Forschung in diesem Feld haben Ansätze und Ideen aus ECC jedoch zentral dazu beigetragen, mit meinem Kollegen Informatiker Prof. Zöllner einen erfolgreichen Projektantrag bei „IngenieurNachwuchs2014“ Ende 2013 auszuarbeiten, in dem dieses sehr breite Arbeitsfeld unter konkreter Zielstellung im Neuprojekt „AHeAD“ seit Mitte 2015 angegangen wird. Die dadurch eingeworbenen Drittmittel von 864 000 € über 4 Jahre bis 2019, wie auch schon die Drittmittel dieses Projekte ECC, tragen fundamental zur Verwertung bei, indem sie anwendungsnahe Forschung an der HS Heilbronn weiter etablieren.

Die Bewertung der wirtschaftlichen Zielerreichung durch eine potentielle Umsetzung der ECC-Fahrstrategie hat sich gegenüber der Antragsstellung nicht grundsätzlich verändert: Die vertiefte Analyse der Potenziale einer Fahrstrategie mit Segelphasen fußt auf bekannten physikalischen Prinzipien und deren Anwendung in geeigneter Kombination, so dass eine Anmeldung von Schutzrecht als Patent aktuell nicht aussichtsreich erscheint.

Darüber hinaus wird gemäß der Industrieerfahrung des PL von einer Patentierung einer neuartigen Strategie üblicherweise bewusst abgesehen, um potenziellen Wettbewerbern keine Hinweise oder gar Nachvollziehbarkeit zu geben, sondern es wird primär umgesetzt. Daher leitet sich ein Bedarf unabhängiger Forschungen gerade unter dem Aspekt der Bewertung ab: auch beim „Segeln“ ist die Aussage, das „Fahrzeug nutzt Segeln“ noch lange nicht gleichbedeutend mit „es nutzt die Potenziale (nahezu) optimal“ und die „Fahrende wenden das Segeln weitestgehend an“.

Auch die inzwischen gelaufenen Arbeiten an einem DKG-Fahrzeug lassen keine unmittelbaren Schutzrechte ableiten. Das innerhalb ECC neu entwickelte Kriterium einer „CPL“ bietet auch keine Basis für eine Schutzrechtsanmeldung. Wie in den früheren Kapiteln ausgeführt, haben sie die fachlich Kooperation mit Partner GETRAG deutlich vertieft und tragen über die studentischen Projektarbeiten zu den Zielen des Verwertungsplans bei, die Forschungsaktivität von Projektleiter, Studiengang und Fakultät sowie Hochschule insgesamt auf ein höheres Niveau zu bringen.

Die Sichtbarkeit der eigenen Forschungsleistung, aber auch ein Beitrag zur Steigerung der Attraktivität von akademischer Ausbildung und Berufstätigkeit in MINT-Fächern konnte durch populärwissenschaftliche Vorträge gesteigert werden: Mehrfach wurde als Schnuppervorlesung „Wie ‚segelt‘ das Auto in die Zukunft?“ bei Infotagen wie „ThinkIng“ vorgetragen. Am 16. Januar 2014 wurde „Vorsprung durch Rollen – Segeln im Pkw-Fernverkehr“ im HIN-Kolloquium der Audi AG in Neckarsulm die Ergebnisse einem sehr automobiltechnik-affinen Publikum vorgestellt, was noch angeregte Diskussionen nach sich zog.

4.2 Qualifizierungsplan

Zentrales Element im Sinne des Programms „IngenieurNachwuchs“ war es, Teilaufgaben als studentische Projekt zu vergeben, was bis in die Gegenwart nicht nur gelungen ist, sondern fundamental für die Attraktivität der Professur und des Fachgebietes ist, denn die Studierenden erarbeiten Teilziele eines realen Forschungsprojektes. Insgesamt wurden 23 studentische Projektarbeiten mit direktem Bezug zum Projekt bearbeitet, gelistet im Folgenden:

Studienarbeiten im Bachelorstudium

ECC_StudA_1 (1 Studierender, übernommen von Herrn S. Spörer) „Identifikation geeigneter Höhenprofile von Referenzstrecken mittels Simulation in AVL-Cruise“	10.11 - 09.12
ECC_StudA_2 (1 Studierender, übernommen von Herrn A. Lauterbach) „Nutzung von OBD-Daten für ein Serienfahrzeug als Demonstrator zur Entwicklung der ECC-Fahrstrategie“	10.11 – 08.12
ECC_StudA_3 (1 Studierender, übernommen von Herrn K. Kunjanski) „Auswahl und Implementierung eines On-Board Verbrauchsmesssystems bei Demonstrator-Fahrzeug“	11.11 – 02.13
ECC_StudA_4 (1 Studierender, übernommen von Herrn B. Siegl) „Ableitung von Fahrwiderstands-Parametern aus Rollversuchen mit Demonstrator-Fahrzeug“	06.12 – 12.13
ECC_StudA_5 (1 Studierende - Fortsetzung von ECC_StudA_2, übernommen von Frau S. Knospe) „Implementierung eines On-Board-Datenlogging-Systems in Demonstrator-Fahrzeug“	03.12 – 05.13
ECC_StudA_6 (1 Studierender, übernommen von Herrn S. Hammel) „ Fahrstrategieoptimierung durch Integration von Rollphasen“ Fortsetzung Simulation aus StudA_1	09.12 - 05.13
ECC_StudA_7 (2 Studierende, übernommen von Herren A. Beck und S. Hermanns) „Neuartiges Fahrerinformationssystem zur Führung von Versuchsfahrten auf Basis eines On-Board Datenloggers“ (Betreuung gemeinsam mit Prof. Dr. A. Meroth ASE)	03.13 –09.13
ECC_StudA_7 (2 Studierende, übernommen von Herren A. Beck und S. Hermanns) „Neuartiges Fahrerinformationssystem zur Führung von Versuchsfahrten auf Basis eines On-Board Datenloggers“ (Betreuung gemeinsam mit Prof. Dr. A. Meroth ASE)	03.13 –09.13
ECC_StudA_8 (2 Studierende, übernommen von Herren S. Beckel und M. Kollmar) „Simulation optimierter Bergabfahrt für ein Einzelfahrzeug und eine Fahrzeug-Kohorte“	03.13 –10.13
ECC_StudA_9 (1 Studierender - Ergänzung ECC_StudA_5, übernommen von Herrn M. Epinger) „Direkte Datenkommunikation via CAN zu On-Board-Datenlogging-Systems in einem Serien-Fahrzeug“	04.13–12.14
ECC_StudA_10 (2 Studierende, übernommen von Herren D. Fröhlich und M. Pflugfelder) „Integration von Umweltdaten in ein On-Board-Messsystem eines Demo-Fahrzeugs“	05.13 – 08.14
ECC_StudA_11 (1 Studierender, übernommen von Herrn S. Schäfer) „Nachweis der Potentiale einer Fahrstrategie mit Segeln für verschiedene Fahrzeugklassen im Fahrversuch“	09.13 – 04.14
ECC_StudA_12 (2 Studierende, R Steinbiss und M. Umnus, A3 fortsetzend) „Bestimmung des Nulleistungs- und Streckenverbrauchs mit On-Board Messtechnik“	10.13 – 12.14
ECC_StudA_13 (2 Studierende, übernommen von Herren C. Goldschmidt und J. Reinmuth, A3 fortsetzend) „Integration und Kalibrierung eines on-board Wegmesssystems“	10.13 – 09.14
ECC_StudA_14 (2 Studierende, übernommen von Herren P. Reitenbach und A. Mayer, A3 fortsetzend) „Modellierung und Simulation eines Parallel-Hybridfahrzeugs mit der ECC-Fahrstrategie“	10.13 – 04.15
ECC_StudA_15 (2 Studierende, übernommen von Herren M. Mohd Ali und B. Simon) „Quantitative Proof of Driving Strategy with Coasting by Key Figures from on-road Tests“	04.14 – 04.15
ECC_StudA_16 (1 Studierender, übernommen von Herrn M. Spahr) „Entwicklung der ECC-Fahrstrategie hinsichtlich der Fahrweise“ (Simulation Fahrertypen)	07.14 – 02.15
ECC_StudA_17 (2 Studierende, übernommen von Herren S. Albrecht und M. Jakob) „Wahlhebelaktuator zur einfachen Automatisierung einer Segel-Fahrstrategie in einem DKG-Fahrzeug“	08.14 – 03.15

ECC_StudA_18 (2 Studierende Herren B. Hückmann und M. Kurz) ECC_BA_3 fortsetzend **03.15 – 12.15**
 „Weiterentwicklung der automatisierten Segelfunktion in einem Fahrzeug mit Doppelkupplungs-Getriebe“

ECC_StudA_19 (2 Studierende MB Herren S. Ströhlein und R. Yildiz) ECC_BA_3 fortsetzend **03.15 – 11.15**
 „Tempomataktuator zur einfachen Automatisierung einer Segel-Fahrstrategie in einem DCT-Serienfahrzeug“

Abschlussarbeiten des Bachelorstudiums

ECC_BA_1 (1 Studierender, übernommen von Herrn N. Siucu, Austauschstudent aus Valencia) **09.12 - 05.13**
 „Evaluation of Coasting Strategy for a Hybrid Vehicle on hilly road profiles“ (Simulation)

ECC_BA_2 (1 Studierender, übernommen von Frau S. Springer, Studentin aus TU Chemnitz) **12.13 -06.14**
 „Fokusgruppen-Studie zur Akzeptanz von „Segeln“ als Teil einer ökonomischen Fahrstrategie von Pkw“

ECC_BA_3 (1 Studierender, übernommen von Herrn M. Umnus, HHN) **11.14 -04.15**
 „Automatisierte Segelfunktion in einem Fahrzeug mit Doppelkupplungs-Getriebe“

Projektarbeit über zwei Semester im Masterstudium

ECC_MaProj_1 (2 Studierende, übernommen von Herren B. Lutz und J. Willig) **04.13 – 03.14**
 „Fahrerinformationssystem als Smartphone-APP für verbrauchsoptimierte Langstreckenfahrt unter Nutzung von Segelphasen“ (Betreuung gemeinsam mit Prof. Dr. A. Meroth ASE)

6. Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse

In der aufgeführten Liste sind die unterstrichenen Quellen wie [KGWa14] eigene Veröffentlichungen: Das Projekt ECC hat dem ZE und seinen Mitarbeiterinnen zu 5 Publikationen und 2 größeren Fachvorträgen verholfen, was die Zielsetzung mehr als erfüllte.

Quellen und Literatur

- [Albe10] Albers, A., Schröter, J.: „Entwicklungs-Umgebung zur freien Konfiguration und Erstellung von echtzeitfähigen Gesamtfahrzeug-Verbrauchsmodellen“, IAV „Simulation und Test“, 2010
- [Fleh14] Flehmig, F., Kästner, F., Knödler, K., Knoop, M.: “Eco-ACC für Elektro- und Hybridfahrzeuge”; in ATZ 04/2014, P22-27
- [Graf13] Graf, F., Knorr, T., Jehle, M., Huber, T.: “Antriebsstrangmanagement in Hybridfahrzeugen mit 48-V-Bordnetz”; in MTZ 04/2013, P658-663
- [KoGr12a] H. Koch-Gröber et al., „ECC Economic Cruise Control“, VPC Virtual Powertrain Creation Conference, Esslingen, 2012
- [KoGr12b] H. Koch-Gröber et al., „ECC Economic Cruise Control“, AST Advanced Simulation Technology Conference, Heidelberg, 24. Oktober 2012
- [KoGr13] H. Koch-Gröber: “Coasting on Highways – Potentials and Realization”; 13th Stuttgart Symposium 2013
- [KoGr14] H. Koch-Gröber: “Vorsprung durch Rollen – Segeln im Pkw-Fernverkehr”; HIN-Kolloquium der Audi AG in Neckarsulm, 16. 01. 2014
- [KGWa14] H. Koch-Gröber, J. Wang: “Criteria for Coasting on Highways for Passenger Cars”; No. 2014-01-1157. SAE Technical Paper, 2014
- [Müll11] N. Müller et al. (Bosch): „Segeln-Start/Stop-Syst. nächst. Gen.“ MTZ 09/2011, 644ff
- [PrüE13] „Prüfstand für elektrifizierte Antriebe im Kfz“ an der HHN; <http://www.hs-heilbronn.de/4575231/Pruefstand>
- [RoBr96] K. Rohde-Brandenburger: „Verfahren zur einfachen und sicheren Abschätzung von Kraftstoffverbrauchspotentialen“, Haus der Technik Essen, 1996
- [WaKG15] J. Wang, H. Koch-Gröber: “Predictive Operation Strategy for Hybrid Vehicles”; 15th Stuttgart Symposium 2015
- [Wang16] Wang, Jue; Koch-Groeber, Hermann; Buyer, Johannes; Zoellner, Raoul Daniel “Recursive predictive Operation Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles”; 13. Symposium: Hybrid- und Elektrofahrzeuge, 23.-24. Februar 2016, Braunschweig
- [WikS16] „Segeln (Kraftfahrzeuge)“, Seite in de.wikipedia.org, abgerufen 07. 01. 2016
- [VoKr11] M. Vollrath, J. Krems: “Verkehrspsychologie – Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker”, Kohlhammer Verlag Hamburg, 1. Auflage 2011