



RWTH Aachen University

Fakultät für Maschinenwesen

Institut für Informatik im Maschinenbau

Kartendatenbasierte Längssteuerung eines KFZ zur energetischen Optimierung des Fahrverhaltens

Bachelorarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science Maschinenbau

von

Jan Kristof Käisinger

Betreuer: Dr. Matthias Schneider (Bosch Engineering GmbH)

Dipl.-Inform. Daniel Ewert

Verantwortlicher Hochschullehrer:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Sabina Jeschke, Informatik im Maschinenbau

Die Bachelorarbeit wurde am 30.09.2013 bei der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen University eingereicht.

Ich danke der Bosch Engineering GmbH für die Unterstützung bei der Erarbeitung dieser Arbeit. Insbesondere gilt der Dank meinem fachlichen Betreuer Dr. Matthias Schneider für die hilfreichen Diskussionen sowie Dipl.-Inform. Daniel Ewert, der mich seitens der Hochschule stets gut beraten hat.

Erklärung: „Hiermit versichere ich, dass ich diese Bachelorarbeit selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle von mir aus anderen Veröffentlichungen übernommenen Passagen sind als solche gekennzeichnet.“

Aachen, 30.09.2013

.....
Jan Kristof Kälinger

Inhaltsverzeichnis

0.1	Abkürzungen	
1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Das Projekt	2
1.3	Ziel und Aufbau der Arbeit	2
2	Abgrenzung	5
2.1	Problemverständnis	5
2.1.1	Randbedingungen	6
2.1.2	Externe und Interne Einflussgrößen	7
2.1.3	Fahrzeugtopologie	10
2.2	Transfer der Ergebnisse	10
3	Stand der Technik	13
3.1	Adaptive Cruise Control	14
3.2	Porsche ACC InnoDrive	14
4	Technische Grundlagen	19
4.1	Antriebsstrang	19
4.1.1	Verbrennungsmotor	21
4.1.2	Elektromotor	22
4.1.3	Batterie	24
4.1.4	Getriebe	25
4.1.5	Hybridbetriebsarten	26

4.2	Fahrwiderstände	26
4.2.1	Beschleunigungswiderstand	27
4.2.2	Luftwiderstand	27
4.2.3	Rollwiderstand	28
4.2.4	Das Rollenmodell	28
4.2.5	Steigungswiderstand	28
5	Theoretische Grundlagen	31
5.1	Optimierung	31
5.2	Dynamische Programmierung	32
5.2.1	Markov-Entscheidungs-Prozess	33
5.2.2	Value Iteration	34
6	Theoretische Analyse	37
6.1	Interpretation als Optimalsteuerungsproblem	37
6.1.1	Herleitung der Zustandsgleichungen	38
6.1.2	Formulierung des Opimalsteuerungsproblems	40
7	Globale Optimierung	43
7.1	Matlab-Modell zur Optimierung	43
7.1.1	Diskretisierung	45
7.2	Analyse der Ergebnisse	49
7.2.1	Geschwindigkeitsverlauf	49
7.2.2	Batterienutzung	50
8	Intelligent Adaptive Cruise Control	53
8.1	Rapid-Control-Prototyping	53
8.2	Kartendaten	54
8.3	Anwendungsszenario	56
8.3.1	Aktivierung	56
8.3.2	Deaktivierung	56
8.3.3	Ändern der Höchstgeschwindigkeit	56

8.3.4	Fahren ohne Verkehr	57
8.3.5	Fahren mit Verkehr	57
8.3.6	Moduswahl	57
8.4	Schnittstellen und Randbedingungen	58
8.4.1	Schnittstelle zur Adaptive Cruise Control (ACC)	58
8.4.2	Schnittstelle zum Reconstructor	60
8.4.3	Mensch-Maschine-Schnittstelle	61
8.5	Softwaredesign	62
8.5.1	Trajektorienplanung	63
8.5.2	Abschnittsmanagement	63
8.5.3	Trajektorienengineering	63
8.5.4	Regler	67
9	Zusammenfassung und Fazit	69
	Literaturverzeichnis	71

0.1 Abkürzungen

ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ACC	Adaptive Cruise Control
EVA	Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe
iACC	Intelligent Adaptive Cruise Control
BEG	Bosch Engineering GmbH
ENP	Entwicklung neuer Produkte
PT	Powertrain
HEV	Hybrid Electric Vehicle
FAS	Fahrerassistenzsystem

SoC	State-of-Charge
CAN	Controller Area Network
FGR	Fahrgeschwindigkeitsregelung
ECU	Engine Control Unit
HMI	Human Maschine Interface
BMS	Batterie Managment System
NiMH Akku	Nickel-Metallhydrid Akkumulator
MPP	Most Probable Path
GPS	Global Positioning System
ADAS-RP	Advanced Driver Assistance System Research Platform
WLAN	Wireless Local Area Network
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
KFZ	Kraftfahrzeug

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

In Zeiten knapper werdender Ressourcen und steigender Kraftstoffpreise, strengerer Umweltauflagen und steigenden Verkehrsaufkommens ist es für die Fahrzeugbetreiber und somit auch für die Automobilhersteller wichtig, dass die verkauften Fahrzeuge im Realbetrieb möglichst effizient betrieben werden können. Der Normverbrauch eines Kraftfahrzeug (KFZ) wird heutzutage mit dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ermittelt. Dieser repräsentiert den Realbetrieb eines KFZ nicht besonders gut, sodass die Europäische Union bereits in [Europäische Union, 2008] die Überarbeitung der Prüfverfahren für die kommenden Umweltnormen EURO5 und EURO6 angekündigt hat und anregt, „off-cycle“-Emissionsanforderung einzuführen. Der Einfluss eines Fahrzyklus auf den gemessenen Kraftstoffverbrauch und die Emissionswerte ist evident. Die Tatsache, dass abhängig vom realen Betrieb eines KFZ unterschiedliche Verbrauchsergebnisse erzielt werden, lässt erwarten, dass eine Optimierung der Fahrweise ein Einsparpotential im Realbetrieb eines KFZ realisiert. Offensichtlich beeinflussen die Topologie der zu fahrenden Strecke und die Eigenschaften des jeweiligen Fahrzeuges den Kraftstoffverbrauch. Wie die optimale Betriebsweise eines KFZ von den vorhergenannten Merkmalen abhängt, bleibt zu prüfen. Die stark mit den KFZ-Fahrern variierenden Kraftstoffverbräuche zeigen, dass die optimale Fahrweise nur schwer für den Fahrer adaptierbar ist. Die Automatisierung der Längsführung unter Nutzung

digitaler Karten und GPS-Sensoren kann dieses Einsparpotential realisieren. Zudem ermöglicht die Kenntnis über den zukünftigen Leistungsbedarf eine Optimierung der Antriebsstrang-Komponenten. Dies ist insbesondere relevant für neuartige Antriebsstrangkonzeppte mit einem reversiblen Energiespeicher, wie zum Beispiel Hybrid Electric Vehicle (HEV).

1.2 Das Projekt

Das Innovationsprojekt, in dessen Rahmen diese Arbeit angefertigt wurde, ist bei der Bosch Engineering GmbH (BEG) in der Abteilung Entwicklung neuer Produkte (ENP) angesiedelt. Die ENP ist eine Vorausentwicklungsabteilung innerhalb der BEG-Powertrain-Sektion, die Machbarkeitsstudien zu neuen Technologien für Automotiv-Anwendungen durchführt. Die BEG ist ein Ingenieurdienstleistungsunternehmen mit Sitz in Abstatt und eine Tochterfirma der Robert Bosch GmbH. Sie bietet ihren Kunden individuelle Lösungen unter Verwendung von Bosch-Komponenten an.

Die Arbeiten im Projekt werden an einem Porsche Panamera S Hybrid durchgeführt. Das Fahrzeug ist mit zusätzlicher Hardware ausgestattet, um die gewünschten Funktionen implementieren zu können. Außerdem sind alle Antriebsstrang-Baugruppen außer dem Getriebe von Bosch, sodass ein weitgehender Zugriff auf die relevanten Systemkomponenten besteht. Das Umfeld bei BEG bietet die einzigartige Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit, für deren Zustandekommen jene umfassende Systemkompetenz nötig war.

1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Einsparpotential durch die Optimierung der Fahrstrategie untersucht. Dazu wird die global optimale Fahrweise für eine reale Strecke mit Hilfe der Dynamischen Programmierung nach Bellmann (1957) ermittelt. Aus den Ergebnissen der Optimierung werden generelle Verhaltensweisen abgeleitet. Diese Heuristiken dienen als Grundlage zur Entwicklung der intelligenten Adaptive Cruise Control (iACC), die mit den im Fahrzeug verfügbaren Daten und Rechenleistungen

auskommt. Durch die Vernetzung von vorhandenen Steuergeräten wird die neue Funktionalität ermöglicht. Dabei sollen an den anderen Komponenten möglichst geringe Software-Änderungen notwendig werden. Das Fahrverhalten dieser Fahrstrategie ist über einige Parameter anpassbar, sodass zwischen einer maximal-sparsamen und einer zeitoptimalen Fahrweise variiert werden kann.

Zunächst wird in Kapitel 2 ein Überblick über die bearbeitete Problemstellung gegeben. Anschließend wird im Kapitel 3 ein Überblick über die heute verfügbare und im Rahmen der Arbeit verwendete Technik vermittelt. Im Kapitel 4 werden die technischen Grundlagen der Antriebsstrangkomponenten erklärt. Kapitel 5 ist dem Optimierungsalgorithmus, der Dynamische Programmierung, gewidmet. Das Kapitel 7 behandelt die numerische Optimierung des zuvor in Kapitel 6 erläuterten, das Hybrid-Fahrzeug beschreibenden, Gleichungssystems. Im folgenden Kapitel 8 wird der Softwareentwurf für die automatisierte Längssteuerung vorgeschlagen. In Kapitel 9 werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und mögliche weitere Vorgehensweisen besprochen.

Kapitel 2

Abgrenzung

In diesem Kapitel wird gezeigt, welche Facetten das Problem der automatisierten Längssteuerung aus planerischer Sicht hat und in welcher Tiefe diese bearbeitet werden. Es wird auf die generelle Zielstellung, die Randbedingungen, die betrachteten Einflüsse und das Fahrzeug eingegangen.

2.1 Problemverständnis

Wenn ein Fahrer eine Fahrt mit einem KFZ plant, dann versucht er, von seinem Standort zu seinem Ziel zu fahren und dabei möglichst schnell, komfortabel, kostengünstig und umweltfreundlich anzukommen. Nachdem er eine Route gewählt hat, nutzt er folgende Steuereinrichtungen seines Fahrzeuges, um das Fahrzeug zu regeln:

- Gaspedal,
- Bremspedal,
- Lenkrad
- Gangschaltung,

Dabei hat die konkrete Wahl seiner Aktionen einen Einfluss auf die Fahrtzeit und den Betriebsmittelverbrauch. Während er sich bemüht, seinen Kosten- und Zeitaufwand zu

minimieren, muss er die im folgenden Unterabschnitt (2.1.1) behandelten Beschränkungen für den Fahrzeugzustand und die Steuerungseinrichtungen einhalten.

2.1.1 Randbedingungen

Die Regelung muss den durch den Gesetzgeber, physikalische oder Komfortgrenzen gegebenen Randbedingungen genügen. Daraus folgt, dass das Fahrzeug vorausschauende Geschwindigkeitsänderung durchführen muss. Dabei dürfen Grenzwerte für die Längs- und Querschleunigung genau so wie Geschwindigkeitsgrenzen nicht überschritten werden.

Reduzierung der allgemeinen Ortstrajektorie auf eine Dimension

Die Straßenführung gibt in sehr engen Grenzen den Fahrtweg des Fahrzeuges vor, dem der Fahrer mit Hilfe des Lenkrads folgt. Die zur Querregelung des Fahrzeuges notwendigen Lenkbewegungen liegen quasi fest und können nur in kleinem Maße variiert werden. Ein nennenswertes Energiesparpotential gibt es hier nicht. Bekanntlich hat ein Körper im Raum sechs Freiheitsgrade (die Position kann durch drei Längen beschrieben werden, während die Ausrichtung durch drei Winkel beschrieben werden kann). Ein KFZ bewegt sich normalerweise auf einer Ebene. Dadurch reduzieren sich die unabhängigen Freiheitsgrade auf drei (zum Beispiel zwei Längen und ein Winkel). Ein Fahrzeug, das entlang einer Straße fährt, bewegt sich auf einer Linie, die durch eine Längen-Koordinate dargestellt werden kann. Für die Betrachtungen in dieser Arbeit gehe ich im folgenden von einer eindimensionalen Ortsbeschreibung des Fahrzeuges aus. Eine effiziente Routenplanung ist folglich nicht Thema dieser Arbeit. Obwohl der Ort des Fahrzeuges auf einer Trajektorie durch eine Ortskoordinate identifiziert werden kann, sodass diese als Referenz betrachtet wird, müssen dennoch Informationen aus dem tatsächlichen Straßenverlauf während der Fahrt berücksichtigt werden¹.

¹Verkehrsaufkommen und geänderte Straßenzeichen

Straßenkrümmung

Aus der Kurvenfahrt resultieren je nach Geschwindigkeit unterschiedlich starke Querschleunigungen, die von den Fahrzeuginsassen als unkomfortabel empfunden werden können. Desweiteren sind die maximal möglichen Querschleunigungen durch die Kraftübertragung im Straße-Reifen-Kontakt und die sogenannte Kippgrenze begrenzt. Werden diese Grenzen erreicht, kann entweder dem Fahrweg nicht mehr gefolgt werden, oder das Fahrzeug kippt zur Seite um. Der letzte Fall tritt in der Regel nur bei Nutzfahrzeuge auf. Gleichung 2.1 zeigt den Zusammenhang zwischen der maximal möglichen Querschleunigung $a_{y,max}$, der aktuellen Straßenkrümmung r und der daraus resultierenden Geschwindigkeit für Straßenstellen mit dieser Krümmung.

$$v_{max} = \sqrt{a_{y,max} \cdot r} \quad (2.1)$$

Nach [Schimmelpfennig, 1985] hängt die „Sicherheitsgrenze für Normalfahrer“ für Querschleunigung a_y von der Fahrtgeschwindigkeit ab. Abbildung 2.1(siehe Seite 8) zeigt diesen Zusammenhang. Für die Fahrtgeschwindigkeit resultiert daraus eine Straßenkrümmungs- und damit ortsabhängige Beschränkung der Geschwindigkeit.

Gesetzliche Geschwindigkeitslimits

Auf öffentlichen Straßen gelten gesetzliche Geschwindigkeitslimits, die sich ebenfalls ortsabhängig ändern. Häufig werden die Geschwindigkeitsbegrenzungen so gewählt, dass sie bereits niedriger liegen, als die physikalisch diktierten Grenzen des Streckenabschnitts. Trotzdem kommt es auf kurvenreichen Landstraßen oft vor, dass die Querschleunigung in manchen Kurven mit der gesetzlichen Höchstgeschwindigkeit als unkomfortabel oder unfallträchtig eingestuft würden. Die gesetzlichen Geschwindigkeitsgrenzen werden in dieser Arbeit als Randbedingungen einbezogen.

2.1.2 Externe und Interne Einflussgrößen

Viele Einflussgrößen wirken auf das Fahrzeug ein. Externe Einflussgrößen sind:

- Steigung,

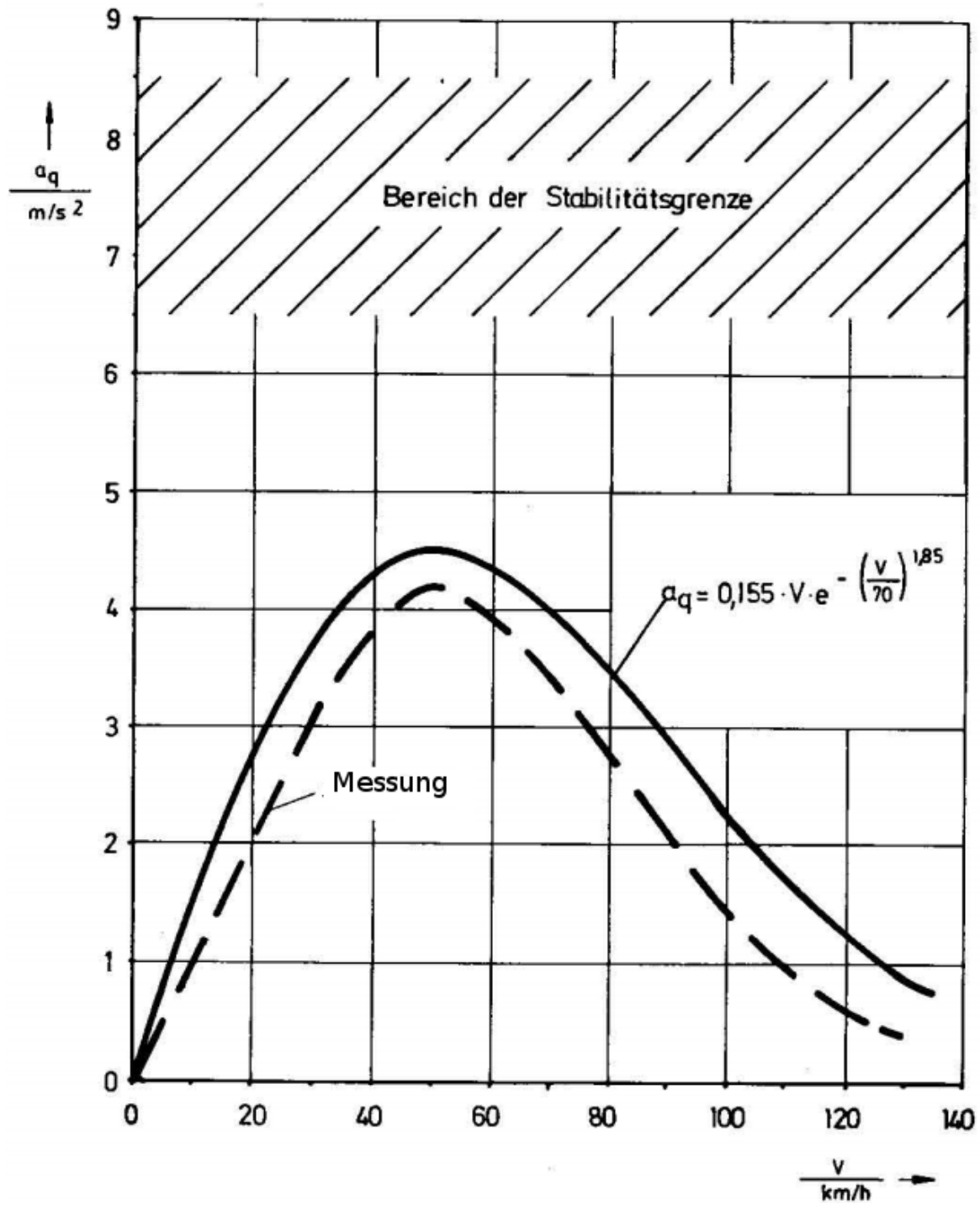


Abbildung 2.1: Das Diagramm stellt die „Sicherheitsgrenze des Normalfahrers“ für die Querschleunigung in Abhängigkeit der Fahrtgeschwindigkeit nach [Schimmelpfennig, 1985] dar.

- Wind,
- Straßenbelag,
- Witterung,
- andere Fahrzeuge und Störungen des Verkehrsflusses.

Um externe Größen sinnvoll in Betrachtungen einbeziehen zu können, müssen diese vor oder möglichst frühzeitig während der Fahrt bekannt sein. Zusätzlich sollte deren Einfluss auf die Fahrstrategie wesentlich sein. Besonders wichtig erscheint die Betrachtung der Fahrbahnsteigung, da sie einen großen Einfluss auf die Antriebslast und das Rollverhalten des Fahrzeugs hat. Zudem ist die Steigung inzwischen recht genau kartiert, sodass sie zur Berechnung zur Verfügung steht. Die Beachtung des Windes macht vor allem bei höheren Geschwindigkeiten und generell bei der Routenwahl Sinn. Zum Straßenbelag fehlen ebenfalls Daten. Er macht sich in verändertem Rollwiderstand und Straßenhaftung bemerkbar. Der Straßenbelag wird in dieser Arbeit ebenfalls nicht weiter betrachtet. Die Witterung beeinflusst den Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors, die Straßenhaftung und den Rollwiderstand. Sie wird in der Modellbildung nicht beachtet. In der praktischen Umsetzung werden für grenzwertige Witterungen die zulässigen Querschleunigungen reduziert. Störungen durch andere Fahrzeuge sowie Ampelsignale oder Ähnliches sollten ab dem Bekanntwerden als neue Randbedingung einbezogen werden. In der theoretischen Betrachtung werden Sie jedoch nicht betrachtet, auch wenn in der Praxis deren Einfluss groß ist. Wenn zum Beispiel bekannt ist, dass bei aktueller Fahrweise ein vorausfahrendes Fahrzeug eingeholt wird, dann wäre es ressourcenschonend, das Fahrzeug genau dann einzuholen, wenn es auch überholt werden kann. Es macht keinen Sinn, das Fahrzeug so schnell wie möglich einzuholen, um dann langsam hinterherzufahren. Eine ähnliche Überlegung trifft auch auf Ampeln zu: Rollt ein Fahrzeug auf eine rote Ampel zu, wäre es in der Regel am effizientesten, wenn schon weit vor der Ampel so gefahren wird, dass die Ampel in einer Grünphase erreicht wird. Diese Überlegungen sollen aber qualitativ bleiben und nicht modelliert werden.

Auch interne Einflüsse wie

- der Zustand und Druck der Reifen,
- die Beladung,
- die Betriebstemperatur und
- Alterungs- und Verschleißerscheinungen

verändern das Systemverhalten. Da deren Wirkung aber nicht bekannt ist, beziehungsweise der Bezugszustand die meiste Zeit über eingehalten wird, wird auf die internen Faktoren nicht gesondert eingegangen. Es wird von dem in den Kennfeldern aufgezeichneten Verhalten ausgegangen.

2.1.3 Fahrzeugtopologie

Die gewählte Modellierung orientiert sich am Versuchsträger Porsche Panamera S Hybrid, der im Abschnitt 4.1 näher beschrieben wird. Es sollen die Elemente Verbrennungsmotor, Elektromotor, Getriebe, Batterie und Trennkupplung in der Anordnung als Parallelhybrid betrachtet werden. Eine effiziente Fahrweise berücksichtigt die Leistungsfähigkeit und Eigenschaften des Fahrzeugs neben den Streckeneigenschaften. So kann für ein Fahrzeug eine Beschleunigung mit $a_x = 1 \frac{m}{s^2}$ schon zu einer Verschwendung von Kraftstoff führen, während ein leistungsstärkeres Modell gerade im optimalen Arbeitspunkt läuft.

2.2 Transfer der Ergebnisse

Ziel der theoretischen Betrachtungen ist es, eine Implementierung als prototypische Steuergerätefunktion zu erstellen und diese möglichst effizient zu gestalten. Aufgrund der modularen Gestaltung der Steuergerätesoftware wären jedoch weitreichende Softwareänderungen notwendig, um Zugriff auf sämtliche Aktuatoren zu bekommen. Daher beschränke ich mich darauf, eine automatisierte Längsführung zu implementieren, die sich aus den generellen Erkenntnissen der vorherigen numerischen Optimierung ableiten lässt. Es wird jedoch darauf eingegangen, wie das so erzielte Systemverhalten

weiter verbessert werden kann. Es bleibt anzumerken, dass das nichtlineare Verhalten der Energiewandler mit der Überlagerung durch die Einflüsse der Strecke meistens ein nicht triviales optimales Verhalten ergibt.

Kapitel 3

Stand der Technik

Die Entwicklung der automatischen Längssteuerungen begann 1958 mit der Einführung der Cruise Control von Chrysler. Das Ziel der ersten Fahrgeschwindigkeitsregelung (FGR), die Geschwindigkeit konstant zu halten, sollte den Fahrer auf Autobahnen entlasten. In der weiteren Entwicklung wurden Schaltempfehlungen angezeigt und diese auch durch Drehzahlanpassungen beim Auskuppeln unterstützt. Nach der Umstellung auf E-Gas¹ wurden auch die FGR elektronisch realisiert. Während zu Beginn nur das Gas betätigt wurde, sollten jetzt auch die Radbremsen angesteuert werden (vergleiche [Wikipedia, 2013]). Durch diese Maßnahmen sind die Einsatzmöglichkeiten des Tempomaten erweitert worden, sodass auch starke Steigungen und Gefälle mit konstanter Geschwindigkeit befahren werden konnten. Der nächste Schritt bestand in der Einführung weiterer Sensorik zur Beurteilung der vorausliegenden Verkehrssituation. Die sogenannte Adaptive Cruise Control (ACC) konnte mit dieser Hilfe nun auch Verkehr berücksichtigen, was die Einsetzbarkeit deutlich erweiterte. Zukünftige Systeme, wie sie Porsche und Volkswagen derzeit entwickeln, beziehen die Straßenverhältnisse mit ein, um die Nutzbarkeit auch auf kurvenreichen Strecken und bei wechselnden Geschwindigkeitsbeschränkungen auszuweiten und verwenden ein detailliertes Fahrzeugmodell, um Kraftstoff zu sparen.

¹elektronische Ansteuerung der Drosselklappe statt eines Bowdenzugs vom Gaspedal

3.1 Adaptive Cruise Control

Die Adaptive Cruise Control (ACC) übernimmt als Abstandsregeltempomat die Längssteuerung des Fahrzeugs, indem das Motordrehmoment und Bremseneingriffe koordiniert werden. Mit dem an der Fahrzeugfront verbauten Radar-Sensor wird die vorausliegende Verkehrssituation erkannt und falls nötig die Geschwindigkeit angepasst. Dadurch ermöglicht die ACC eine automatisierte Fahrt auf Autobahnen und Straßen ohne scharfe Kurven. Der Fahrer stellt über einen Hebel seine Wunschgeschwindigkeit ein. Wenn kein anderes Fahrzeug erkannt wurde oder kein fahrzeuginterner Grund (wie zum Beispiel ein großer Lenkwinkel) eine kleinere Geschwindigkeit vorschreibt, wird auf die Setzgeschwindigkeit beschleunigt und diese gehalten.

Die Verarbeitung der Sensorwerte und Koordination der Stelleingriffe wird von einem im Sensor integrierten Steuergerät übernommen. Über Controller Area Network (CAN) kommuniziert das Steuergerät für die Momentenanforderungen mit der Engine Control Unit (ECU) und für Bremsanforderungen mit dem ESP-Steuergerät². Das Human Machine Interface (HMI) zur Interaktion mit dem Fahrer besteht aus den Anzeigen im Kombi-Instrument und dem Lenkstockhebel, die entsprechend über CAN mit dem ACC-Steuergerät kommunizieren [BoschEngineeringGmbH, 2013].

3.2 Porsche ACC InnoDrive

Porsche verfolgt mit der Entwicklung seines neuen Fahrerassistenzsystems (FAS) ACC InnoDrive das Ziel, die Diskrepanz zwischen Norm- und Kundenverbrauch zu senken. Dazu werden die gängigen Effizienzmaßnahmen des Systems optimal auf die Strecke abgestimmt eingesetzt. Daraus folgt eine Fahrweise, die die Effizienz- und Dynamikanforderungen erfüllt. Die Automatisierung der Fahrstrategieermittlung und Umsetzung als neuartiges FAS verspricht die zuverlässige Realisierung der Einsparpotentiale. Zu den einbezogenen Effizienzmaßnahmen gehören, je nach Fahrzeugtyp, folgende Funktionen:

- Beschleunigung

²Elektronisches Stabilitätsprogramm

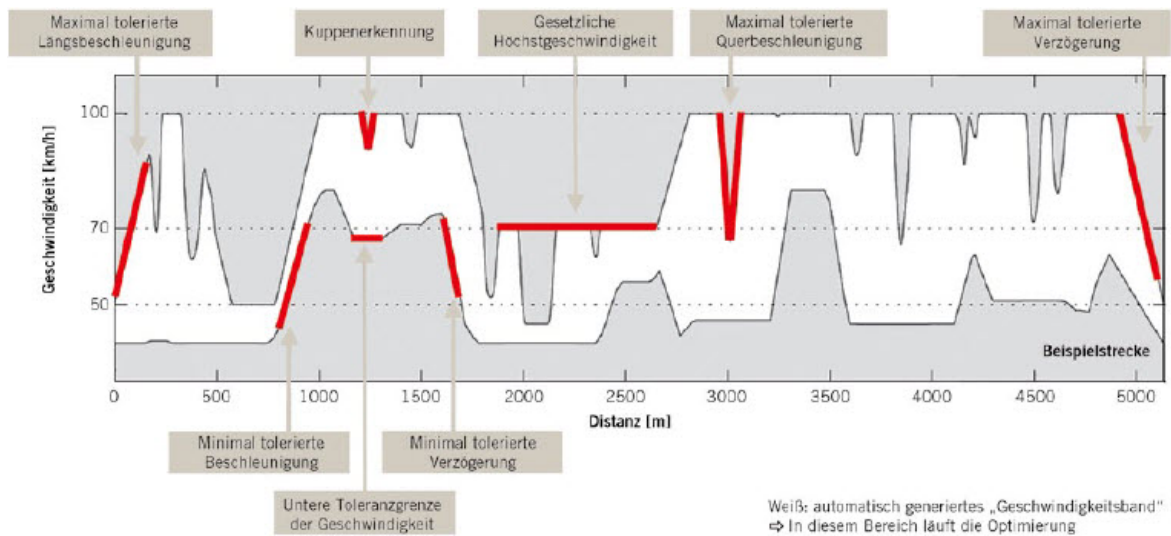


Abbildung 3.1: Beispiel für das automatisch generierte Geschwindigkeitsband, das den Optimierungsraum bestimmt aus [LEDERER et al., 2012].

- Konstantfahrt
- Schubabschaltung
- Segeln / Freilauf mit laufendem Motor
- Stop-on-the-move / Freilauf mit stehendem Motor
- Rekuperation / Bremsenergierückgewinnung
- Elektrisches Fahren

Gesondert zu erwähnen ist, dass es erstmals gelungen ist, einen echtzeitfähigen mehrdimensionalen numerischen Optimierungsansatz für ein Fahrerassistenzsystem zu realisieren. Für die Optimierung der Fahrstrategie wird die Dynamische Programmierung nach Bellmann für die Geschwindigkeit und den Gang angewendet. Der Suchhorizont spannt sich also über acht Gänge, eine diskretisierte Geschwindigkeitsverteilung und über den ebenfalls diskretisierten Weg auf. Für ein bestmögliches Optimierungsergebnis mit der vorhandenen Rechnerhardware wurde eine Reduzierung des Suchhorizontes durch Generierung eines Geschwindigkeitsbandes, wie in Abbildung 3.1 zu sehen,

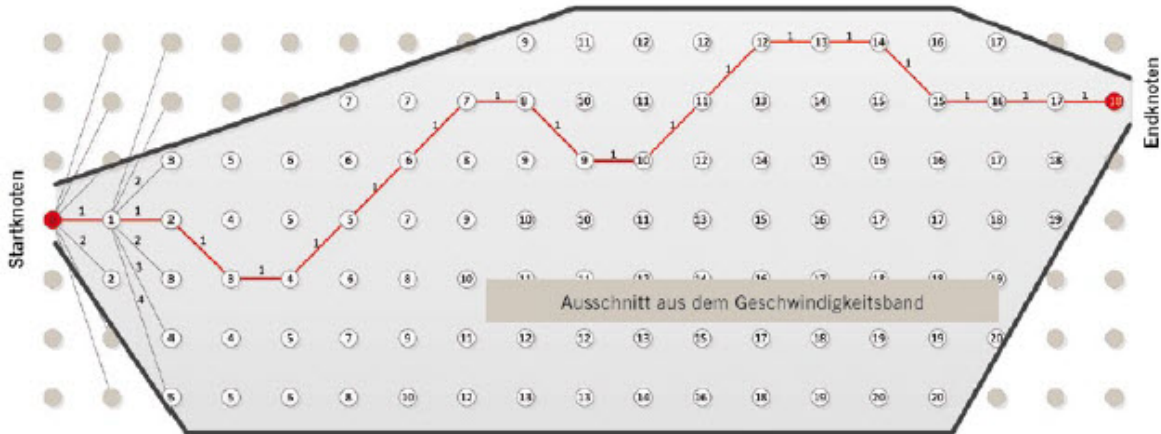


Abbildung 3.2: Durch Geschwindigkeitsband eingeschränkter Optimierungsraum mit Orts- und Zeitdiskretisierung aus [LEDERER et al., 2012].

durchgeführt. Bei der Erstellung des Geschwindigkeitsbandes werden die gesetzliche Höchstgeschwindigkeit, maximal tolerierbare Querbeschleunigung, Längsbeschleunigung und Verzögerung, sowie die Sichtbehinderung durch die Straßengeometrie (Kuppen) berücksichtigt. Zudem werden unakzeptabel langsame Geschwindigkeiten ausgeklammert. Die Kostenfunktion für die Dynamische Programmierung ist durch die Formel 3.1 gegeben. Innerhalb des Suchhorizontes wird die Kombination von Knoten als Lösung gefunden, für die die Gesamtkosten minimal werden. Eine solche Lösung kann durch das Geschwindigkeitsband nur innerhalb der Randbedingungen sein. Es werden die durch Kurven und gesetzliche Limits vorgegebenen Maximalgeschwindigkeiten eingehalten. Zu große Beschleunigungen und Verzögerungen werden jedoch nicht pauschal vermieden. Hierzu müssen die β -Faktoren in der Kostenfunktion angepasst werden.

$$J = M + \beta_1 \cdot C_1 + \beta_2 \cdot C_2 + \dots \quad (3.1)$$

Als Kosten werden der Kraftstoffverbrauch M , die Dynamik, der Komfort und andere Faktoren berücksichtigt. Da neben dem Kraftstoffverbrauch zusätzliche Faktoren einbezogen werden, wird die gefundene Lösung nie verbrauchsoptimal sein, sondern immer einen Kompromiss aus allen Anforderungen darstellen. Durch Anpassung der β -Faktoren kann das Verhalten der Lösung an den Fahrerwunsch angepasst werden,

sodass den unterschiedlichen Anforderungen an die Fahrstrategie Rechnung getragen wird. Für weitere Details zur Optimierung der Längsführung wird auf die Dissertation [Radke, 2013] verwiesen. Umgebung und Zustand des Fahrzeugs werden durch folgende Sensoren und Informationssysteme erfasst:

- Ein GPS-System ermittelt die Fahrzeugposition
- Die prädiktiven Streckendaten (Krümmung, Steigung und Geschwindigkeitsbegrenzung) werden zur Ermittlung des Geschwindigkeitsbandes verwendet.
- Ein Kamerasystem erkennt Straßenschilder, die Fahrspur, andere Fahrzeuge sowie die Sichtweite und plausibilisiert einerseits die prädiktiven Streckendaten, andererseits wird der Radarsensor unterstützt.
- Der Radarsensor erkennt vorausfahrende Fahrzeuge und deren dynamisches Verhalten.
- Die Fahrzeugsensorik überwacht den Systemzustand.
- Die Fahrzeugcharakteristik in Form eines Modells wird benötigt, um den Kraftstoffverbrauch für die Kostenberechnung schnell bestimmen zu können.

ACC InnoDrive realisiert einen deutlich messbaren Verbrauchsvorteil von etwa zehn Prozent bei gleicher Durchschnittsgeschwindigkeit gegenüber einem menschlichen Fahrer [PorscheAG, 2011]. Der verwendete numerische Ansatz ermöglicht es, einerseits, den vielen Anforderungen gerecht zu werden, andererseits können sämtliche Informationen in hoher Auflösung in der Optimierung berücksichtigt werden. Die Verwendung von ausgefeilten Sensorsystemen und die sehr genau erfassten Streckeneigenschaften ermöglichen dies. Als Nachteil ist dieser technische Aufwand insofern zu werten, als das die benötigten Streckendaten nicht flächendeckend zur Verfügung stehen und die eingebauten Sensoren nicht in Serienfahrzeugen verbaut sind. Die zusätzlich verbauete Rechenkapazität zur Durchführung der Optimierung wird in einem Serienfahrzeug ebenfalls nicht zur Verfügung stehen. Selbst mit der vergleichsweise leistungsfähigen MicroAutoBox von dSpace dauert die Optimierung von einem Streckenkilometer etwa eine Sekunde und verwendet 600.000 Datensätze [www.autoblog.com, 2011]. Mit einem

herkömmlichen Steuergerät aus der Automobiltechnik wäre eine solcher Berechnungsansatz also nicht zielführend.

Kapitel 4

Technische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die technischen Grundlagen der Fahrzeuglängsdynamik erläutert. Dazu werden zunächst die Antriebsstrangkomponenten und deren Anordnung und danach die Fahrwiderstände betrachtet. Der Energiebedarf eines KFZ besteht einerseits aus den Verlusten im Antriebsstrang und andererseits aus den Fahrwiderständen [Eckstein, 2010].

4.1 Antriebsstrang

Der Antriebsstrang des als Versuchsträger zur Verfügung stehenden Porsche Panamera S Hybrid ist in Bild 4.1 dargestellt. Es handelt sich um einen parallelen Vollhybrid. Links im Bild ist der Verbrennungsmotor zu sehen. Nach rechts folgen der Elektromotor, das Getriebe und das Hinterachsdifferenzial. Außerdem ist rechts die Hochvoltbatterie zu erkennen.

Ein Paralleler Hybrid besteht aus den Komponenten Verbrennungsmotor, E-Motor, Trennkupplung und einer Hochvoltbatterie. Der Verbrenner und die E-Maschine sitzen auf einer Welle und können direkt Leistung an die Räder abgeben. Die Trennkupplung zwischen Verbrenner und E-Motor ermöglicht elektrisches Fahren ohne den Verbrenner mitschleppen zu müssen. Auch während der Rekuperationsphasen ist ein abgekoppelter Verbrenner vorteilhaft, da auf Grund der vermiedenen Reibverluste mehr elektrische Energie zurückgewonnen werden kann.

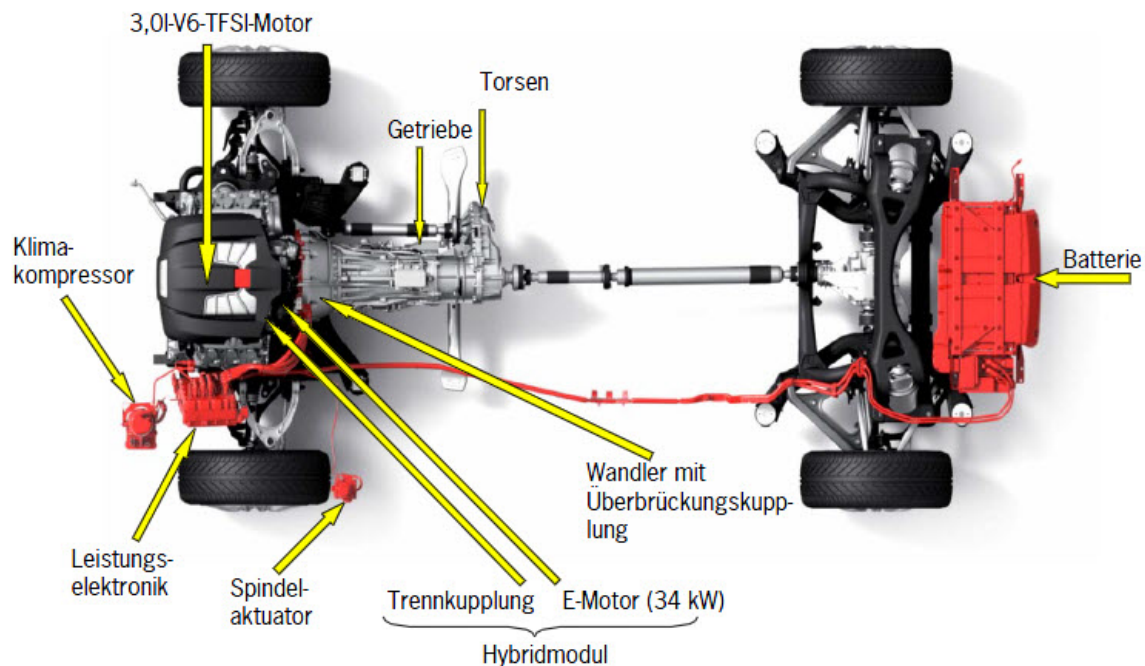


Abbildung 4.1: PL72 Antriebsstrang, der unter anderem im Porsche Panamera und Cayenne, sowie im VW Tuareg eingesetzt wird [BoschEngineeringGmbH, 2013]

Diese Hybridvariante lässt sich durch den Einbau einer geeigneten Getriebeeinheit mit integrierter E-Maschine leicht auf einem konventionellen Fahrzeugkonzept aufbauen. Weiterhin ist sie für viele Fahrzeuge verschiedenster Leistungsklassen geeignet, da der Verbrenner direkt die Räder antreiben kann, um das Fahrzeug zu beschleunigen. Die Leistung der E-Maschine kann unabhängig vom restlichen Antriebsstrang festgelegt werden. So ist dieselbe Hybridisierung für verschiedene Fahrzeugtypen einsetzbar.

Vorteilhaft wirkt sich im konventionellen Antriebsmodus aus, dass der Verbrenner ohne zusätzliche Wandlungsverluste Leistung auf die Straße bringen kann. Die E-Maschinenleistung wird einfach zu der des Verbrenners addiert. So sind die Betriebsarten Lastpunktanhebung oder -absenkung (Boosten) realisierbar. Nachteilig wirkt sich aus, dass beide Energiewandler zwangsläufig mit der gleichen Drehzahl arbeiten müssen, sodass nicht beide Motoren gleichzeitig im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden können. Während der elektrischen Fahrt kann der Verbrenner ausgeschaltet

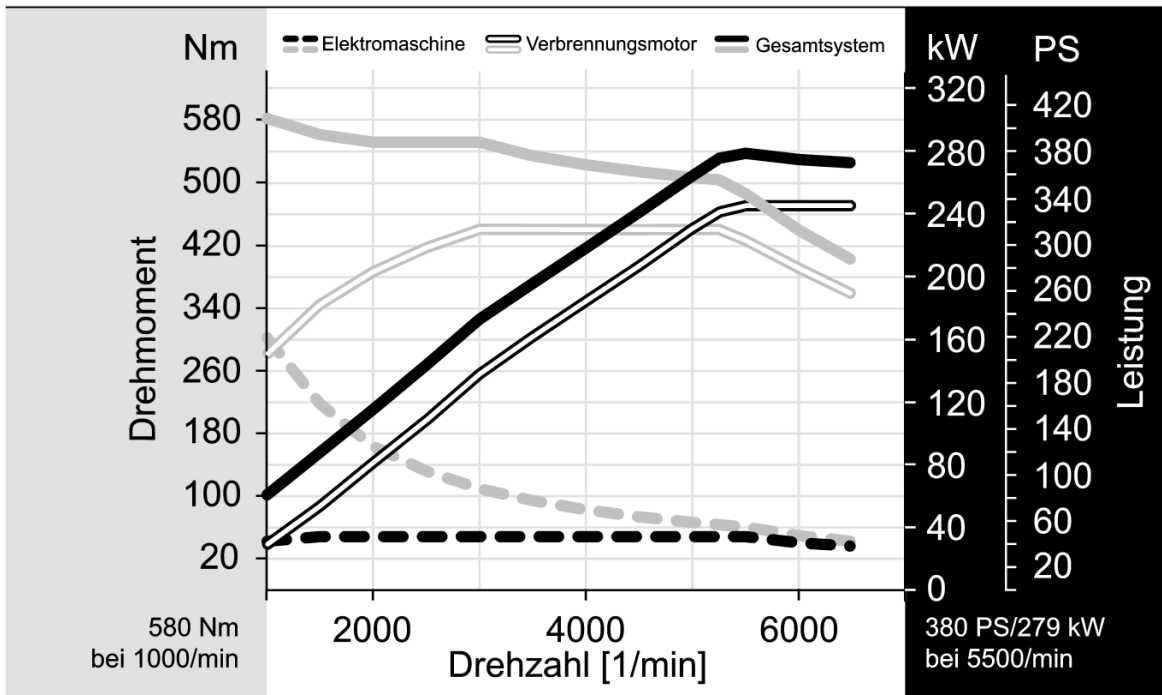


Abbildung 4.2: Das Leistungsschaubild zeigt das Leistungs- und das Drehmomentverhalten der Panamera-Antriebsaggregate [BoschEngineering GmbH, 2013]

und abgekoppelt werden und der Elektromotor das Fahrzeug antreiben.

4.1.1 Verbrennungsmotor

Der im Versuchsträger eingesetzte Verbrennungsmotor ist ein Drei-Liter-Sechszylinder-Benzin-Motor mit 245kW Nennleistung und Maximal 440Nm Drehmoment. In Abbildung 4.3 ist das charakteristische Wirkungsgradverhalten als sogenannte Muschelkurve dargestellt. Die eingezeichnete Linie stellt die elektronisch abgeriegelte Maximallast des Motors dar. Der Motor ist über eine Trennkupplung mit dem restlichen Antriebsstrang verbunden. Dies ermöglicht den Betriebsmodus Stop-on-the-Move, bei dem der Verbrennungsmotor ausgeschaltet und abgekoppelt wird. Nur dadurch sind rein elektrische Fahrten wirtschaftlich sinnvoll möglich, da der Verbrenner nicht dauernd mitgeschleppt werden muss.

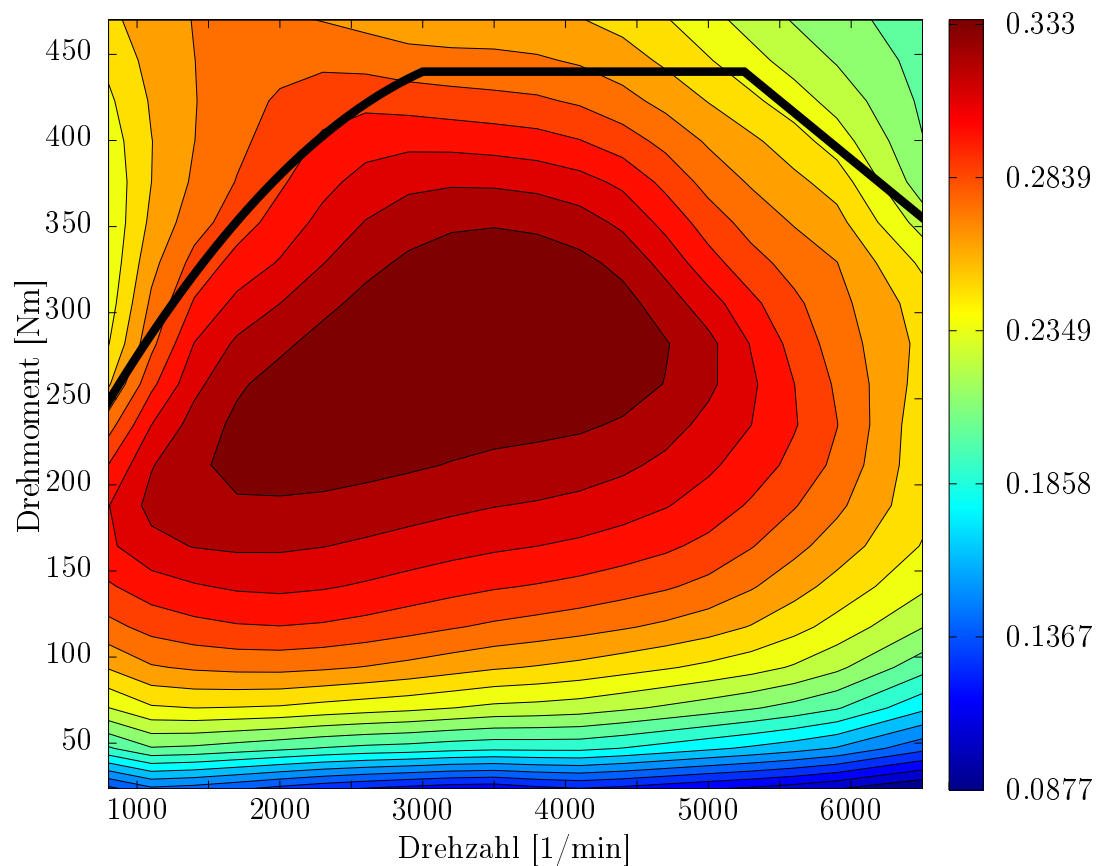


Abbildung 4.3: Die Muschelkurve ist eine gängige Darstellung des Wirkungsgradverhaltens des Verbrennungsmotors. Die Linie der maximalen Last beschränkt den Arbeitsbereich nach oben.

4.1.2 Elektromotor

Der Elektromotor mit 34kW Nennleistung und einem maximalen Drehmoment von 300Nm dient einerseits als Starter für den Verbrennungsmotor und andererseits als Energiewandler zur Realisierung der Hybrid-Funktionalität. Er kann die in der Batterie gespeicherte Energie als Antriebsmoment an die Getriebeeingangswelle abgeben, oder überschüssige kinetische Energie durch ein aktives Schleppmoment in die Batterie laden. In der Anordnung als Parallel-Hybrid wirken der Verbrennungsmotor und der Elektromotor auf die gleiche Welle, sodass der Lastpunkt des Verbrenners in den Gren-

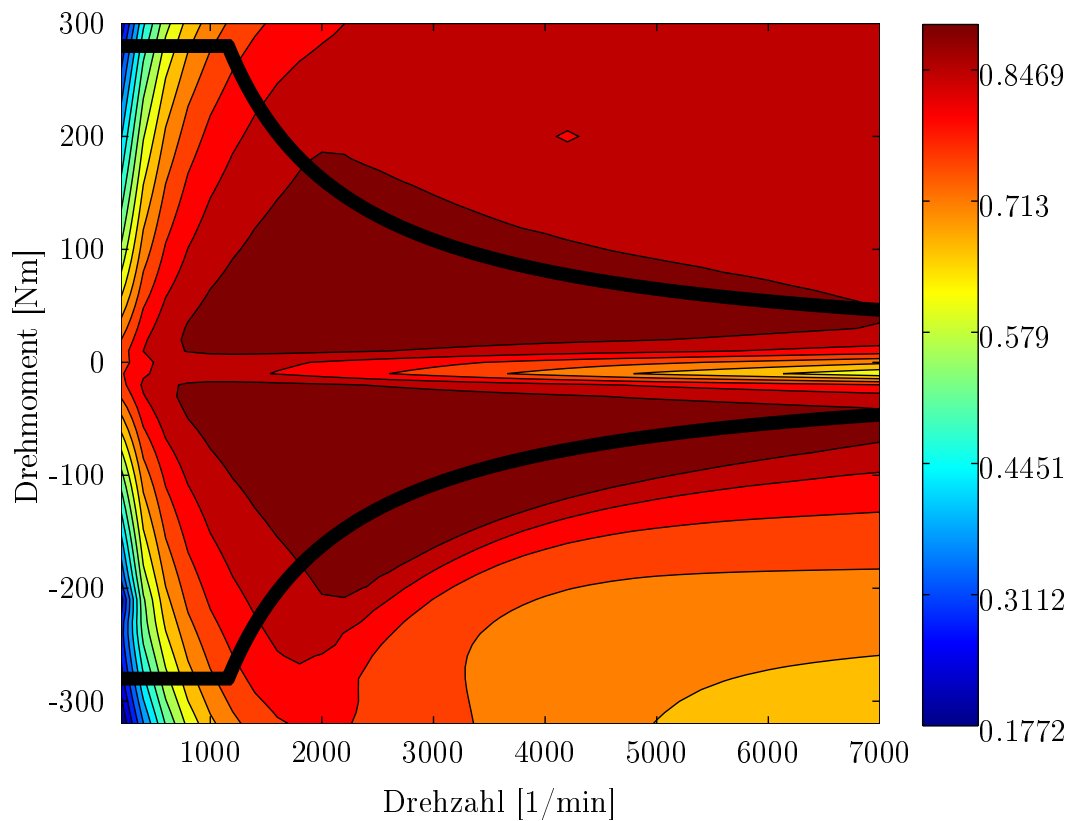


Abbildung 4.4: Die Muschelkurve des Elektromotors unterscheidet sich deutlich von der eines Verbrennungsmotors. Hier sind die Quadranten für vorwärts Beschleunigen und vorwärts Bremsen abgebildet.

zen der E-Maschine angepasst werden kann. Im Gegensatz zu einem konventionellen Fahrzeug, kann der hinzugewonnene Freiheitsgrad genutzt werden, um den System-Wirkungsgrad zu erhöhen.

Besonders vielversprechend ist die Kombination von Elektromotoren und Verbrennungsmotoren in Hybrid-Electric-Vehicles (HEV), da sich die die beiden Motorkonzepte von ihrer Drehmoment-Charakteristik her gut ergänzen. Wie in Abbildung 4.4 zu erkennen, ist in weiten Drehzahlbereichen das maximale Moment M_{Em} durch die Leistung begrenzt (Feldschwächbereich), sodass die Momentengrenze der E-Maschine mit $M_{Em,max} = \frac{30 \cdot P_{Em}}{\pi \cdot n}$ proportional zum Reziproken der Drehzahl n ist. Der Elektromotor hat folglich bei niedrigen Drehzahlen sein höchstes Moment, während der

Verbrenner erst bei relativ hohen Drehzahlen effizient arbeitet und seine Nennleistung abgeben kann. Dies führt insbesondere zu einer Verbesserung der Fahreigenschaften des Hybridfahrzeuges.

Im Gegensatz zum Verbrennungsmotor kann ein Elektromotor auch generatorisch betrieben werden. Dabei wird M_{Em} negativ, das heißt, es wird ein aktives Schlepptomment gestellt. Die Energie wird in elektrische Energie und Wärme umgewandelt. Die elektrische Energie wird in der Batterie zwischengespeichert.

4.1.3 Batterie

Um die im Unterabschnitt 4.1.2 beschriebenen Vorteile einer Hybridisierung nutzen zu können, muss ein (elektrischer) Energiespeicher verbaut werden. Im Versuchsträger kommt ein Nickel-Metallhydrid-Akkumulator zum Einsatz. Dieser nimmt im Schlepptrieb elektrische Energie auf und gibt diese bei einer Antriebsmomentanforderung an den Elektromotor ab.

Natürlich ist die Speicherung verlustbehaftet. Der Wirkungsgrad der Batterie ist sensitiv für den Ladestand (State-of-Charge (SoC)), die Stromstärke (Lade-/Entladeleistung) und die Temperatur. Im Versuchsträger wird die Batterie klimatisiert, sodass diese Abhängigkeit hier nicht weiter betrachtet werden muss.

Der Energiebedarf eines Fahrzeuges ist nicht konstant. Es wechseln sich Phasen mit unterschiedlich hohen Leistungsanforderungen ab. Während Verzögerungsphasen und bei Gefälle muss sogar kinetische Energie abgebaut werden. In konventionellen Fahrzeugen kann die überschüssige Energie nur durch Reibung (Bremsen oder Motor) und Fahrwiderstände abgebaut werden. Hybridfahrzeuge können durch Bremsenergieerückgewinnung, Rekuperation, profitieren.

Die Dimensionierung der Elektrifizierung des Antriebsstrangs entscheidet über die mögliche Einsatzintensität. Wenn der Gebrauch der mechanischen Bremsen in den meisten Situationen vermieden werden kann und stattdessen über Rekuperation verzögert wird, ist die elektrische Einheit prinzipiell groß genug gewählt. Dabei geht es nicht nur um die Kapazität des elektrischen Speichers, sondern auch um die Leistungsfähigkeit der gesamten Wandlungskette.

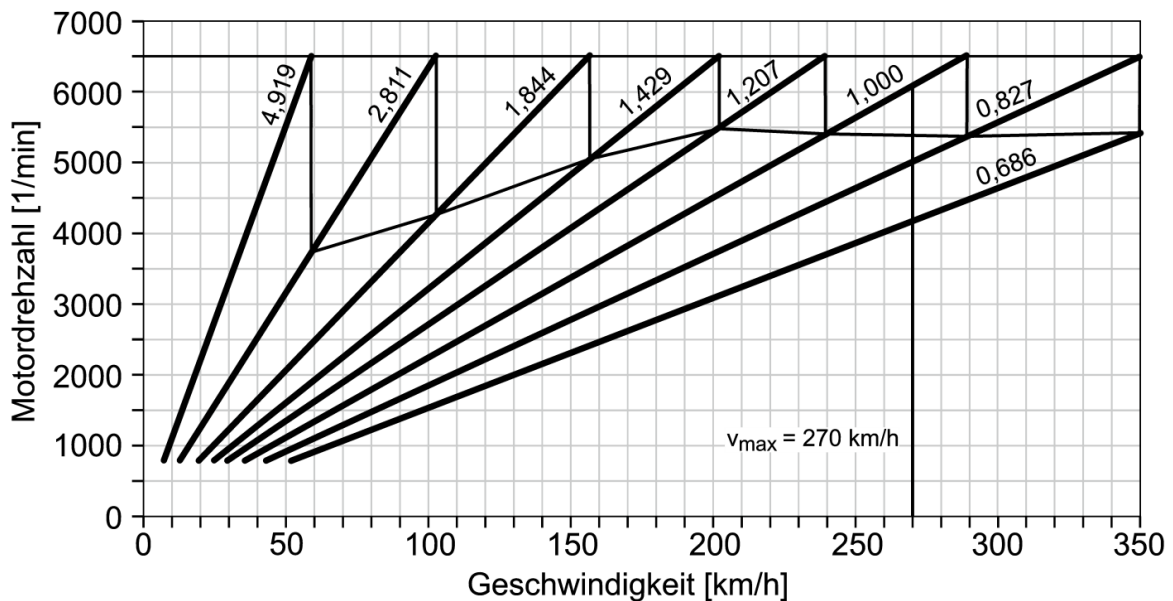


Abbildung 4.5: Das Getriebeschaubild zeigt die Motordrehzahl über der Geschwindigkeit und dem Gang [BoschEngineeringGmbH, 2013].

Beim Betrieb der Batterie ist zu berücksichtigen, dass diese beim Gebrauch verschleißt. Der Kapazitätsverlust hängt von der Stärke des Stroms, von der Temperatur und dem Ladezustand ab. Die Lebensdauer von Nickel-Metallhydrid Akkumulatoren (NiMH Akku) wird mit etwa 300 – 500 Zyklen angegeben [Lenz, 2013]. Um die Batterie zu schonen, wird ein restriktives Batterie Management System (BMS) verwendet, das die Ladeströme und -stände genauestens in günstigen Grenzen hält. Die Batterie im Versuchsträger wird aus diesen Gründen nur im Bereich von 30 – 70% relativem SoC betrieben, sodass nur 40% der eigentlichen Kapazität zur Verfügung stehen [BoschEngineeringGmbH, 2013].

4.1.4 Getriebe

Das Getriebe sorgt dafür, dass das Fahrzeug in einem großen Geschwindigkeitsbereich betrieben werden kann. Vor allem der Verbrennungsmotor ist in seinem Drehzahlbereich eingeschränkt. Die acht verschiedenen Übersetzungen sorgen dafür, dass die Antriebsaggregate immer in einem guten Arbeitspunkt betrieben werden können.

Betriebsart	Verbrennungsmotor	Elektromotor	Trennkupplung
Verbrennerische Fahrt	$P_{VM} > 0$	$P_{EM} = 0$	geschlossen
Lastpunktabsenkung	$P_{VM} > 0$	$P_{EM} > 0$	geschlossen
Lastpunktanhebung	$P_{VM} > 0$	$P_{EM} < 0$	geschlossen
Elektrische Fahrt	$P_{VM} = 0$	$P_{EM} > 0$	offen
Rekuperation	$P_{VM} = 0$	$P_{EM} < 0$	offen

Tabelle 4.1: Hybridbetriebsmodi

Generell ist die Gangwahl neben der Antriebs- oder Bremsleistung eine wichtige Stellgröße beim Fahren einer Strecke. Das im Versuchsträger verbaute 8-Gang-Automatikgetriebe bietet jedoch kein direkt zugängliches Software-Interface, sodass im Fahrzeug der Gang und die Schaltvorgänge durch die Automatik bestimmt werden. In der vorhergehenden Optimierung soll die Gangwahl jedoch berücksichtigt werden.

4.1.5 Hybridbetriebsarten

Der oben beschriebene und in Abbildung 4.1 dargestellte Hybrid-Antriebsstrang bietet durch seine Konfiguration die in Tabelle 4.1 aufgeführten Betriebsmodi. Diese unterscheiden sich durch den Zustand der Antriebsstrangkomponenten Verbrennungsmotor, Elektromotor und der Trennkupplung. Je nach erforderlicher Antriebsleistung am Rad, variiert die Eignung der Varianten. Es wird beim Betrieb meist ein besonders großer Gesamtwirkungsgrad durch Wahl der Betriebsart angestrebt.

4.2 Fahrwiderstände

Es gibt diverse Widerstandskräfte, die negativ in die Kräftebilanz um das Fahrzeug eingehen und es so bremsen. Dazu gehören der Rollwiderstand, der Strömungswiderstand der Luft, der Beschleunigungswiderstand und die Steigungskraft. Während die ersten beiden primär vom Fahrzeug abhängen, ist die Steigungskraft vom Ort des Fahrzeugs abhängig. Gleichung 4.1 zeigt die Anteile der Fahrwiderstände. Es wurde

die Kleinwinkelnäherung für die trigonometrischen Funktionen verwendet.

$$F_{Bed} = \underbrace{(e_i \cdot m_F + m_{zu}) \cdot a_x}_{\text{Beschleunigungswiderstand}} + \underbrace{m_{ges} \cdot g \cdot (\alpha + f_R)}_{\text{Roll- und Steigungswiderstand}} + \underbrace{c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot v^2}_{\text{Luftwiderstand}} \quad (4.1)$$

4.2.1 Beschleunigungswiderstand

Der Beschleunigungswiderstand ergibt sich nach dem ersten Newton'schen Gesetz $F = m \cdot a$. In der Kraftfahrzeugtechnik werden die rotierenden Massen¹ durch den Massenfaktor e_i , der mit der Fahrzeugleermasse multipliziert wird, berücksichtigt. Natürlich muss die Massenträgheit der Masse m_{zu} separat eingerechnet werden.

4.2.2 Luftwiderstand

Der Luftwiderstand ist bei hohen Geschwindigkeiten dominant gegenüber den anderen Widerstandsarten, da er quadratisch mit der Anströmgeschwindigkeit wächst. Er entsteht bei der Umströmung des Fahrzeugs, da der Luftstrom an der Vorderseite geteilt und hinten wieder zusammengeführt werden muss. Dabei entsteht vor dem Fahrzeug ein Überdruck und dahinter ein Unterdruck, sodass eine Kraft entgegen der Fahrtrichtung auf das Fahrzeug wirkt. Außerdem entsteht an der überströmten Oberfläche ein Reibungswiderstand. Weiterhin löst sich an einigen Stellen der Karosserie die Strömung ab und es entstehen Wirbel, die den sogenannten induzierten Widerstand erzeugen. Extreme Wirbelbildung im Innenraum entsteht bei geöffneten Fenstern oder Schiebedächern. Auch die Durchströmung des Motorraums und des Innenraums erzeugen Widerstand. Der Widerstandsbeiwert c_w wird üblicherweise in Windkanalversuchen bestimmt und ist für Kraftfahrzeuge im relevanten Geschwindigkeitsbereich konstant. Der Widerstandsbeiwert des Versuchsträgers beträgt 0.29 und ist damit bereits gut strömungsoptimiert.

¹Räder, Getriebeelemente und Wellen

Parameter	a [–]	b [$\frac{h}{km}$]	c [$(\frac{h}{km})^2$]
Wert	172.8	0.907	0.0306

Tabelle 4.2: Parameter Rollenmodell

4.2.3 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand ergibt sich aus der Walgarbeit in den Reifen, der dissipierenden Energie in den Stoßdämpfern und der Rollreibung in den Radlagern. Der Parameter f_R ist vom Untergrund und dem Fahrwerk inklusive der Reifen abhängig. Generell steigt der Rollwiderstandsbeiwert progressiv mit der Geschwindigkeit an. Bemerkbar ist dieser Anstieg, der auf die Deformationswellenbildung im Werkstoff zurückzuführen ist, jedoch erst bei Geschwindigkeiten jenseits der $120\frac{km}{h}$, siehe auch [Eckstein, 2010] Seite 31. Im weiteren gehe ich von einem konstanten Rollwiderstandsbeiwert $f_R = 0,01[-]$ aus.

4.2.4 Das Rollenmodell

Das sogenannte Polynomansatzes zweiter Ordnung, also der Ordnung des Luftwiderstands, lassen sich die genannten Widerstände gut in den drei Parametern abbilden. Die Parameter werden vom Hersteller empirisch bestimmt und beschreiben das Fahrzeugverhalten genauer als der physikalische Ansatz.

$$F_{Rollenmodell} = (a + b \cdot v + c \cdot v^2) \quad (4.2)$$

Die Werte der Parameter für den Porsche Panamera sind in Tabelle 4.2 hinterlegt.

4.2.5 Steigungswiderstand

Der Steigungswiderstand resultiert aus der Gewichtskraft der Fahrzeugmasse bei geneigter Fahrbahn. Da die Steigung der Fahrbahn vom Ort auf der befahrenen Strecke abhängt, wirkt ortsabhängig eine zusätzliche Last auf den Antriebsstrang. Bei einer üblichen Steigungen von 10° treten folglich für den Panamera $F_{steig} = 2270kg \cdot 9,81\frac{N}{kg} \cdot \sin(10^\circ) = 3866,9N$ als zusätzliche Last auf. Bei einer Geschwindigkeit von $100\frac{km}{h}$

muss vom Antriebsstrang eine zusätzliche Leistung von $107,4\text{kW}$ aufgebracht werden, um die Geschwindigkeit zu halten. Diese Zahlen sollen vor allem den großen Einfluss der Steigung verdeutlichen.

Kapitel 5

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die theoretischen Grundlagen zum Lösen von Optimalsteuerungsproblemen erklärt werden. Nach einer Einordnung der Optimalsteuerungsprobleme in den Kontext der mathematischen Optimierung in Abschnitt 5.1, wird das Framework der Markov-Entscheidungsprozesse und der Value-Iteration in Abschnitt 5.2 erläutert.

5.1 Optimierung

Mathematisch wird mit dem Begriff „Optimierung“ der Prozess beschrieben, der ein gegebenes Kostenfunktional extremal macht.

Die global optimale Lösung hat die Eigenschaft, dass es keine anderen Eingabewerte für die Funktion gibt, die ein besseres Ergebnis produzieren. Für lokal optimale Lösungen gibt es in der Nähe keine bessere Lösung. Es kann jedoch nicht garantiert werden, dass es sich bei der gefundenen Lösung um ein globales Extremum handelt.

Es gibt verschiedene Optimierungsproblemklassen. Die einfachste ist durch die Minimierung/Maximierung einer reellwertigen Funktion mit einer Variablen gegeben. Komplexere Probleme haben entweder eine größere Zahl an Variablen oder Werten oder beides. Die Art der Funktion hat zudem einen großen Einfluss darauf, wie schwer die optimale Lösung zu finden ist. Oft wird eine Lösung gesucht, die bestimmte Nebenbedingungen erfüllt.

Im Falle vektorwertiger Funktionen müssen die einzelnen Komponenten sinnvoll in einer Kostenfunktion gewichtet werden. Haben die Vektorkomponenten die gleiche Einheit und sind direkt vergleichbar, können häufig Normen dazu verwendet werden. Soll beispielsweise der Abstand zu einem festen Punkt auf der Ebene minimiert werden und die beiden Vektorkomponenten stellen die kartesischen Koordinaten dar, kann idealerweise die Euklidische Norm verwendet werden, da sie den Abstand darstellt. Stellen die unterschiedlichen Funktionswerte verschiedene physikalische Größen mit unterschiedlichen Einheiten dar, müssen diese miteinander in eine sinnvolle Beziehung gebracht werden. Es werden reellwertige Kostenfunktionen mit Beiträgen aller relevanten Funktionswerte aufgestellt. Die Kostenfunktion beziehungsweise die verwendete Norm stellt das Gütemaß der Lösung dar.

Häufig widersprechen sich die Ziele des Optimierungsproblems. Im Falle der für die automatisierten Längssteuerung in Abschnitt 8.3 identifizierten Ziele ist ein Kompromiss zwischen Fahrzeit und Kraftstoffverbrauch zu finden. Eine Lösung wird als Pareto-Optimal bezeichnet, wenn man kein Kriterium verbessern kann, ohne ein anderes zu verschlechtern.

Zu den komplexesten Optimierungsproblemen gehören die Optimalsteuerungsprobleme, bei denen es darum geht, die im Sinne des Kostenfunktional optimalen Steuerfolge für die Eingänge eines Systems zu finden. Die besten Chancen, dass ein solches Problem analytisch lösbar ist, bestehen, wenn das System als lineares Differentialgleichungssystem formuliert werden kann. Schwierigkeiten gibt es, wenn Nichtlinearitäten, diskrete Zustände oder Eingänge auftreten oder das System zeitvariant ist.

Im einfachsten Fall können Optimalsteuerungsprobleme über die Variationsrechnung analytisch gelöst werden. Bei nichtlinearen, diskreten und komplexen Systemen führen häufig nur noch numerische Verfahren zum Ziel. Zu diesen numerischen Verfahren zählt die Dynamische Programmierung nach Bellmann, die im Abschnitt 5.2 erläutert wird.

5.2 Dynamische Programmierung

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Konzepte erläutert, um die Dynamische Programmierung zu verstehen. Dazu ist eine Übersicht über Markov-Entscheidungs-

Tankmodell

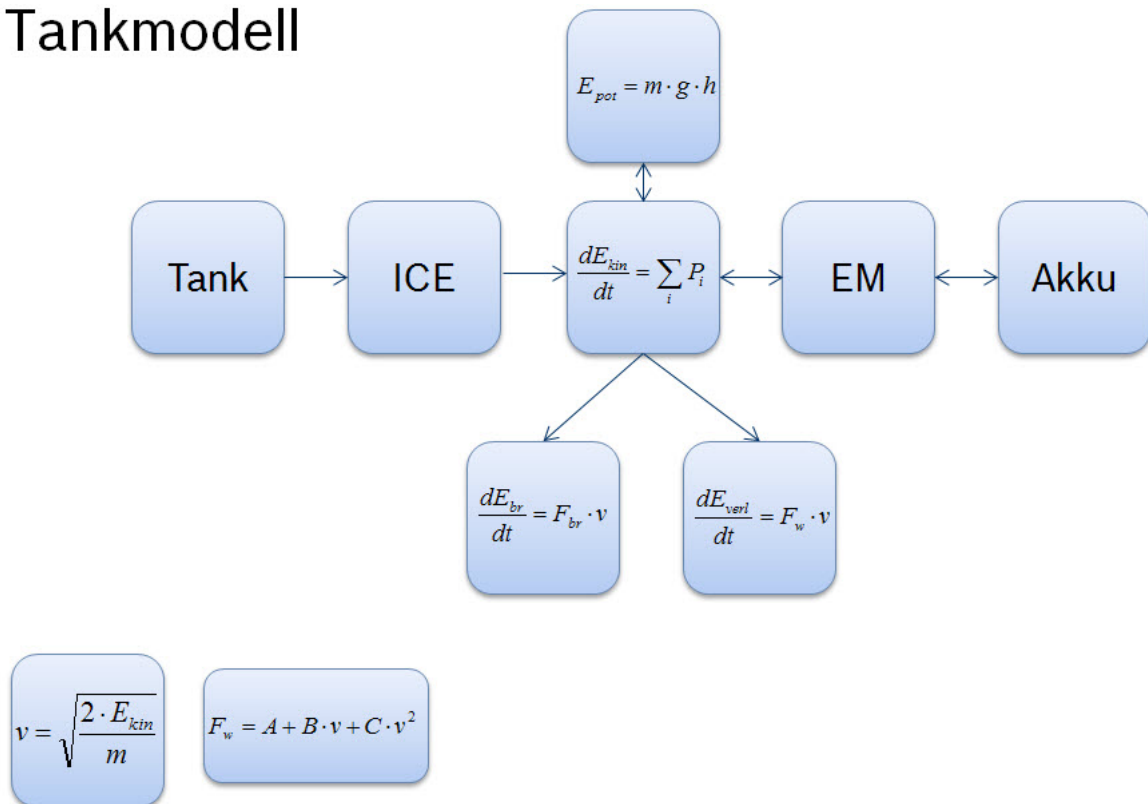


Abbildung 5.1: Fahrzeug mit den Energiespeichern E_{kin} , E_{pot} sowie dem Tank und der Batterie

Prozesse, die Value-Iteration und der allgemeinen Handlungsempfehlungen (Control Policies) wichtig.

5.2.1 Markov-Entscheidungs-Prozess

Ein Markov-Entscheidungs-Prozess ist ein mehrstufiger Entscheidungsprozess, bei dem sich ein System in einer Menge $s \in S$ von diskreten Zuständen befinden kann. Der im System handelnde Agent kann aus einer Menge $a \in A$ Aktionen entscheiden. Dabei ist im Übergangsmodell $T(s, a, s')$ bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit im Zustand s die Aktion a in den Zustand s' führt. So können auch Unsicherheiten im Ausgang einer Aktion einbezogen werden. Als letztes Element wird eine Belohnungsfunktion $R(s, a, s')$ benötigt, die in Abhängigkeit vom Zustand s , der Aktion a und

dem neuen Zustand s' die Belohnung festlegt. Damit ein solcher Entscheidungsprozess ein Markov-Entscheidungsprozess ist, muss er die sogenannte Markov-Eigenschaft erfüllen. Die Markov-Eigenschaft für einen Prozess besagt, dass das Übergangsmodell und die Belohnungsfunktion nur vom aktuellen Zustand und nicht von der Vergangenheit abhängen. Dies kann durch die geeignete Wahl des Zustandsraums gewährleistet werden. Allerdings erhöht die damit meist einhergehende Komplexitätssteigerung im Zustandsraum, dass die nachfolgenden Algorithmen wesentlich teurer werden. Deshalb lohnt es sich, den Zustandsraum so klein wie möglich zu halten.

5.2.2 Value Iteration

Für einen Markov-Entscheidungs-Prozess gibt es eine optimale Handlungsstrategie in Form einer Control Policy π^* , die jedem Zustand die Aktion mit dem höchsten erwarteten Belohnungswert zuordnet. Ist π^* bekannt, kann ein Agent, wenn er seinen Zustand kennt, leicht seine optimale Aktion bestimmen und sich optimal verhalten. Um π^* zu erhalten müssen zuerst die Werte eines jeden Zustands bestimmt werden. Ein iteratives Verfahren dazu lässt sich aus der Bellmann-Gleichung (Gleichung 5.1) ableiten.

$$V^*(s) = \max_a \sum_{s'} T(s, a, s') \cdot [R(s, a, s') + \gamma \cdot V^*(s')] \quad (5.1)$$

Die Bellmann-Gleichung ordnet jedem Zustand s einen Wert V^* zu, der angibt, welche Belohnung der Agent erwarten kann, wenn er im Zustand s die beste Aktion a wählt. Wie man sieht, muss um die V^* -Werte zu errechnen, ein nichtlineares Gleichungssystem mit einer Gleichung pro Zustand in S gelöst werden. Da dies sehr schwierig werden kann, wurde die Gleichung 5.1 die Rekursionsgleichung 5.2 gemacht, die bei einer Wahl von $0 < \gamma < 1$ gegen den Wert V^* konvergiert.

$$V_{k+1}(s) = \max_a \sum_{s'} T(s, a, s') \cdot [R(s, a, s') + \gamma \cdot V_k(s')] \quad (5.2)$$

Vereinfachungen zur Value Iteration

Im Falle eines deterministischen Übergangsmodell besteht die Summe in Gleichung 5.1 aus einem einzigen Summanden, da $T(s, a, s')$ nur für ein s' je a einen Eintrag

enthält, der nicht null ist. Da die Einträge Wahrscheinlichkeiten darstellen und sich zu 1 summieren müssen, gilt dann $T(s, a, s') = 1$

$$V^*(s) = \max_a [R(s, a, s') + \gamma \cdot V^*(s')] \quad (5.3)$$

Setzt man $\gamma = 1$ und betrachtet einen endlichen Horizont, lässt sich die Gleichung 5.3 für alle Zustände, begonnen beim Zielzustand, nach und nach lösen. Dabei ist im Zielzustand $V^*(s') = 0$, wenn man nur einen Zustand zulässt. Bei Verwendung eines Zielgebietes kann über $V^*(s')$ die Qualität des Endzustands berücksichtigt werden. Folglich kann in so einem Fall die Dynamische Programmierung nach Bellmann [Bellmann, 1957] eingesetzt werden.

Kann für ein Problem eine optimale Control Policy π^* gefunden werden, dann braucht kein Regler mehr verwendet zu werden, um den Zustand entlang der optimalen Trajektorie zu führen. Bei ungewollten Abweichungen vom Kurs wird automatisch aus der Handlungsempfehlung π^* die beste Handlung gefunden, die für die leicht veränderten Randbedingung auch von der ursprünglich geplanten Trajektorie abweichen kann.

Kapitel 6

Theoretische Analyse

In diesem Kapitel wird das gegebene Problem mathematisch beschrieben als Optimalsteuerungsproblem formuliert. Es werden die Beiträge der Kosten diskutiert.

6.1 Interpretation als Optimalsteuerungsproblem

Das System Hybridfahrzeug kann durch seine vier kontinuierlichen Zustände, den Energiespeichern nach 6.1, und zehn diskreten Zuständen beschrieben werden. Die diskreten Zustände ergeben sich durch die Acht Getriebegänge und dem Freilauf mit laufendem oder stehendem Motor. Während die diskreten Zustände direkt gesetzt werden können, können die kontinuierlichen Zustände durch Differenzialgleichungen beschrieben werden. Die Aufgabe, ein KFZ optimal im Sinne der Kostenfunktion über eine Strecke zu bewegen, ist ein Optimalsteuerungsproblem. Soll der Fahrer dieses lösen, stehen

Energiespeicher	Größe [kWh]	Leistung [kWh]	Wahrnehmbarkeit	Wirkungsgrad
kinetische Energie	< 1	∞	groß	≈ 1
Batterie	$0 - 1.5$	± 35	klein	$0.8 - 0.9$
potentielle Energie	$0 - 50$	± 200	mittel	≈ 1
Tank	$0 - 900000$	-270	klein	$0.1 - 0.35$

Tabelle 6.1: Energiespeicher

ihm das Gaspedal, das Bremspedal und die Gangschaltung zur Verfügung. Wie in Abschnitt 4.1 gezeigt wird, kann das Fahrzeug sowohl durch den Verbrennungsmotor, als auch durch den Elektromotor beschleunigt und in gewissem Maße gebremst werden. Des Weiteren gibt es die Radbremsen, die das Fahrzeug ebenfalls bremsen können. Es gibt somit physikalisch drei Aggregate, mit denen die Fahrzeugzustände beeinflusst werden können. Die Effizienz der Energiewandler beziehungsweise deren Verlust wird jedoch von der Gangschaltung und der Trennkupplung beeinflusst.

Für die Energiewandlungen und -speicher gelten technisch begründete Randbedingungen. So können nur die kinetische Energie und Batterieladung während der Fahrt befüllt und entleert werden. Wie im Abschnitt 4 erläutert, unterliegen die Energiewandlung und -speicherung Wirkungsgradverhalten und Leistungsgrenzen. Insbesondere die kinetische Energie wird durch die Fahrwiderstände kontinuierlich abgebaut. Die Zwischenspeicherung von kinetischer Energie und deren Rückwandlung ist mit etwa 50% Wandlungsverlusten verbunden. Der Verlauf potentieller Energie ist durch die Strecke örtlich vorgegeben und bietet daher keinen Freiheitsgrad für die Optimierung. Der Tank kann nur geleert werden und ist sehr groß, sodass es reicht, den Kraftstoffverbrauch als Kosten zu berücksichtigen. Aus dem Verlauf der kinetischen Energie und der Batterieladung ergibt sich die nötige Energie aus dem Tank. Wichtig im Blick auf die Optimierung ist, dass der kinetischer Energiespeicher nur begrenzt zur Optimierung genutzt werden, da der Nutzer jede Veränderung spürt.

6.1.1 Herleitung der Zustandsgleichungen

Gleichung 6.1 stellt die Energiebilanz für die kinetische Energie dar. Die Gleichungen 6.2 bis 6.5 spezifizieren die Leistungsterme in Gleichung 6.1. Mit dem Zusammenhang 6.7 kann Gleichung 6.1 von der Zeit- in eine Wegkoordinate transformiert werden. In Gleichung 6.8 wurde mit Gleichung 6.6 die Geschwindigkeit eliminiert und stellt damit die Differenzialgleichung zur Beschreibung der kinetischen Energie dar.

$$\frac{dE_{Kin}}{dt} = P_{Vm} + P_{Em} - P_{Brems} - P_{Fahrwiderstand} - P_{\alpha} \quad (6.1)$$

$$P_{Vm} = M_{Vm} \cdot \frac{v \cdot \dot{i}_{Ges}}{r_{dyn}} \quad (6.2)$$

$$P_{Em} = M_{Em} \cdot \frac{v \cdot i_{Ges}}{r_{dyn}} \quad (6.3)$$

$$P_{Fahrwiderstand} = (a + b \cdot v + c \cdot v^2) \cdot v \quad (6.4)$$

$$P_{\alpha} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v \quad (6.5)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}} \quad (6.6)$$

$$\frac{ds}{dt} = v \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{Kin}}{ds} = & \frac{(M_{Vm} + M_{Em}) \cdot \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}}}{r_{dyn}} \cdot i_{Ges} - P_{Brems}}{\sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}}} - \dots \\ & \frac{(a + b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}} + c \cdot \frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}} + m \cdot g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}} \cdot \sin \alpha}{\sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}}} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Gleichung 6.10 stellt die Änderung der potentiellen Energie nach dem Ort dar. Diese wurde durch Transformation mit Gleichung 6.7 aus Gleichung 6.9 gewonnen. Offensichtlich ändert sich die potentielle Energie nur in Abhängigkeit des Ortes. Es gibt keine Möglichkeit, dass das Fahrzeug einen anderen Verlauf der potentiellen Energie nimmt. Trotzdem ist die Betrachtung der resultierenden Kräfte auf das Fahrzeug in der Bilanz für die kinetische Energie (siehe Gleichung 6.8) wichtig. Es kann jedoch darauf verzichtet werden, einen eigenen Zustand dafür einzuführen, da es keinen Freiheitsgrad gibt.

$$\frac{dE_{Pot}}{dt} = P_{\alpha} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)^2 \cdot v = m \cdot g \cdot \sin(\alpha(s))^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)^2 \cdot \frac{ds}{dt} \quad (6.9)$$

$$\frac{dE_{Pot}}{ds} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha(s))^2 \quad (6.10)$$

Gleichung 6.11 zeigt, dass der Tank im Betrieb in Abhängigkeit von der Motorleistung und dem Motorwirkungsgrad entleert wird. Da dies wegen der Größe des Tanks keinen Einfluss auf die Fahrstrategie hat, wird hier ebenfalls darauf verzichtet, den Tankfüllstand als Größe in die Optimierung aufzunehmen. Der Kraftstoffverbrauch wird als Teil der Kostenfunktion berücksichtigt.

$$\frac{dE_{Tank}}{ds} = - \frac{F_{Vm}}{\eta_{Vm} \cdot \eta_{Getriebe}} \quad (6.11)$$

Gleichung 6.12 zeigt die Lade- und Entladedynamik der Batterie. Der Ladezustand bildet zusammen mit der kinetischen Energie den modellierten Zustandsraum für die Optimierung.

$$\frac{E_{Batt}}{ds} = \begin{cases} \frac{P_{Em} \cdot \eta_{Batt} \cdot \eta_{Em} \cdot \eta_{Getriebe}}{\sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}}} & P_{Em} < 0 \\ 0 & P_{Em} = 0 \\ -\frac{P_{Em}}{\eta_{Batt} \cdot \eta_{Em} \cdot \eta_{Getriebe} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}}} & P_{Em} > 0 \end{cases} \quad (6.12)$$

In den Gleichungen 6.8, 6.10, 6.11 und 6.12 gibt es drei Freiheitsgrade: Die Verbrennungsmotorleistung P_{Vm} , die Elektromotorleistung P_{Em} und die Bremsleistung P_{Brems} . Mit der sinnvollen Annahme, dass es nie optimal ist, gleichzeitig mit den mechanischen Bremsen zu bremsen und mit den Antriebsaggregaten zu beschleunigen, kann man die Zahl der Freiheitsgrade auf zwei beschränken, indem sämtliche Bremsleistung als negative Verbrennerleistung P_{Vm} abgebildet wird. Dies lässt sich mit der monotonen Verbrauchscharakteristik des Verbrennungsmotors begründen. Mit Einführung des zusätzlichen Energiespeichers, dessen Füllstand nahezu keine Bedeutung für den Fahrer hat, wurde ein echter zusätzlicher Freiheitsgrad geschaffen, da der frei geladen und entladen werden, er, wie bereits erwähnt, nicht direkt wahrgenommen¹ wird und so seine Nutzung nur physikalisch begründete Beiträge (Verluste und Verschleiß) zur Kostenfunktion bringt.

6.1.2 Formulierung des Optimalsteuerungsproblems

Ziel der Lösung des Optimalsteuerungsproblems ist es den Verlauf der Zustandsgrößen E_{kin} und E_{Batt} sowie der diskreten Zustandsoptionen aus den verfügbaren Übersetzungen in Abhängigkeit von der Ortskoordinate so auszuwählen, dass sich ein im Sinne eines Kostenfunktional optimaler Trajektorie ergibt. Dabei müssen die Leistungen der Antriebsaggregate P_{Vm} und P_{Em} zu gültigen Arbeitspunkten in den Abbildungen 4.3 und 4.4 führen. Die Begrenzungen für E_{Kin} hängt vom Ort auf der zu fahrenden Strecke ab. Durch Umstellen von Gleichung 6.6 nach E_{kin} , kann die Geschwindigkeitsbeschränkung in eine Energiebeschränkung umgerechnet werden. Abbildung 6.1 zeigt

¹Ausnahme: Verfügbarkeit von Funktionen, die eine hohen Batterieladestand benötigen

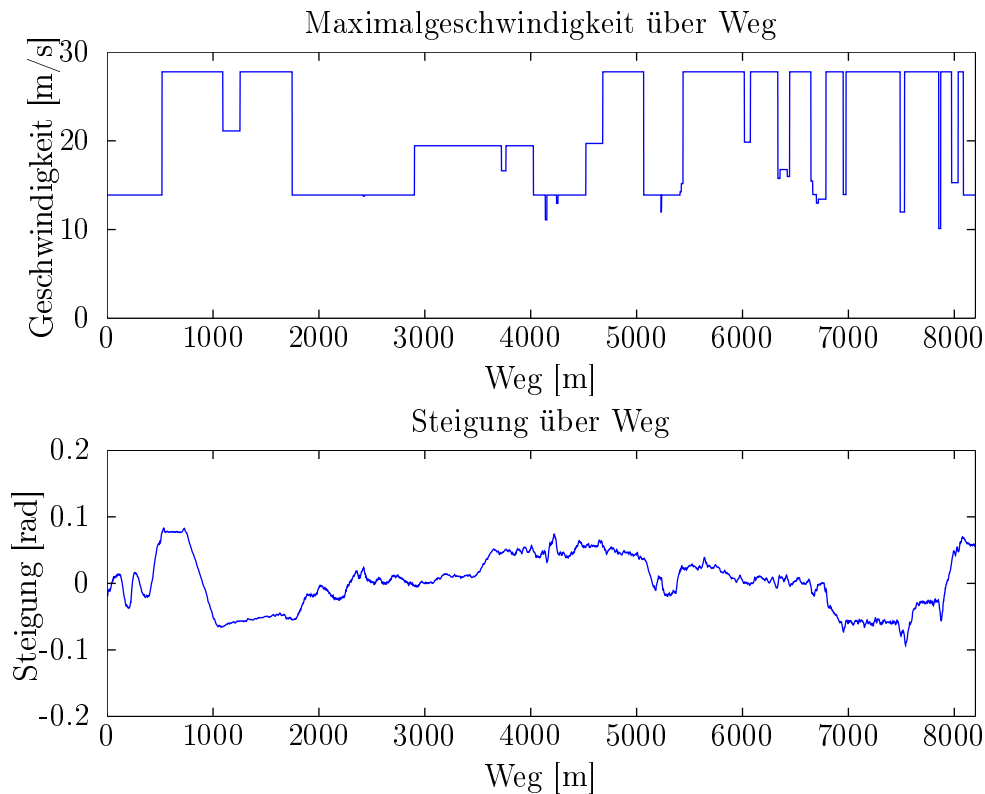


Abbildung 6.1: Geschwindigkeitsbeschränkungen und Steigungen einer Teststrecke in der Umgebung von Abstatt

die obere Geschwindigkeitsbeschränkung und die Steigung für eine reale Teststrecke in der Umgebung von Abstatt. Die Batterieladung E_{Batt} hingegen darf lediglich gewisse Maximal- und Minimalgrenzen nicht verletzen. Die Kosten setzen sich aus dem Kraftstoffverbrauch, dem Zeitbedarf und Bestrafungstermen für unkomfortables Verhalten zusammen.

$$\text{Kosten} = \text{Kraftstoffmenge} + \text{Zeit} + \text{Komfort} + \dots \quad (6.13)$$

$$\text{Gesamtkosten} = \int_{\text{Start}}^{\text{Ziel}} (\text{Kraftstoffmenge} + \text{Zeit} + \text{Unbequemlichkeit} + \dots) ds \quad (6.14)$$

Gleichung 6.14 stellt einen einfachen Vorschlag für eine Kostenfunktion dar. Gleichung 6.15 beschreibt den Kraftstoffverbrauch und Gleichung 6.16 bestimmt die Reisezeit.

Neben diesen harten Fakten sind die in Abschnitt 8.3 genannten Merkmale für ein harmonisches Fahrerlebnis wichtig.

$$m_{Kraftstoff} = \int \frac{M_{Vm} \cdot \frac{v \cdot i_{ges}}{r_{dyn}}}{\eta_{Vm} \cdot \eta_{Getriebe}} ds \quad (6.15)$$

Der Kraftstoffverbrauch errechnet sich für quasistationäre Betriebszustände nach Formel 6.15, wobei der Verbrennerwirkungsgrad η_{Vm} eine Funktion von der Drehzahl und dem Motormoment ist. Die Werte für η_{Vm} liegen als Kennfeld wie in Abbildung 4.3 vor.

$$t = \int \frac{1}{v} ds = \int \frac{1}{\sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}}} ds \quad (6.16)$$

Gleichung 6.16 stellt die benötigte Zeit für den gesamten Horizont dar. Es scheint natürlich, diese Zeit in der folgenden Optimierung zu verwenden. Tatsächlich sorgt eine solche Formulierung dazu, dass in Langsamfahrabschnitten die Kosten durch den Zeitaufwand dominiert werden, während in schnellen Abschnitten der Kraftstoff den Hauptanteil der Kosten ausmacht. Als alternatives Kriterium in der Kostenfunktion könnte ein auf den aktuellen Streckenabschnitt bezogenes Kostenfunktionalelement sein, wie in Gleichung 6.17 vorgeschlagen, eine bessere Balance zwischen den Kostenanteilen bringen.

$$t = \int (v_{max} - v) ds = \int \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin,max}}{m}} - \sqrt{\frac{2 \cdot E_{Kin}}{m}} \right) ds \quad (6.17)$$

Kapitel 7

Globale Optimierung

In diesem Kapitel wird das Optimalsteuerungsproblem global mit Hilfe der Dynamischen Programmierung nach Bellmann zur Analyse gelöst. Dazu wird die in [Sundstrom and Guzzella, 2009] vorgestellte Matlab-Funktion, die den Algorithmus implementiert, verwendet.

7.1 Matlab-Modell zur Optimierung

Um mit der Matlabfunktion ein Optimalsteuerungsproblem lösen zu können, muss dieses als Modellfunktion bereitgestellt und das Optimierungsnetz definiert werden. In der Definition des Optimierungsnetzes, müssen die Zustände sowie deren Diskretisierung und Grenzen festgelegt werden. In der Modellfunktion werden die Zustandsupdates, die Kosten für den Zustandsübergang und die Erreichbarkeit der Zustände definiert. Während die Festlegung des Optimierungsnetzes die Ausführungshäufigkeit bestimmt, hat die Modellfunktion ebenfalls großen Einfluss auf die Rechenzeit und Genauigkeit.

Zustandsraum

Die Wahl der Zustandsgrößen bestimmt sich nach den Größen, die optimiert werden sollen. Optimal wäre natürlich eine vollständige Modellierung des Fahrzeuges und der Umwelt. Da dies aufgrund von beschränkten Ressourcen nicht zielführend ist, müssen die Zustandsgrößen mit Bedacht gewählt werden. Definitiv müssen die Freiheitsgra-

de abgebildet werden, die optimiert werden sollen. Angenommen das Fahrzeug steht vollgetankt am Startort und soll über eine feste Route zum Ziel fahren, dann können die Geschwindigkeit und der Batterieladestand zu jedem Ort variiert werden. Zusätzlich bietet die Gangschaltung einen Freiheitsgrad. Allerdings kann jedem Fahrzeugzustand, bestehend aus einer Geschwindigkeit, einer Verbrennungsmotorleistung und einer Elektromotorleistung leicht der optimale Gang zugeordnet werden. Allerdings werden hierbei die Kosten für Gangwechsel vernachlässigt werden. Auch können häufige Gangwechsel so nicht vermieden werden. Eine auf diese Weise ermittelte Information über den Verlauf der Gangwahl könnte also nicht ohne Nachbearbeitung¹ übernommen werden. Würde der Tank als Energiespeicher berücksichtigt werden, wären zwar Randbedingungen denkbar, die bei einer vorgegebenen Kraftstoffmenge die maximale Durchschnittsgeschwindigkeit erzielen. Eine Berücksichtigung der Zeit als Zustand würde Randbedingungen ermöglichen, die minimalen Kraftstoffverbrauch bei gegebener Reisezeit erzwingen. Für die praktische Umsetzung wird der Zustandsvektor x nach Gleichung 7.1 verwendet.

$$x = \begin{bmatrix} E_{Kin} \\ E_{Batt} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Als unabhängige Variable wird der Ort gewählt, da so die diversen Ortsabhängigen Randbedingungen und Störungen (siehe Gleichung 7.2 und Abbildung 6.1) einfacher zugeordnet werden können.

$$w = \begin{bmatrix} \alpha_{Road} \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Eingangsgrößen

Aus dem Kontroll-Vektor u müssen die Leistungen der Antriebsaggregate eindeutig ablesbar sein. Da als unabhängige Variable im Zustandsraum der Ort gewählt wurde, werden als Eingangsgrößen längenbezogene Leistungen in $\frac{Ws}{m}$ eingeführt. Diese werden so gewählt, dass an den diskreten Orten immer ein Zustand für die kinetische Energie und eine Zustand für die Batterieladung erreicht wird. Die Vorgabe einer konventionellen Leistung würde hier dafür sorgen, dass nie genau zwischen den Energiestufen

¹Gangwechsel mit hoher Frequenz nicht durchführen oder ähnliche Heuristik anwenden

gewechselt würde, was immer zu Inkonsistenzen zwischen den theoretisch erreichten Geschwindigkeiten und den als Zustand erfassten Energiestufen führte. Die Wahl von u nach Gleichung 7.3 erfüllt die genannten Kriterien.

$$u = \begin{bmatrix} \Delta E_{kin} \\ \Delta E_{Batt} \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

Zustandsupdates

Aus den Eingangsgrößen und den alten Zuständen müssen innerhalb der Modellfunktion die neuen Zustandsgrößen berechnet werden. Aufgrund der geeigneten Wahl der Zustände und Eingänge sind die Gleichungen für die Zustandsupdates durch die Vektorgleichung 7.4 gegeben.

$$\begin{bmatrix} E_{kin,neu} \\ E_{Batt,neu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{kin} + \Delta E_{kin} \\ E_{Batt} + \Delta E_{Batt} \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

7.1.1 Diskretisierung

Die Diskretisierung entscheidet, wie genau die kontinuierliche Welt durch die diskreten Zustände angenähert werden. Allerdings steigt die Berechnungszeit und der Speicherbedarf exponentiell mit der Anzahl der Zustände an. Daher muss ein Kompromiss zwischen Berechnungsergebnis und -genauigkeit gefunden werden. Eine grobe Wahl von ΔE_{kin} resultiert in einer schnellen Berechnung, schließt aber zu viele Lösungsalternativen aus. Ohne zu große Kompromisse bei der Genauigkeit eingehen zu wollen, wird hier die Diskretisierung der Zustände nach Tabelle 7.1 vorgenommen. Die kinetischen Energiegrenzen führen zu einem Optimierungsbereich von $9.39 \frac{m}{s} \leq v \leq 27.36 \frac{m}{s}$.

$$\Delta v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta E_{kin}}{m} + v_0^2} - v_0 \quad (7.5)$$

In Bild 7.1 ist Δv nach Gleichung 7.5 und die Leistung $P_{Antrieb}$ über v_0 aufgetragen. Da mit steigender Geschwindigkeit die Zeit, in der eine örtliche Diskretisierungsstufe überfahren wird, sinkt und die Widerstandskräfte steigen, steigt die benötigte Leistung von etwa $5kW$ auf $30kW$ im betrachteten Geschwindigkeitsband an. Erwähnenswert

Energiespeicher	kinetische Energie	Batterieladung
Untere Grenze [Ws]	100000	0
Obere Grenze [Ws]	850000	200000
Diskretisierung [Stufen]	150	80
Auflösung [$\frac{Ws}{Stufe}$]	5000	2500

Tabelle 7.1: Diskretisierung der Energiespeicher

ist, dass bei einer äquidistanten Diskretisierung der Geschwindigkeit die nötige Beschleunigung für einen Geschwindigkeitsstufenwechsel mit der Geschwindigkeit immer größer würde. Folglich würde die nötige Leistung zur Überwindung des Beschleunigungswiderstands nicht linear, sondern exponentiell steigen. Die Diskretisierung wurde mit $5000 \frac{Ws}{Stufe}$ so fein gewählt, dass die aus den Fahrwiderständen resultierende Verzögerung stets ausreicht, um mindestens eine Energiestufe der kinetischen Energie zu verlieren. Dadurch ist sichergestellt, dass ein Verzögern durch Ausrollen im Optimierungsergebnis möglich ist. Einfach nachzuweisen ist, dass durch die Wahl der kinetischen Energie als Zustandsgröße innerhalb der äquidistanten Ortsschritte immer die gleiche Beschleunigung (etwa $0.22 \frac{m}{s^2}$) benötigt wird, um zwischen zwei benachbarten Energiestufen zu wechseln.

Kostenfunktion

Ein weiteres zentrales Element der Modellfunktion besteht in der Zuweisung der Kosten zu den Zustandsübergängen. Die Kosten stellen im Optimierungsgraph die Kantengewichte dar und bestimmen so maßgeblich welche Zustände Teil des kürzesten Weges sind. Wie in Abbildung 5.1 und nach Gleichung 6.1 zu sehen, gilt für die elektrische Antriebsleistung auf Radebene infolge der Entladung laut Eingangsgröße Der Zusammenhang nach Gleichung 7.6.

$$P_{el} = (E_{Batt,alt} - E_{Batt,neu}) \cdot \frac{\eta_{EM} \cdot \eta_{Batt} \cdot \eta_{Getriebe}}{\Delta t} \quad (7.6)$$

Als nächstes wird aus der Energiebilanz 6.1 auf Radebene das für die Fahrbewegung notwendige Verbrennermoment auf Kurbelwellenebene errechnet. Mit diesem kann

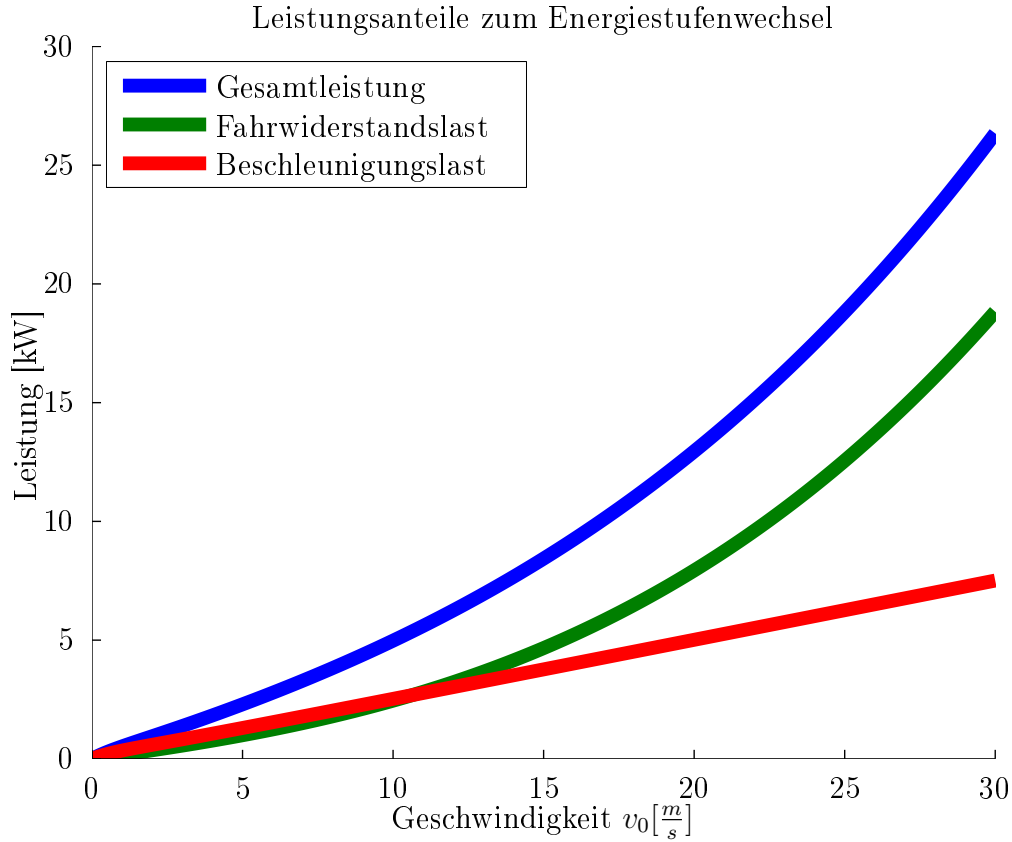


Abbildung 7.1: Die Abbildung zeigt die nötige Leistung, um eine Energiestufe zu wechseln und deren Anteile.

dann mit Hilfe einer aus dem Kennfeldern für das Wirkungsgradverhalten der Verbrenners gewonnenen Kennlinie der Wirkungsgrad gewonnen werden. Für die aus dem Tank entnommene Energiemenge gilt somit der Zusammenhang nach Gleichung 7.8, wobei für P_{Vm} der Zusammenhang aus Gleichung 7.7 gilt.

$$P_{Vm} = \frac{\left(\frac{E_{kin,alt} - E_{kin,neu}}{\Delta t}\right) + (Fw + F_{Steig}) \cdot v}{\eta_{Getriebe}} \quad (7.7)$$

$$\Delta E_{Tank} = \frac{P_{Vm} \cdot dt}{\eta_{Vm}} \quad (7.8)$$

Die Kosten werden letztendlich als folgende Summe formuliert:

$$C = c_1 \cdot \Delta E_{Tank} \cdot \frac{h}{3600s} + c_2 \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin,max}}{m}} - \sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin}}{m}}\right) + c_3 \cdot a^2 \quad (7.9)$$

Wobei die Relation der Parameter c_1, c_2 und c_3 bestimmt, wie die unterschiedlichen Ziele gewichtet werden. Wird $c_1 = 1$ gesetzt, müssen c_2 und c_3 so gewählt werden, dass es zu dem Kraftstoffverbrauch (in kW) passt. Über die Variation der Parameter lassen sich Lösungen erzeugen, die unterschiedlich stark den einzelnen Bedürfnissen entsprechen und sind auf ihre Weise optimal. Diese Art der Lösungen werden pareto-optimal genannt. Es kann kein Summand der Kostenfunktion verringert werden, ohne einen anderen zu erhöhen.

Vereinfachung

Die Komplexität des betrachteten Systems verhindert eine vollständige Modellierung und Berechnung auf handelsüblichen PCs. Daher war es unumgänglich, in der Modellierung etwas von der Realität abzuweichen. In einer ersten Version wurde so ein Fahrzeug mit einem Verbrennungsmotor mit Segelfunktion betrachtet. Dabei konnte beobachtet werden, dass die Segelfunktion immer dazu genutzt wurde, die kinetische Energie abzubauen, um danach wieder mit großer Leistung und einem guten Wirkungsgrad zu beschleunigen. Da dieses Verhalten unkomfortabel und nicht kompatibel mit anderen Verkehrsteilnehmern wäre, wurde ein Term in der Kostenfunktion integriert, der einen Motorstart bestraft. Tatsächlich sind mit einem Motorstart auch Kosten verbunden. Einerseits ist aus Energie aus der Batterie oder der Fahrzeugmasse nötig, um den Motor in Bewegung zu versetzen, andererseits wird für einen sicheren Start ein zunächst fettes Kraftstoffgemisch eingestellt. Außerdem ist ein Motorstart durch die Fahrzeuginsassen als leichter Ruck zu spüren. Kommt das zu häufig vor, wird dieser schnell als unkomfortabel empfunden. Der Einfachheit halber wurde der Motor immer dann ausgeschaltet, wenn die Leistungsanforderung unter $10kW$ gefallen ist. Solange diese Schwelle nicht wieder überschritten wird, bleibt der Motor aus und es entstehen keine Kraftstoffkosten. Das dadurch entstandene Verhalten ist in Bild 7.2 zu sehen.

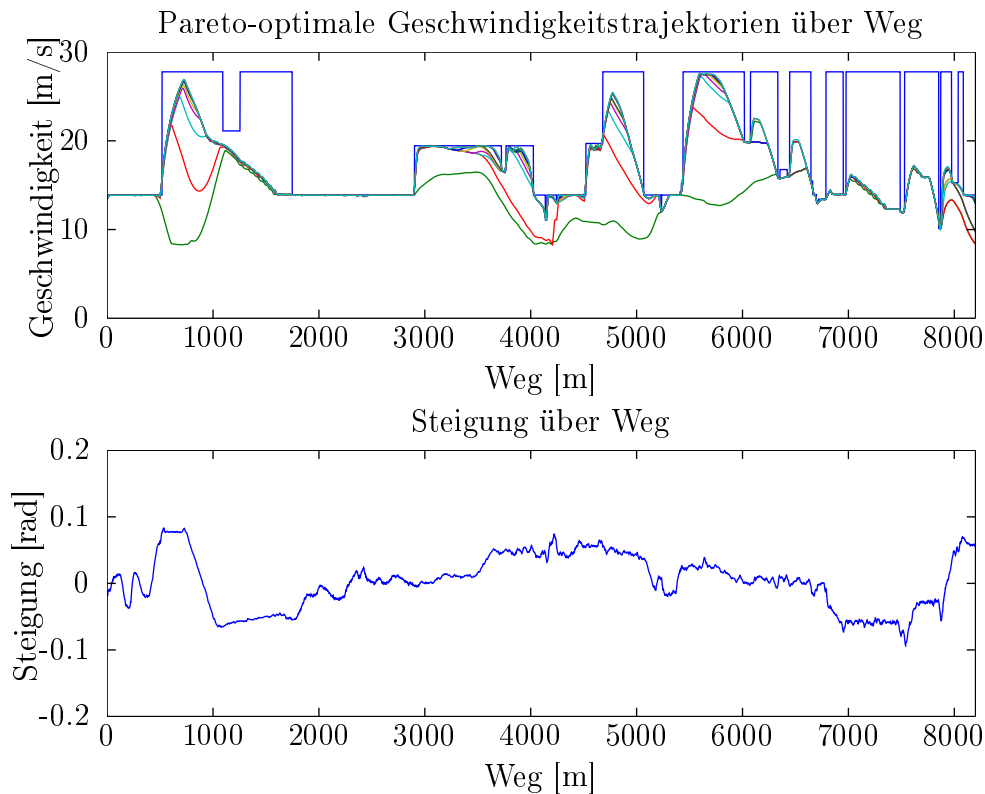


Abbildung 7.2: Geschwindigkeitsbeschränkungen und Steigungen einer Teststrecke in der Umgebung von Abstatt

7.2 Analyse der Ergebnisse

Bei der Analyse vieler Optimierungsläufe mit unterschiedlichen Kostenfunktionen wurde einige Verhaltensweisen des Antriebsstranges beobachtet, die hier erläutert werden sollen.

7.2.1 Geschwindigkeitsverlauf

Der optimale Geschwindigkeitsverlauf unterscheidet sich für konventionelle und Hybridfahrzeuge enorm. Während konventionelle Fahrzeuge ihre Masse als kinetischen Energiespeicher exzessiv für eine Art Beschleunigungslastpunktanhebung nutzen müssten, um danach den Motor abzustellen und im Freilauf rollend die Geschwindigkeit abzubauen. Dabei wird das Höhenprofil dergestalt genutzt, dass lange Rollphasen bergab

bevorzugt werden. Bei Abschnitten mit Steigung reicht oft eine kleine Beschleunigung um den Punkt des besten Wirkungsgrads des Motors zu treffen, sodass er hier auch längere Phasen betrieben wird. Hybridfahrzeuge sollten eher einen Teil der Lastpunktanhebung über die Batterie erledigen und die Fahrt so organisieren, dass die anfallende Last entweder mit dem besten Wirkungsgrad des Verbrenners oder nur mit dem Elektromotor erfolgt. Das führt zu einem Fahrtverlauf, der durch zügige Beschleunigungsphasen mit dem Verbrenner und danach durch den Elektromotor unterstützte Rollphasen mit anschließenden rekuperativen Bremsungen. Auf einer langen ebenen Strecke würde ein Hybridfahrzeug bei hohem Geschwindigkeiten einen durch den Elektromotor unterstützten Sägezahnprofil fahren. Bei langsamen Fahrten könnte, wenn der Elektromotor leistungsfähig genug ist, würde das Sägezahnprofil immer flacher und weniger ausgeprägt. Kommt es sehr auf die Reisezeit an, werden die Fahrprofile immer ähnlicher, bis sie bei der maximalen Durchschnittsgeschwindigkeit identisch sind. Hier hat der Hybrid den größten Vorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen. Durch den zusätzlichen Freiheitsgrad kann er noch profitieren, während im konventionellen Fahrzeug viel Energie mit den Bremsen unbrauchbar gemacht wird. Je voller die Batterie des Hybridfahrzeugs, umso mehr gleicht sich die optimale Fahrweise der eines konventionellen Fahrzeugs an.

7.2.2 Batterienutzung

Die Nutzung der Batterie folgt offensichtlich mit Vorausschau. Es gibt auf der Teststrecke zwei sehr große Rekuperationspotentiale durch starke Gefälle mit nachfolgender Bremsung. Es fällt auf, dass zu Beginn dieser Phasen die Batterie sehr weit beziehungsweise bei den kleinen simulierten Batteriekapazitäten sogar vollständig entladen wurde. In einer schnelleren Abfolge wiederholt sich der Zyklus Lastpunktanhebung beim Beschleunigen, elektrisch oder elektrisch unterstützt die Geschwindigkeit halten, um danach rekuperativ zu Bremsen. Der SoC war grundsätzlich sehr tief, sodass kein Rekuperationspotential verschenkt wurde. Trotzdem wurde die elektrische Energie immer dann eingesetzt, wenn der Verbrenner dafür ausgeschaltet werden kann. Ist man für die Verfügbarkeit von einigen elektrischen Fahrzeugfunktionen auf einen hohen Bat-

terieladestand angewiesen, könnte auf deren Auftreten prädiktiv die Batterie geladen werden oder eine Abweichung vom Soll-SoC in der Kostenfunktion bestraft werden.

Kapitel 8

Intelligent Adaptive Cruise Control

Mit den theoretischen Erkenntnissen der vorangegangenen Kapiteln soll eine prototypische Steuergerätefunktion entwickelt werden, die die Längsführung des Fahrzeugs übernimmt und dabei möglichst komfortabel, sicher und zuverlässig arbeitet. Zunächst sollen die funktionalen Anforderungen in Form eines Anwendungsszenarios beschrieben werden. Danach wird auf die Einbettung der Software in die Umgebung aus anderen Steuergeräten und Softwarekomponenten beschrieben. Darauf aufbauend wird geschildert, wie aus den Eingangsgrößen die Stellgrößen generiert werden. Zuletzt soll erläutert werden, wie die im Anwendungsszenario definierte Bedienung realisiert wird.

8.1 Rapid-Control-Prototyping

In der Funktionsentwicklung und Applikation werden bei Bosch Engineering die Produkte der Bosch-Tochterfirma Etas verwendet. Diese bilden eine Rapid-Control-Prototyping-Umgebung. Das Schnittstellenmodul ES910 kann neben einer Ethernet-Verbindung zu einem PC, mit Fahrzeugbussen (meist CAN) und mit einem oder mehreren Emulatortaskkopf-Steuergeräten verbunden werden. Es ist also möglich, den Speicherzustand des ETK-Steuergerätes zu messen und zu beeinflussen. So können einerseits Parameter während des Betriebes verstellt und andererseits mit sogenannten Freischnitten vorhandene ECU-Funktionen durch in der ES910 gerechnete ersetzt werden, sodass diese schnell getestet werden können. Mit 800MHz Rechenleistung und

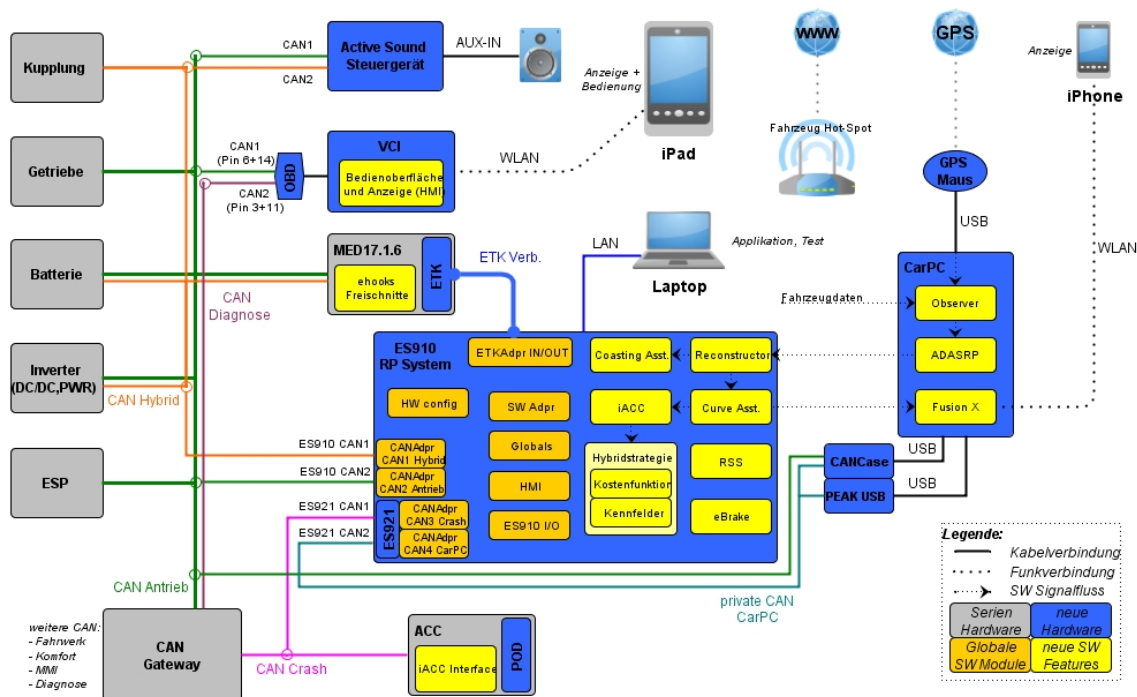


Abbildung 8.1: Steuergeräte-Topologie im Versuchsträger [BoschEngineering GmbH, 2013]

512MB Arbeitsspeicher ist die ES910 jedoch um einiges leistungsfähiger als das Seriensteuergerät MED 17.1, das im Porsche Panamera zum Einsatz kommt.

Abbildung 8.1 zeigt die im Versuchsträger verbaute Rapid-Control-Prototyping-Hardware im Kontext der relevanten Steuergeräte inklusive deren Vernetzung über die CAN-Busse.

8.2 Kartendaten

Navteq stellt mit Advanced Driver Assistance System Research Platform (ADAS-RP) eine Entwicklungsplattform für Navigationssystem zur Verfügung. Der Hauptbestandteil ist die digitale Karte. Ist ein GPS-Signal verfügbar, wird es verwendet um die Position auf der Karte zu bestimmen. Ein wichtiger Datenverarbeitungsschritt ist das Map-Matching, bei dem der gemessenen und somit fehlerbehafteten Fahrzeugposition

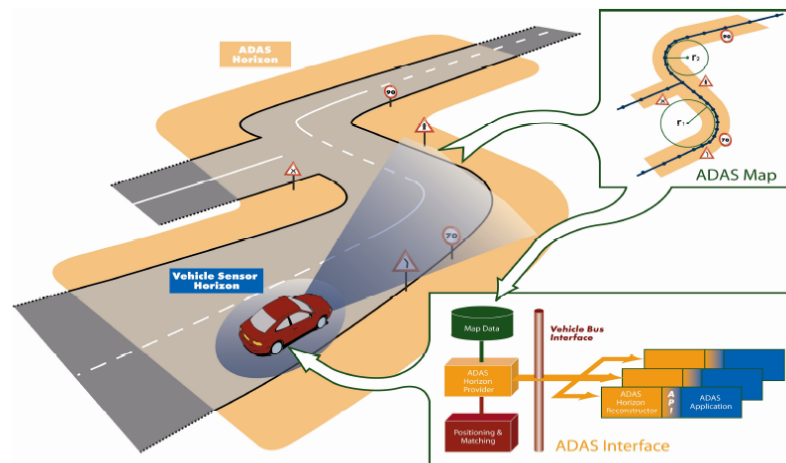


Figure 1 - ADAS Horizon overview

Abbildung 8.2: ADAS Horizont Überblick

eine Position auf einer in der Karte vorhandenen Straße zugeordnet wird. Abhängig von dieser Position und der Bewegungsrichtung wird der Most Probable Path (MPP) auf der Karte berechnet. Eine Straße in der Karte besteht aus Shape-Points, zu denen unter anderem die Position, die Nachbar-Shape-Points, die Steigung und Straßenkrümmung sowie gesetzliche Geschwindigkeitsvorgaben und sonstige relevante Informationen gespeichert sind. Der elektronische Horizont inklusive des MPP wird über das ADASISv2-Protokoll über CAN versendet und kann von jedem Busteilnehmer wieder aufgebaut werden. So ist dieser als elektronischer Horizont allen Steuergeräten verfügbar und kann für die GPS- und kartendatenbasierte Funktionsentwicklung genutzt werden. Abbildung 8.2 zeigt einen Überblick über die im Horizont enthaltenen Daten. Das ADAS-RP läuft im Versuchsträger auf dem CAR-PC und schickt die Horizontdaten über einen privaten CAN-Bus an die ES910. Dort wird vom Reconstructor der MPP als Horizont erneut aufgebaut und nach den relevanten Merkmalen, wie Kurven und Geschwindigkeitsbegrenzungen durchsucht.

8.3 Anwendungsszenario

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Bedienungen und ihre Effekte als Anwendungsszenarios vorgestellt. Zu Demonstrationszwecken soll die Intelligent Adaptive Cruise Control (iACC) über ein iPad aktiviert werden können. Wird in der Bedienoberfläche des iPads die iACC aktiviert, wird die serienmäßige ACC-Funktionalität durch die iACC ersetzt. Im Folgenden gehe ich davon aus, dass dies bereits geschehen ist.

8.3.1 Aktivierung

Ausgangslage: Fahrer sitzt im Auto und fährt. Er möchte sich von der iACC unterstützen lassen.

Handlungen: Der Fahrer aktiviert die iACC durch Heben des Lenkstockhebels. Durch weiteres Heben oder Senken wird die obere Grenzgeschwindigkeit der Fahrt gesetzt. Werden keine Änderungen mehr durchgeführt, wird nach kurzer Zeit die Längsführung übernommen.

8.3.2 Deaktivierung

Ausgangslage: Die iACC ist aktiv und soll deaktiviert werden.

Handlungen: Durch Ziehen am Lenkstockhebel oder betätigen des Bremspedals wird die iACC deaktiviert und das Fahrzeug ist wie gewohnt über die Pedale in seiner Längsdynamik steuerbar.

8.3.3 Ändern der Höchstgeschwindigkeit

Ausgangslage: Die iACC ist aktiv und die Höchstgeschwindigkeit soll geändert werden.

Handlungen: Durch Heben oder Senken wird die obere Grenzgeschwindigkeit der Fahrt gesetzt. Wirkung: Ist die Änderung abgeschlossen, wird die neue Höchstgeschwindigkeit berücksichtigt und gegebenenfalls komfortabel verzögert.

8.3.4 Fahren ohne Verkehr

Ausgangslage: Die iACC ist aktiv und es liegt eine Kurvenreiche Strecke voraus, die auch Geschwindigkeitsbeschränkungen enthalten kann.

Handlungen: Der Fahrer steuert die Querdynamik des Fahrzeugs mit dem Lenkrad, während er das Geschehen überwacht. Wirkung: Das Fahrzeug vollzieht selbsttätig die nötigen Geschwindigkeitsanpassungen, um auf der vorausliegenden Strecke schnell, sicher und effizient unterwegs zu sein. Darüber hinaus werden die Antriebsstrangkomponenten mit Informationen und Anweisungen zu speziellen Effizienzmaßnahmen wie zum Beispiel Segeln oder Rekuperation animiert.

8.3.5 Fahren mit Verkehr

Ausgangslage: Die iACC ist aktiv und das Verkehrsaufkommen macht eine Anpassung der Fahrweise nötig.

Handlungen: Der Fahrer steuert die Querdynamik des Fahrzeugs mit dem Lenkrad, während er das Geschehen überwacht. Wirkung: Die ACC erkennt das vorausfahrende Fahrzeug und wechselt in den Folgefahrt-Modus. Die Längsführung durch die iACC wird fortgeführt, ist jedoch durch die Dynamik und Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs eingeschränkt.

8.3.6 Moduswahl

Ausgangslage: Die iACC ist aktiv und der Fahrer möchte einen anderen Fahrmodus wählen.

Handlungen: Mit einem Schieberegler auf dem iPad kann der Grad der Sportlichkeit stufenlos gewählt werden. Wirkung: Die Parameter zum Konstruieren der Trajektorie werden abhängig von der getroffenen Einstellung gewählt. Soll komfortabel gefahren werden, werden lange Strecken konstant gefahren, Beschleunigungen fallen sanfter aus, es wird viel ausgerollt und wenig gebremst. Fordert der Fahrer eine hohe Durchschnittsgeschwindigkeit und sportliches Verhalten, wird stärker beschleunigt. Die Phasen konstanter Fahrt werden kürzer, es wird weniger Zeit in das Ausrollen

investiert und erst im letzten Augenblick gebremst.

8.4 Schnittstellen und Randbedingungen

Die Wirkzusammenhänge und die Verknüpfungen zwischen der iACC und den Komponenten Reconstructor, Car-PC, ACC, ECU und dem Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)-Steuergerät sind in Abbildung 8.3 abgebildet. Zu sehen ist, dass das iACC Informationen über die Fahrzeugposition und die vorausliegende Strecke vom Reconstructor erhält, der den MPP (siehe Abschnitt 8.2) vom Car-PC empfängt und auswertet. Der Fahrzeugzustand wird aus der ECU über einen Emulatortastkopf gelesen oder aus den ohnehin verfügbaren CAN-Botschaften mitgelesen. Die Stellgrößen des iACC, im Wesentlichen ein Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitswunsch, eine Moduswahl zur Parameterumschaltung und das sogenannte Segel-Flag zum Öffnen der Trennkupplung im Antriebsstrang und vermeiden von positiven Momentenanforderungen werden über CAN an das ACC-Steuergerät gesendet. Dieses verarbeitet die Signale und sendet ein Kupplungswunschmoment an die ECU und einen Verzögerungswunsch an das ESP. Die ECU und das ESP beeinflussen über Antriebsmomente und Bremsenriffe die Kräftebilanz des Fahrzeugs und damit die Fahrzeugbewegung und Position, die wiederum vom Car-PC über Global Positioning System (GPS) gemessen wird.

8.4.1 Schnittstelle zur ACC

Die Kommunikation zum ACC-Steuergerät läuft über den Crash-CAN. In Bild 8.1 ist die Verschaltung der Hardware im Versuchsträger zu sehen. Das Rapid-Prototyping-Steuergerät ES910, auf dem die iACC-Software laufen soll, ist unter anderem mit dem Crash-CAN verbunden.

Es wurde eine neue Nachricht in die Crash-CAN-Matrix eingefügt, die alle Signale für die Kommunikation zum ACC im $20ms - Raster$ überträgt. Damit die neue Nachricht vom ACC-Steuergerät verarbeitet wird, musste ein entsprechender Software-Stand erstellt und auf das Steuergerät geflasht werden.

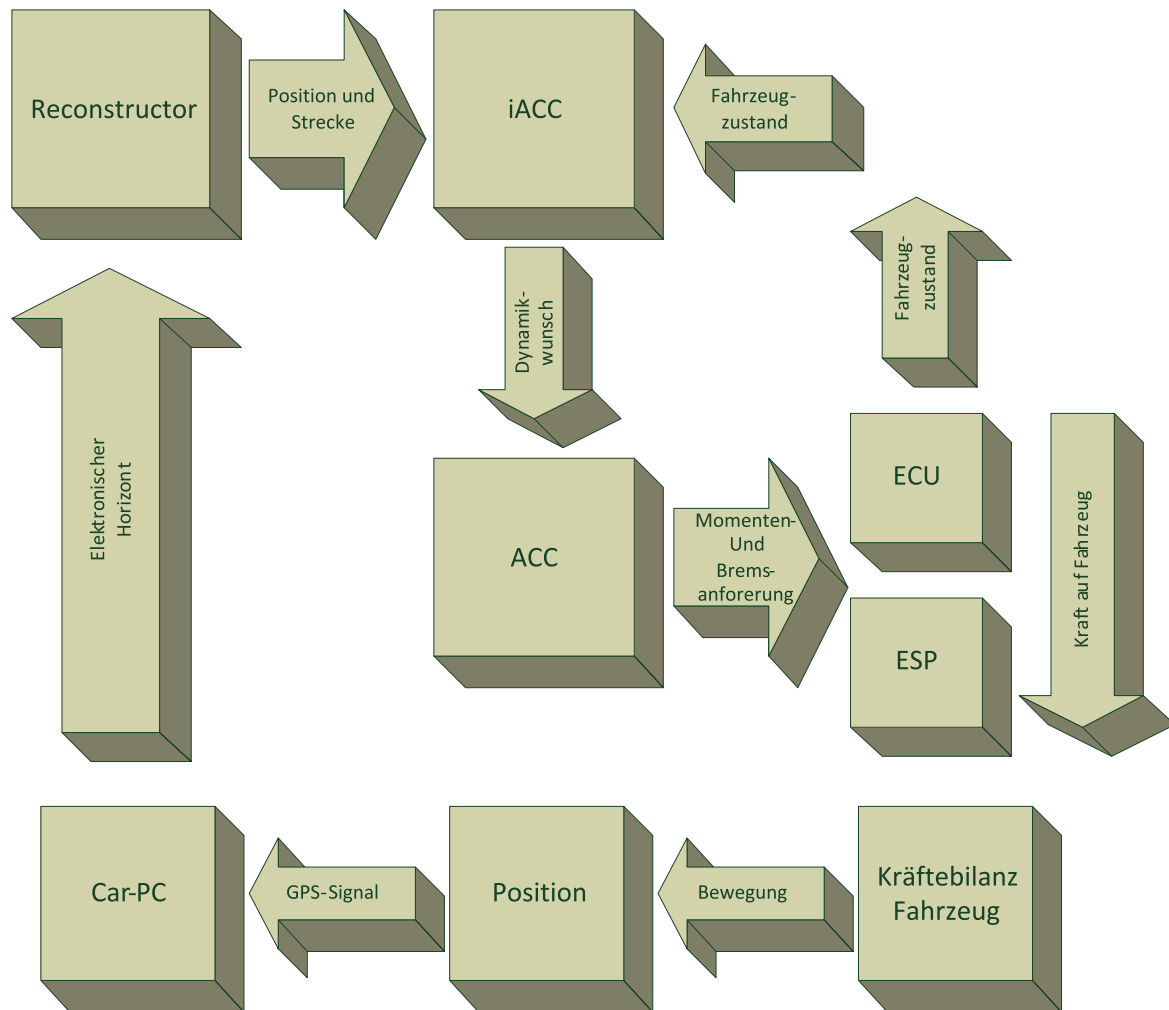


Abbildung 8.3: Übersicht über Wirkzusammenhänge der Komponenten

Im ACC-Steuergerät werden aufgrund diverser Einflüsse¹ und Fahrzeugzustände Beschleunigungen berechnet, wobei die kleinste letztendlich umgesetzt wird. Die iACC-Wunschbeschleunigung² beziehungsweise Geschwindigkeit wird in diese Minimumsauswahl mit einbezogen, sodass die iACC solange die Fahrzeugdynamik steuern kann, solange kein anderer Grund eine niedrigere Beschleunigung vorschreibt.

Das Beschleunigungsflag teilt der ACC mit, ob der Beschleunigungs- oder der Ge-

¹Folgefahrt, Lenkwinkel, Anhänger erkannt, Abweichung von der Sollgeschwindigkeit und einiges mehr

²Die Wunschbeschleunigung kann positive und negative Werte annehmen

schwindigkeitswunsch umgesetzt werden soll. Drei Bit in der CAN-Botschaft an die ACC werden für die Übermittlung eines Modus verwendet. Über diese Bits lassen sich acht Modi definieren, die jeweils unterschiedliches Verhalten der ACC bewirken. Über den Modus kann die ACC ausgeschaltet, die Standard-ACC oder einer der weiteren iACC-Modi zur Parameterumschaltung ausgewählt werden.

Das Segelflag veranlasst die ACC dazu, keine Momentenanforderungen an die ECU zu senden. Außerdem wird eine Motor-Stop-Anforderung gesendet und angefordert die Trennkupplung im Antriebsstrang zu öffnen. Die letzte Entscheidung, ob den Anforderungen gefolgt wird, liegt allerdings bei der ECU. Eventuelle Motor-Stop-Verbote haben Priorität.

8.4.2 Schnittstelle zum Reconstructor

Der Reconstructor stellt den vom Car-Pc aufgebauten MPP in bereits teilinterpretierter Version zur Verfügung. Da der Reconstructor ebenfalls ein Software-Modul ist, das auf der ES910 läuft, kann der Datenaustausch über globale sichtbare Variablen, sogenannten Messages erfolgen.

Die Daten vom Reconstructor enthalten Informationen über vorausliegende Kurven und Geschwindigkeitsbegrenzungen. Zu jeder übermittelten Kurve wird ein Anfangs-, ein Endpunkt und die zulässige Geschwindigkeit übermittelt. Die Geschwindigkeitsbeschränkungen werden durch eine Entfernung und die dann geltende Beschränkung übermittelt. Zusätzlich wird die aktuell gültige Geschwindigkeitsbeschränkung übermittelt. Aus diesen Daten ist das Aufbauen einer oberen Geschwindigkeitsgrenze möglich. Die Geschwindigkeitsobergrenze kann in Abschnitte konstanter Beschränkung eingeteilt werden. Normalerweise haben Abschnitte Anfangs- und Endgeschwindigkeiten, die unter der Limitgeschwindigkeit liegen. Durch ein aufgehobenes Geschwindigkeitslimit kommt es auch zu Abschnitten, deren Endgeschwindigkeit gleich mit der Abschnittsgeschwindigkeit ist. Ist der Beginn eines Abschnitts durch eine Geschwindigkeitsbeschränkung gekennzeichnet, ist im folgenden Abschnitt die Anfangsgeschwindigkeit gleich der Höchstgeschwindigkeit. Abschnitte, die durch eine Beschränkung beginnen und durch deren Aufhebung enden, haben sowohl die Anfangs- als auch die Endge-

schwindigkeit gleich mit der Limitgeschwindigkeit. Dieser Fall tritt auch in Kurven auf.

Als weiterer Sonderfall müssen Abschnitte erkannt und mit dem vorhergehenden zusammengefasst werden, die zu kurz sind, um von der Anfangs- auf die Endgeschwindigkeit zu Verzögern. Es kann vorkommen, dass nach einmaligem Zusammenfassen die nötige Verzögerung immer noch zu groß ist, sodass er mit noch weiteren Vorgängerabschnitten zusammengeführt werden muss. Der Fall, dass die End- über der Anfangsgeschwindigkeit liegt und diese nicht erreichbar ist, muss ebenfalls erkannt werden. Dann muss dieser Abschnitt mit seinem Nachfolger zusammengelegt werden und dann einer erneuten Prüfung unterzogen werden.

Sind alle Abschnitte klassifiziert und die zu kurzen an den jeweiligen Nachbarn angefügt, hat man Gewissheit, dass jeder Abschnitt für sich betrachtet fahrbar ist. Folglich reicht es danach, die Abschnitte isoliert auszuwerten.

8.4.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Der Fahrer hat als Eingabemöglichkeiten die Bedienoberfläche auf dem iPad zur Moduswahl, den Lenkstockhebel zum Aktivieren, Deaktivieren der Funktion und zum setzen der Höchstgeschwindigkeit, das Gaspedal zum Übersteuern des Systems³ und das Bremspedal zum Deaktivieren der Längsführung.

Informationen über den Zustand des Systems bekommt der Fahrer über das Kombi-Instrument und das iPad. Im Kombi-Instrument wird die eingestellte Höchstgeschwindigkeit angezeigt und ob ein vorausfahrendes Fahrzeug erkannt wurde. Zusätzlich besteht die Möglichkeit über ein iPhone die Entfernung und die Geschwindigkeitsempfehlung der nächsten Kurven anzeigen zu lassen. Muss die Funktion aufgrund eines Zwischenfalls⁴ deaktiviert werden, wird ein akustisches Signal im Innenraum einge spielt, das dem Fahrer zur Übernahme der Kontrolle auffordert.

Die Ausgänge werden über CAN und Wireless Local Area Network (WLAN) an die Anzeigeelemente gesendet und von diesen empfangen. Alle bereits im Serienfahrzeug

³Zur Durchführung von Überholvorgängen

⁴GPS-Ausfall, Nutzung des Gaspedals in der Bremsphase oder ein ESP-Eingriff

vorhandenen Elemente werden über CAN angesteuert oder deren Zustand gelesen.

8.5 Softwaredesign

Die Kernaufgabe der Software besteht darin, aus der Position und der vorausliegenden Strecke eine passende Beschleunigungsanforderung an die ACC zu senden. Dabei reicht es offensichtlich nicht, nur auf die aktuelle Limitgeschwindigkeit zu achten, da die Dynamik des Systems keine verschwindend geringen Bremswege zulässt. Die Gesamtstruktur der Softwareelemente zwischen den Schnittstellen wird nach dem Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe (EVA)-System organisiert. Zuerst werden die vom Reconstructor erhaltenen Daten gespeichert und zusammengeführt. Dabei wird sichergestellt, dass es sich um eine physikalisch sinnvolle Gliederung handelt. Im nächsten Schritt werden die Daten des nächsten Abschnitts analysiert und eine ökonomische Maximalgeschwindigkeit gewählt. Immer wenn ein gültiges Ergebnis vorliegt, wird dieses in einem Zwischenspeicher gespeichert. Liegt ein gültiges Ergebnis vor, wird es nicht mehr verändert.

Wird ein Zielpunkt überfahren, wird aus dem Zwischenspeicher der nächste Abschnitt gelesen und kurz danach in die Abschnittsberechnung der dann folgende Abschnitt geladen.

Der geladene Abschnitt wird anschließend dazu genutzt, die Schnittstellenwerte für das ACC zu berechnen. Als Koordinate dient die Entfernung zum Zielpunkt. In Abhängigkeit von der Ortskoordinate und vom Fahrzeugzustand (Geschwindigkeit und Beschleunigung) wird eine Unterteilung in verschiedene Phasen durchgeführt. Die Phasen sind nach ihrer Reihenfolge priorisiert, sodass eine spätere Phase eine frühere dominiert. Im Fehlermanagement werden die Zustände der beteiligten Softwarekomponenten überprüft. Im Falle eines Fehlers wird die Gesamtfunktion deaktiviert. Die Eingaben des Benutzers in Form von Ein- oder Abschaltanweisungen gehen hier neben den übrigen Bedingungen ein.

Mit Hilfe einer internen Simulationsumgebung können sämtliche externen Komponenten emuliert werden. Für die Entwicklung und Validierung ergeben sich dadurch deutliche Vorteile.

8.5.1 Trajektorienplanung

Wie sich in Kapitel 7 gezeigt hat, lohnt es sich nicht immer, auf die gesetzlich erlaubte Höchstgeschwindigkeit zu beschleunigen. Je kürzer der Abschnitt ist und je mehr am Ende des Abschnitts verzögert werden muss, umso weniger lohnt sich eine Beschleunigung. Es lohnt sich im betrachteten Geschwindigkeitsbereich immer, und wird vom Fahrer auch erwartet, auf die gesetzliche Höchstgeschwindigkeit zu beschleunigen, wenn zum nächsten Zielpunkt hin ausgerollt werden kann.

Um eine effiziente Fahrweise zu realisieren wird in der Planung die Zielgeschwindigkeit, auf die im Abschnitt beschleunigt werden soll, von der Limitgeschwindigkeit ausgehend solange abgesenkt, bis ein bestimmter Anteil der Gesamtstrecke konstant gefahren werden kann. Dies stellt sicher, dass nicht beliebig viel Energie zum Beschleunigen eingesetzt wird, um sie kurz danach wieder mit der Bremse unbrauchbar zu machen.

8.5.2 Abschnittsmanagement

Ein Abschnitt umfasst die Strecke konstanter Geschwindigkeitsobergrenze. Die Planung der Trajektorie nach Abschnitt 8.5.1 geschieht immer einen Abschnitt im voraus. Wird der Endpunkt des aktuellen Abschnitts erreicht, wird der zuletzt berechnete Abschnitt in den aktiven Speicher geschrieben und die Berechnung des folgenden Abschnitts angestoßen. Auf diese Weise stehen immer die Daten des Folgeabschnitts zur Verfügung. Bei Aktivierung des System wird ein künstlicher Startabschnitt in die Strecke eingefügt, der einerseits dafür sorgt, dass der erste echte Abschnitt berechnet werden kann, andererseits ist es stellt sich für den Fahrer ein vorhersehbares Verhalten ein, wenn der Wagen nach der Aktivierung der iACC nicht sofort in die Beschleunigung übergeht.

8.5.3 Trajektoriengenerierung

Das Fahrzeug soll innerhalb eines Abschnitts gemäß der vorhergegangenen Trajektorienplanung beschleunigen, konstant fahren, ausrollen und bremsen. Dazu wird die ACC-Schnittstelle in Abhängigkeit von der Entfernung zum Zielpunkt und dem Fahr-

zeugzustand und den gemessenen Streckeneigenschaften bedient. Aus Komfortgründen darf die geforderte Fahrzeugbewegung keine Knicke enthalten, das heißt, der Beschleunigungsverlauf sollte stetig sein.

Phasenmanagement und Priorität

Ein Abschnitt wird in die Phasen

1. Bremsen
2. Ausrollen,
3. Beschleunigen und
4. Konstantfahrt

in absteigender Priorität aufgeteilt. Je nach Relation der Geschwindigkeiten und Längen des Abschnitts, nehmen die Phasen unterschiedliche Ausprägungen an. In den unterschiedlichen Phasen werden die Schnittstellen zum ACC auf andere Art berechnet und diese Berechnungsvorschriften müssen in Abhängigkeit vom Fahrzeugzustand (hier Ort und Geschwindigkeit) umgeschaltet werden. Grundsätzlich sind die Phasen nach einer Rangfolge, die sich mit dem Sicherheitsgedanken begründet, geordnet. Für jede Phase werden logische Aktivitätsbedingungen ausgewertet und die Phase mit der höchsten Priorität mit zutreffender Bedingung wird aktiviert.

Beschleunigungsphase

In einigen Versuchsfahrten wurden unterschiedliche Beschleunigungsverläufe getestet. Dabei wurde festgestellt, dass das Beschleunigungsempfinden nicht konstant oder linear ist. Qualitativ lässt sich sagen, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten höhere Beschleunigungen akzeptiert als bei hohen Geschwindigkeiten. Beim normalen Fahrbetrieb werden Beschleunigungen so durchgeführt, dass dabei der Motor immer in einem ähnlichen Arbeitspunkt, zum Beispiel $200Nm$ bei $2000-3000^1/min$, bleibt. Durch Hochschalten wird die Drehzahl im günstigen Bereich gehalten. Gleichzeitig ermöglicht diese Strategie, dass nahezu konstant mit dem gleichen Wirkungsgrad beschleunigt werden

kann. Die Wahl der Leistung wird unter Berücksichtigung des Fahrkomforts und der Effizienz getroffen.

Die zu verwendende Leistung wird mit Hilfe zweier Kennlinien bestimmt. Eine bestimmt die Leistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, während die andere einen Faktor zwischen null und eins in Abhängigkeit von der zu überbrückenden Geschwindigkeitsdifferenz liefert. Die größte Leistung wird für Beschleunigungen bei hoher Geschwindigkeit und großer Differenzgeschwindigkeit verwendet. Kleinere entsprechend für langsame Geschwindigkeiten und kleine Differenzgeschwindigkeiten.

Für den Komfort wird beim Start der Beschleunigungsphase mit einer Rampe linear von der aktuellen Leistung auf die gewünschte Leistung übergegangen. Die Leistung wird unter der Berücksichtigung der aktuellen Fahrwiderstände und der Steigung in eine Beschleunigung umgerechnet und an das ACC gemeldet. Zum Ende der Beschleunigung wird die Beschleunigung und damit auch die Leistung linear reduziert, bis die Endleistung und Beschleunigung null erreicht ist.

Sobald das Beschleunigungsziel erreicht ist, wird in die nächste Phase, die Konstantfahrphase, umgeschaltet.

Konstantfahrphase

Während der Konstantfahrt wird die vorher in der Planung berechnete Abschnittshöchstgeschwindigkeit über die Geschwindigkeitsschnittstelle übermittelt. Die Aktivierungsbedingung ist immer wahr, aber aufgrund der Priorisierung wird diese nur beachtet, wenn keine andere Phase aktivierbar ist.

Segelphase

Bei jeder Energiewandlung treten Verluste auf. Die effizienteste Art diese Verluste zu vermeiden, ist es, Energiewandlungen zu vermeiden oder zu vermindern. Im Fall von Hybridfahrzeugen kann bekanntlicherweise durch Rekuperation kinetische Energie im Batteriesystem gespeichert werden. Diese Option fehlt bei konventionellen Fahrzeugen, sodass das Fahrzeug nur durch die Bremsen und das Schlepptomment des Antriebsstrangs verzögert werden kann. Energie die so durch Reibung in Wärme umgewandelt

wird ist für den Fahrer nicht mehr nutzbar.

Über die Schnittstelle zum ACC kann der Segelzustand provoziert werden. Wird das entsprechende Signal gesendet, vermeidet das ACC jeden positiven Momenteneingriff. Die Motorsteuerung des Versuchsträgers reagiert darauf mit Ausschalten des Motors und Öffnen der Trennkupplung. Das Fahrzeug befindet sich dann im Freilaufzustand und wird nur noch durch die Fahrwiderstände verzögert.

Der richtige Moment, um das Segeln zu beginnen ist der, wenn man den Motor vor der Kurve nicht mehr starten muss. Mit Hilfe einer Matlab-Simulation wird ein Kennfeld generiert, in dem das Ausrollverhalten für verschiedene Steigungen als Geschwindigkeits-Weg-Diagramm abgelegt ist. Die aktuelle Segelreichweite, die antriebslose Ausrollstrecke bis zum Erreichen einer Zielgeschwindigkeit, wird ständig überwacht. Die Zielgeschwindigkeit für den Segelvorgang wird dabei als Parameter festgelegt, der den Anteil der abzusegelnden Geschwindigkeit definiert. Sobald die Entfernung zum Zielpunkt geringer wird als die errechnete Reichweite, wird die Segelphase aktiviert. Sie bleibt aktiv bis die Bremsüberwachung eine Bremsung fordert oder die Zielgeschwindigkeit unterschritten wird. Für letzteres ist ein Notlaufmodus vorgesehen, mit dem bis zum Zielpunkt konstant weitergefahren wird. Die Segelreichweite wird aus dem Kennfeld in Abbildung 8.4 nach Formel 8.1 berechnet.

$$S_{Roll}(v_{Start}, v_{Ziel}, \alpha) = s(v_{Start}, \alpha) - s(v_{Ziel}, \alpha) \quad (8.1)$$

Bremsphase

Die Bremsüberwachung vergleicht jederzeit den Bremsweg mit der Reststrecke bis zum Zielpunkt. Überschreitet der Bremsweg die Distanz zur Kurve, wird die Bremsphase aktiviert.

Die Bremsungen werden mit der aktuellen Beschleunigung und Geschwindigkeit begonnen und enden mit der Beschleunigung $\frac{d^2s}{dt^2} = 0$ bei der Zielgeschwindigkeit. Die mittlere Verzögerung $\overline{\frac{d^2s}{dt^2}} = a_{Brems,soll}$ bestimmt die Endzeit $t_{End} = \frac{v_1 - v_2}{a_{Brems,soll}}$ der Verzögerung. Der Ansatz für den Bremsverlauf muss folglich mindestens vier Parameter haben, um die Randbedingungen sicher erfüllen zu können. Als Ansatz wird hier ein Polynom dritten Grades nach der Zeit (Formel 8.2) verwendet. Dies garantiert einen

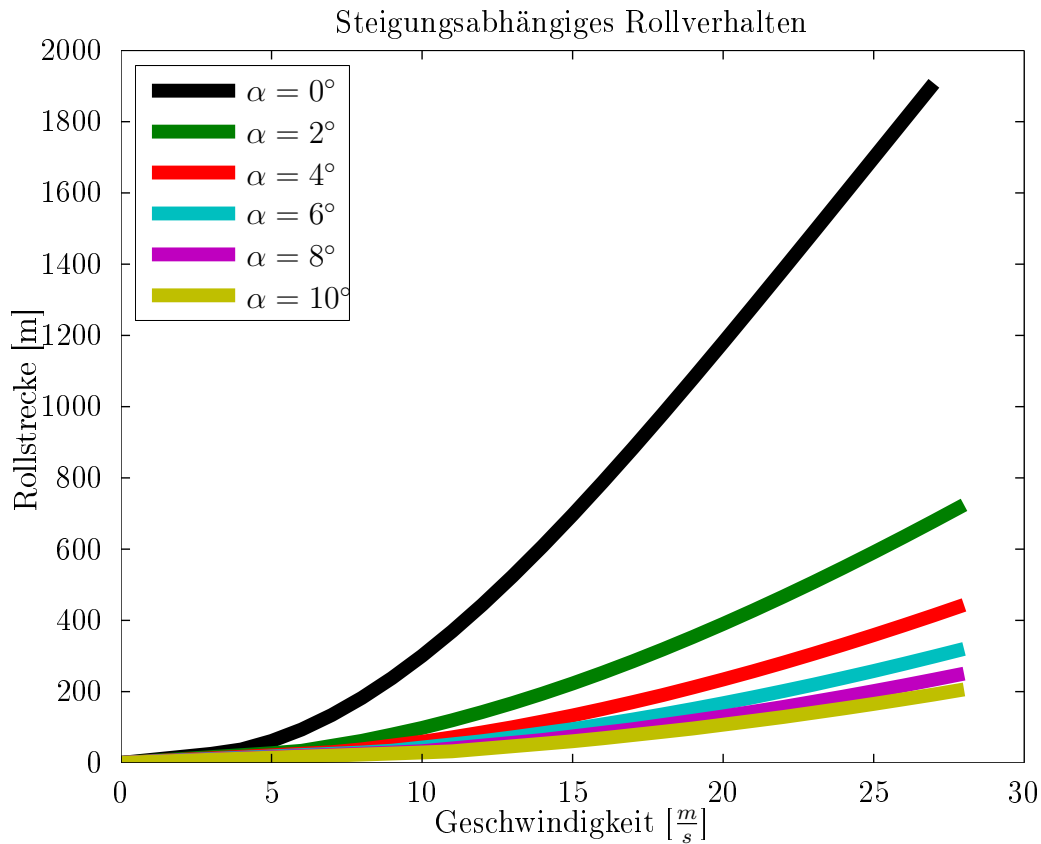


Abbildung 8.4: Die Abbildung zeigt die Rollstrecke in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Steigung.

„knickfreien Anschluss“ der Trajektorienelemente.

$$v(t) = a + b \cdot t + c \cdot t^2 + d \cdot t^3 \quad (8.2)$$

8.5.4 Regler

Wie in den vorhergehenden Ausführungen erleutert wurde, wird in den dynamischen Fahrphasen Bremsen und Beschleunigen ein Beschleunigungssollwert generiert. Das System „Fahrzeug mit ACC“ folgt den Beschleunigungs-Vorgaben in seinen physikalischen Grenzen und durch Fahrbarkeitsfilter in der Motorsteuerung verzögert dem Eingangswert. Weiterhin kann es sein, dass der Vorgabewert vom ACC nicht übernommen wird, wenn ein Element der Minimumsauswahl zur Beschleunigungsbestimmung klei-

ner als die geforderte Beschleunigung ist. Fordert das iACC eine Beschleunigung, während noch ein großer Lenkwinkel vorliegt, wird die geforderte Beschleunigung ignoriert. In diesem Fall kommt es naturgemäß zu Abweichungen von dem vorherberechneten Verlauf.

Der zuvor ermittelte Beschleunigungssollwert hängt bereits vom Fahrzustand ab, sodass sich im Prinzip eine Regelung ergibt. Dennoch wird der ermittelte Sollbeschleunigungswert als Vorsteuerwert verwendet. Lediglich die Abweichungen der Istbeschleunigung von der Sollbeschleunigung werden mit einem leichten Proportionalregelanteil beaufschlagt, um die nicht modellierten Zeitverzögerungen in der Wirkkette kompensieren zu können.

Da das ACC-Steuergerät die Beschleunigung im System Auto einregelt und die iACC mit Beschleunigungswerten die Fahrzeuggeschwindigkeit regelt, kann hier von einer Kaskadenregelung gesprochen werden.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde das Ziel verfolgt, die Längssteuerung eines Hybridfahrzeugs zu automatisieren. Dabei sollte die automatisierte Lösung zuverlässig und effizient das Fahrzeug über die Strecke führen. Mit Hilfe der Dynamischen Programmierung nach Bellmann wurde die global optimale Fahrstrategie für ein vereinfachtes Hybridfahrzeug für einen circa acht Kilometer langen realen Testkurs um Abstatt gefunden. Auch wenn die gefundene Formulierung der Optimierung nicht auf heutigen Steuergeräten lauffähig ist und die Berechnung so nur in Matlab durchgeführt werden konnte, konnte aus den Optimierungsergebnissen generell günstiges Verhalten für KFZ abgeleitet werden, das im Softwareentwurf der Längssteuerung als Leitkonzept diente. Bei Entwurf und Implementierung der Intelligent Adaptive Cruise Control wurde bewusst eine Software für Demonstrationensfahrten erstellt, bei der viel Wert auf ein komfortables und reproduzierbares Fahrerlebnis gelegt wurde. Dennoch erscheint es realistisch, dass die Längsführung von Fahrzeugen mittels iterativ ermittelter Optimalsteuerungs-Strategien durchgeführt werden können, sodass dann für viele Fahrzeuge eine Verbrauchsreduzierung erzielt werden kann. Die Berechnungen müssen nicht zwangsläufig im Fahrzeug geschehen, sondern könnten als Dienst in der Cloud gerechnet werden und über Internet zum Ergebnisaustausch freigegeben werden. In der Einleitung wurde die Diskrepanz zwischen Norm- und Realverbrauch bemängelt. Durch ein solches Angebot der Fahrstrategieoptimierung könnten die Automobilzulieferer ihren Kunden einen großen Mehrwert bieten, und ihren Flottenverbrauch senken.

Literaturverzeichnis

[Bellmann, 1957] Bellmann, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press.

[BoschEngineeringGmbH, 2013] BoschEngineeringGmbH (2013). internes dokument. BEG.

[Eckstein, 2010] Eckstein, P.-I. L. (2010). *Unkonventionelle Fahrzeugantriebe*. Schriftenreihe Automobiltechnik. Eckstein, Univ.-Prof.Dr.-Ing. Lutz.

[Europäische Union, 2008] Europäische Union (2008). Mitteilung über die anwendung und die künftige entwicklung der gemeinschaftlichen rechtsvorschriften über emissionen von fahrzeugen für den leichtverkehr und über den zugang zu reparatur- und wartungsinformationen (euro 5 und euro 6).

[LEDERER et al., 2012] LEDERER, D., WAHL, H.-G., WEBERBAUER, D., and MARKSCHLÄGER, P. (2012). Assistenzsystem für mehr kraftstoffeffizienz. *ATZ*, 11(11):850–855.

[Lenz, 2013] Lenz, B. (2013). Akku-abc. <http://www.aku-abc.de/aku-lebensdauer.php>.

[Murphy, 1999] Murphy, K. (1999). Bayesian map learning in dynamic environments. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, volume 12, pages 1015–1021. MIT Press (2000).

[PorscheAG, 2011] PorscheAG (2011). Acc innodrive. <http://www.porsche.com/germany/aboutporsche/responsibility/environment/technology/accinnodrive>

- [Radke, 2013] Radke, T. (2013). *Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien*. PhD thesis, Fakultät für Maschinenbau Karlsruher Institut für Technologie.
- [Schimmelpfennig, 1985] Schimmelpfennig, Karl-Heinz und Nackenhorst, U. (1985). Bedeutung der querbeschleunigung in der verkehrsunfallrekonstruktion. In *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, pages 94–96, Deutschland.
- [Sundstrom and Guzzella, 2009] Sundstrom, O. and Guzzella, L. (2009). A generic dynamic programming matlab function. In *In Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Control Applications*, pages 1625–1630, Saint Petersburg.
- [Wikipedia, 2013] Wikipedia (2013). Tempomat. <http://de.wikipedia.org/wiki/Tempomat>.
- [www.autoblog.com, 2011] www.autoblog.com (2011). 2014 porsche acc innodrive tested... hello, big brother? <http://www.autoblog.com/2011/06/28/2014-porsche-acc-innodrive-tested-hello-big-brother/>.
-