

FAKT 20++
Forschungsumgebung für
Automobile Konzepte 20++

Bericht 133110

Institut für Kraftfahrzeuge

Abschlussbericht
FAKT 20++
Forschungsumgebung für Automobile Konzepte 20++

Projektnummer

133110

Auftraggeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Projektleiter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein

Dipl.-Ing. Micha Lesemann

Projektingenieure:

Dipl.-Ing. (FH) M.Sc. Martin Henne

Dipl.-Ing. Alexander Tenbrock

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced and/or published without the previous written consent of ika. © ika

Aachen, März 2017

Institutsleitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. L. Eckstein

Telefon: +49 241 80 25601 · Fax: +49 241 80 22147

E-Mail: office@ika.rwth-aachen.de · Internet: <http://www.ika.rwth-aachen.de>

Institut für Kraftfahrzeuge · RWTH Aachen University · Steinbachstraße 7 · 52074 Aachen

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Forschungshypothesen und Bewertungskonzept.....	6
2.1	Szenario 1: Unterstützendes Längs- und Querführungssystem auf Basis einer Magnetfeldanalogie.....	7
2.2	Szenario 2: Übernahme der Fahraufgabe nach vollautomatisierter Fahrt bei Erreichen einer Systemgrenze (nicht zeitkritisch).....	9
3	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	12
3.1	Definition, Beschaffung, Aufbau und Inbetriebnahme des Fahrsimulators	12
3.1.1	Beschaffung, Aufbau und Inbetriebnahme.....	16
3.2	Motion Cueing-Algorithmus.....	18
3.2.1	Klassischer Washout.....	18
3.2.2	„Optimal Control“-Algorithmus	19
3.2.3	„Adaptive Control“-Algorithmus („Coordinated Adaptive“).....	20
3.2.4	Gewählter Motion Cueing-Algorithmus	20
3.3	Fahrdynamikmodell	23
3.4	Interaktionsmodelle mit Blick auf das automatisierte Fahren.....	27
3.4.1	Grundlagen	27
3.4.2	Wirkungsmöglichkeiten	30
	Aktives Gas- und Bremspedal	30
	Beschleunigungsreduktion.....	31
	Lenkwinkelüberlagerung	31
	Bedienung durch den Fahrzeugführer	31
3.4.3	Visuelle Darstellung des Systemzustandes	33
	CGI Studio.....	34
	Drive Studio (UI Composer).....	34
	Blender	34
	Umsetzung	34
3.4.4	Eingriffsentscheidung	35
	Systemstufe.....	35
	Time to Collision	36
	Lenkwinkel.....	36

Blinkerzustand	37
Fahstreifenbelegung	37
3.4.5 Schnittstellen mit dem Fahrzeug und der Simulationsumgebung	37
3.4.6 Längsregelung	39
Systemaufbau und Datenfluss	39
Protokolldefinition in der OSI-Anwendungsschicht	40
Erweiterung um Gewichtung der Relativgeschwindigkeit	43
Situationsbezogene Variation der Regelparameter	43
Freie Fahrt	47
Heranfahren (Anrobber)	48
Schnelle Annäherung bei niedriger Geschwindigkeit	49
Schnelle Annäherung im hohen Geschwindigkeitsbereich	49
Überholwunsch	50
Einscheren	50
Zurückfallen	51
Anhalten	51
Stillstand	52
Anfahren	52
Folgefahrt	53
Nachgelagerte Filterkette	54
Ruckbegrenzung	54
Saturierung der Beschleunigung	54
Kurzzeitiger Verlust des Radarziels	54
Anhaltebeschleunigung	55
Eintauchgrenze	55
Lenkradwinkel-Beschleunigungsbegrenzung	55
Lenkradwinkel-Anfahrerschutz	55
Maximale Querschleunigung	56
4 Zusammenfassung	57
5 Literatur	58

1 Einleitung

Trotz einer deutlichen Verringerung der Anzahl tödlicher Unfälle im Verlaufe der vergangenen 10 Jahre kamen im Zeitraum vom September 2012 bis August 2013 immer noch rund 3.300 Menschen allein in Deutschland ums Leben [STA13].

Außerdem ist die Personentransportleistung im gleichen Zeitraum stetig angestiegen, wobei der Hauptanteil durch den motorisierten Individualverkehr geleistet wird [ECK09]. Aus der damit einhergehenden Steigerung der Verkehrsdichte resultieren eine wachsende Komplexität der Fahraufgabe sowie anspruchsvolle als auch belastende Fahrsituationen. Hierzu zählen z.B. hoch frequentierte Verkehrskreuzungen im Innenstadtbereich oder stockender Verkehr auf der Autobahn. Solche Situationen verursachen insbesondere eine starke kognitive Beanspruchung des Fahrers.

Neben der kontinuierlichen Steigerung der passiven Sicherheit werden künftig in vermehrtem Umfang auch Fahrerassistenzsysteme zur aktiven Unfallvermeidung beitragen, indem diese durch Warnung und Information, aber auch durch automatisierte Eingriffe unterstützen. Gemäß den Ebenen der Fahraufgabe kann der Fahrer bei der Fahrzeugführung hinsichtlich der Navigation, Bahnführung und Fahrzeugstabilisierung durch unterschiedliche Assistenzsysteme entlastet werden [ECK10]. Moderne Assistenzsysteme (auch als ADAS - Advanced Driver Assistance Systems bezeichnet) verstehen sich als Teil des geschlossenen Regelkreises Fahrer-Fahrzeug-Umfeld. Ihre Realisierung wurde mit dem Fortschritt der Mikroelektronik in den vergangenen 20 Jahren ermöglicht. Insbesondere im Bereich der Umfelderkennung sind große Fortschritte zu verzeichnen.

Das Potenzial dieser Fahrerassistenzsysteme ist u.a. aufgrund der geringen Integration derzeit jedoch noch nicht annähernd ausgeschöpft. Darüber hinaus sind die Akzeptanz der vielfältigen und oft ungewohnten Unterstützungsfunktionen noch nicht auf dem Niveau, das für eine hohe Marktdurchdringung und der damit verbundenen Steigerung der Sicherheit und Effizienz im Straßenverkehr erforderlich ist.

So ist es heute technisch möglich, das Umfeld zu erkennen, Sollgrößen zur Längs- und Querregelung zu errechnen und diese Sollgrößen durch elektrische Aktoren so zu stellen, dass eine vollständig automatisierte Fahrzeugführung grundsätzlich möglich ist. Durch eine Automatisierung der Fahrzeugführung ändert sich auch die Rolle des Fahrers im Regelkreis. Ähnlich wie in der Luftfahrt wird der Fahrer als aktives Element aus dem Regelkreis herausgenommen. Neben der Entlastung des Fahrers kann daraus weiterer Anwendernutzen entstehen, wenn der Fahrer während des automatisierten Betriebs Nebentätigkeiten (z.B. Kommunikation, Information) ausführen kann. Hieraus ergeben sich Fragestellungen, die bislang nur unzureichend untersucht sind.

Die aus Wirksamkeitsgründen notwendige, höhere Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen und Fahrdynamiksystemen erhöht den Absicherungsaufwand, der zur Sicherstellung von Wirksamkeit und Betriebs- bzw. Bediensicherheit erfolgen muss. Innerhalb des Projekts

FAKT 20++ sollen daher die Grundlagen für die zukunftsorientierte Forschung für das Zusammenwirken von Fahrer und Fahrzeug im Bereich hochdynamischer Fahrsituationen sowie die Erforschung der durch hochautomatisierte Systeme erheblich veränderten Mobilität im Jahr 2030 geschaffen werden.

2 Forschungshypothesen und Bewertungskonzept

Derzeit schon in Fahrzeugen integrierte oder noch in der Entwicklung befindliche Assistenzsysteme können verschiedenen Zielen dienen. Systeme zur Erhöhung der Verkehrseffizienz oder der Reduktion der Umweltbelastung zielen primär auf makroskopische Zusammenhänge ab. Rein auf den Fahrer des eigenen Fahrzeugs ausgerichtet sind dagegen Systeme zur Erhöhung des Fahrkomforts, während Systeme zur Erhöhung der Sicherheit in vielen Fällen auch den anderen Verkehrsteilnehmern Vorteile bieten.

Abgesehen von Navigationssystemen arbeiten die meisten Systeme auf der Ebene der Stabilisierung oder der Bahnführung. Bei den erstgenannten besteht die Aufgabe darin, die durch die Stellungen des Lenkrades und der Pedale festgelegten Sollwerte für Beschleunigung und Kurvenradius tatsächlich in der jeweiligen Fahrsituation umzusetzen. Unter der Bahnführungsebene dagegen versteht man die Wahl geeigneter Sollwerte, um einen sicheren und effizienten Kurs entlang der Straße unter Berücksichtigung des Umgebungsverkehrs zu verfolgen.

Umgesetzt werden können dabei unterschiedliche Arten der Unterstützung für den Fahrer. Rein informierende Systeme stellen dem Fahrer wichtige Informationen über den aktuellen Fahrzustand oder die Verkehrssituation zur Verfügung. Warnende Systeme erkennen kritische Situationen und machen den Fahrer auf drohende Gefahren aufmerksam, wobei dazu etwa optische, akustische, haptische oder vestibuläre Reize ausgelöst werden können, durch die der Fahrer zu einer angemessenen Reaktion gebracht werden soll. Darüber hinaus gehen schließlich die intervenierenden Systeme, die über entsprechende Aktoren aktiv in das Fahrgeschehen eingreifen.

Durch diese Eingriffe können Assistenzsysteme mit einem variierenden Grad von Automatisierung umgesetzt werden. Deren Grenzen können einerseits durch die Freiheitsgrade der Fahraufgabe bestimmt sein, wenn die Unterstützung wie bei einem Abstandsregeltempomat (auch ACC - Adaptive Cruise Control) rein longitudinal oder, etwa im Falle eines Spurhaltesystems, rein lateral erfolgt. Andererseits kann die Automatisierung auch beschränkt sein auf bestimmte Fahrsituationen, wie die automatische Fahrzeugführung bei geringen Geschwindigkeiten im Stau.

Bei der Bewertung der Interaktion des Fahrers mit dem Fahrzeug bzw. mit einem teilweise oder vollständig automatisierten Assistenzsystem sind mehrere Aspekte zu betrachten:

- Verständnis von Funktion und Bedienung: Verständnis des Bedienkonzeptes und der vom System übermittelten Informationen und Warnungen
- Effizienz: Wie groß ist der Aufwand, um die gewünschte Funktion zu aktivieren/deaktivieren und wie schnell werden Informationen und Warnungen in ihrer Bedeutung erfasst?

- Fehlertoleranz: Wie gehen der Fahrer und das System mit Fehlbedienung oder Fehlfunktionen um? Welche Folge hat ein Systemausfall?
- Erwartungskonformität: Entsprechen die zur Umsetzung eines Bedienschrittes erforderlichen Aktionen den Erwartungen des Fahrers?
- Akzeptanz: Erlebt der Fahrer das System und die Interaktion mit dem System als positiv und erkennt für sich einen Vorteil bei dessen Nutzung?
- Kontrollierbarkeit und Sicherheit: Während des unterstützten Fahrens sowie unmittelbar vor und nach der vollautomatisierten Fahrt muss der Fahrer das Fahrzeug sicher kontrollieren. Insbesondere Übergabeszenarien wie z.B. die Rückholung des Fahrers in den Regelkreis nach vollautomatisierter Fahrt sind hier zu betrachten.

All diesen Aspekten, die zum Teil auch die Systemfunktion selbst berühren, muss sowohl für teilautomatisierte als auch für vollautomatisierte Systeme Rechnung getragen werden. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der auf Messdaten basierenden Bewertung und der Bewertung anhand von Probandenbefragungen.

Weiterhin ist für die Bewertung nicht nur die Betrachtung der Mensch-Maschine-Interaktion selbst, sondern auch des sich daraus ergebenden Fahrverhaltens hinsichtlich zu entwickelnder Gütekriterien wie z.B. Lenkverhalten, Spurhaltung und Bremsverhalten maßgeblich.

Da Versuche mit entsprechenden hochautomatisierten Assistenzsystemen in der Regel mit einem Risiko für Fahrer und Umwelt verbunden sind, ist für frühe Entwicklungsschritte der Fahrsimulator als Werkzeug unentbehrlich. Da das Vertrauen in ein automatisiert fahrendes Fahrzeug stark von der Harmonie bezüglich dessen längs- und querdynamischen Verhalten abhängt und der Fahrer diese primär anhand auftretender Beschleunigungen wahrnimmt, ist die Darstellung einer unskalierten Bewegung ebenso unverzichtbar. Hinzu kommt, dass z.B. der Bremsruck als Information bzw. Warnung an den Fahrer heute bereits realisiert wird. Dieser erfordert einen hochdynamischen Fahrsimulator, da herkömmliche niedrigdynamische Systeme im Bereich bis 5 m/s^2 arbeiten, was hierfür nicht ausreichen würde.

In einem ersten Testszenario sollen die Situation bei der Wiederübernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer nach vollautomatisierter Fahrt sowie ein kombinierter Abstands- und Spurhalteassistent auf Basis der Analogie eines Magnetfeldes bewertet werden.

2.1 Szenario 1: Unterstützendes Längs- und Querführungssystem auf Basis einer Magnetfeldanalogie

In diesem Szenario wird das teilautomatisierte Fahren anhand eines längs- und querdynamischen Assistenten untersucht, der dem Fahrer den Eindruck eines Magnetfeldes vermitteln soll. Die folgenden Forschungsfragen werden gestellt:

1. Welche Einflussfaktoren müssen berücksichtigt werden, um den erkennbaren Eindruck eines Magnetfeldes zu vermitteln?
2. Steigert die Analogie eines Magnetfeldes das intuitive Verständnis der Wirkungsweise des Assistenzsystems?
3. Inwiefern schlägt sich die Erklärung der Längs- und Querführungsunterstützung durch eine gemeinsame Metapher auf die Qualität der Fahrzeugführung und die Eindrücke des Fahrers nieder?
4. Wie muss das Ausmaß der Unterstützung durch das System gewählt werden, um den Zielkonflikt zwischen hoher Sicherheit durch frühe Eingriffe einerseits und möglichst wenig Bevormundung des Fahrers andererseits bestmöglich aufzulösen?
5. Wie müssen die Systemeingriffe in das Fahrverhalten sowie die Rückmeldungen bei solchen Eingriffen über die primären Bedienelemente an den Fahrer gestaltet werden, um eine Erfüllung der oben genannten Bewertungsaspekte sicherzustellen?
6. Können das Verständnis und die Akzeptanz des Systems durch das gezielte Ansprechen weiterer Sinneskanäle des Fahrers, etwa durch optische oder vestibuläre Reize, weiter gesteigert werden?

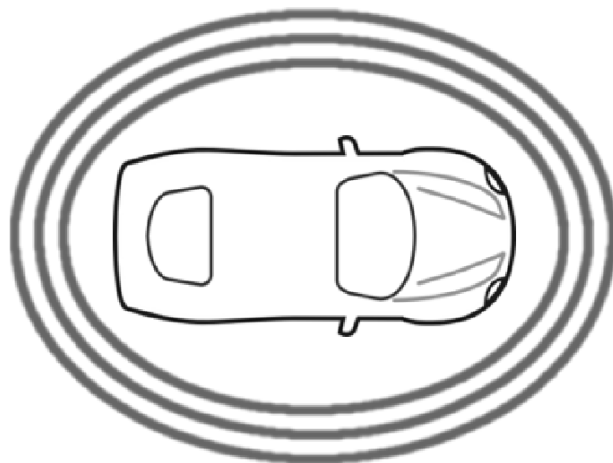


Abb. 2-1: Prinzipdarstellung des virtuellen magnetischen Feldes

Abb. 2-1 zeigt schematisiert die Darstellung eines magnetischen Feldes, welches abstoßende Kräfte bei Annäherung an potentielle Kollisionsobjekte erzeugen würde.

Bei der Entwicklung eines Assistenzsystems auf Basis der Analogie eines Magnetfeldes ist zunächst zu klären, welche Bedingungen erfüllt werden müssen, damit der Fahrer diese Analogie als kompatibel zu seinen Eindrücken von der Unterstützung empfindet.

Davon ausgehend kann untersucht werden, wie weit diese Analogie dazu beitragen kann, dem

Fahrer sowohl die Anlässe als auch das jeweilige Ausmaß der Eingriffe des Systems verständlich zu machen. Ein besonderer Aspekt stellt hierbei die Kombination der Längs- und Querunterstützung dar, die ebenfalls durch die Metapher des Magnetismus erklärt wird.

Im Zuge der Umsetzung des Systems muss geklärt werden, wie genau die Eingriffe umgesetzt werden sollten. Denkbar ist eine direkte Manipulation der Stellgrößen des Fahrzeugs durch eine Lenkwinkelüberlagerung und Erhöhung des Bremsdrucks, ebenfalls möglich wäre allerdings das Aufbringen eines Zusatzmomentes am Lenkrad oder von Zusatzkräften an den Pedalen.

Bei der Entwicklung eines unterstützenden Assistenzsystems taucht im Gegensatz zu einem vollautomatisierten System ein Zielkonflikt auf: möglichst frühe Eingriffe in das Fahrverhalten führen in vielen Situationen zwar zu einer Erhöhung der Sicherheit, auf der anderen Seite wird dem Fahrer dadurch nur ein geringerer Freiraum gewährt. Dieser könnte die Auswirkungen des Systems dann als störend empfinden. Daher muss untersucht werden, wie das System parametrisiert werden muss, um die Akzeptanz durch den Fahrer sicherzustellen.

In Situationen, in denen das System aktiv eingreift, muss dem Fahrer eine entsprechende Rückmeldung übermittelt werden. Dies kann einerseits über das Lenkrad und die Pedale als primären Bedienelemente erfolgen, es muss aber auch untersucht werden, inwiefern neben grafischen Darstellungen die Beschleunigungen des Fahrzeugs selbst als Reaktion auf Systemeingriffe als Informationskanal für den Fahrer dienen kann.

2.2 Szenario 2: Übernahme der Fahraufgabe nach vollautomatisierter Fahrt bei Erreichen einer Systemgrenze (nicht zeitkritisch)

Das hier adressierte Szenario untersucht die Wiederübernahme der Fahraufgabe, nachdem der Fahrer diese für einen längeren Zeitraum an ein vollautomatisiertes Längs- und Querführungssystem abgegeben hat. Zu diesem Zeitpunkt ist davon auszugehen (und durch das Versuchsdesign sicherzustellen), dass sich der Fahrer einer Nebenaufgabe widmet, die seine volle Aufmerksamkeit erfordert.

Es ist anzunehmen, dass Zeitpunkt und Art der Übernahmeaufforderung vor der erfolgreichen Übernahme ebenso einen Einfluss auf die Übernahmequalität haben, wie die Dauer der automatisierten Fahrt. Abb. 2-2 stellt ein Modell für den Übernahmevorgang nach einer Aufforderung durch ein informierendes Signal dar.

Hier wird der Prozess von der Wahrnehmung des Signals bis zur Übernahme anhand definierter Zeitpunkte beschrieben, deren direkte sensorische Messung möglich ist.

Es ergeben sich hier die folgenden Forschungsfragen:

1. Wann muss der Fahrer auf die bevorstehende Wiederübernahme hingewiesen werden, damit die Übernahme sicher gelingt?

2. Auf welche Weise sollte der Hinweis auf die bevorstehende Wiederübernahme erfolgen, damit die Qualität der Übernahme und die Akzeptanz durch den Fahrer optimal wird?
3. Anhand welcher objektiver und subjektiver Kriterien kann die Qualität der Wiederübernahme der Fahraufgabe bestimmt werden?
4. Gibt es hinsichtlich der vorstehenden Fragen Unterschiede bezüglich persönlicher Merkmale der Probanden (Alter, Geschlecht, Fahrerfahrung)?
5. Hängt die Qualität der Wiederübernahme von der Dauer der automatisierten Fahrt ab?
6. Wie wirken sich auftretende Systemfehler zum einen auf das Fahrerverhalten und zum anderen auf die Akzeptanz aus?

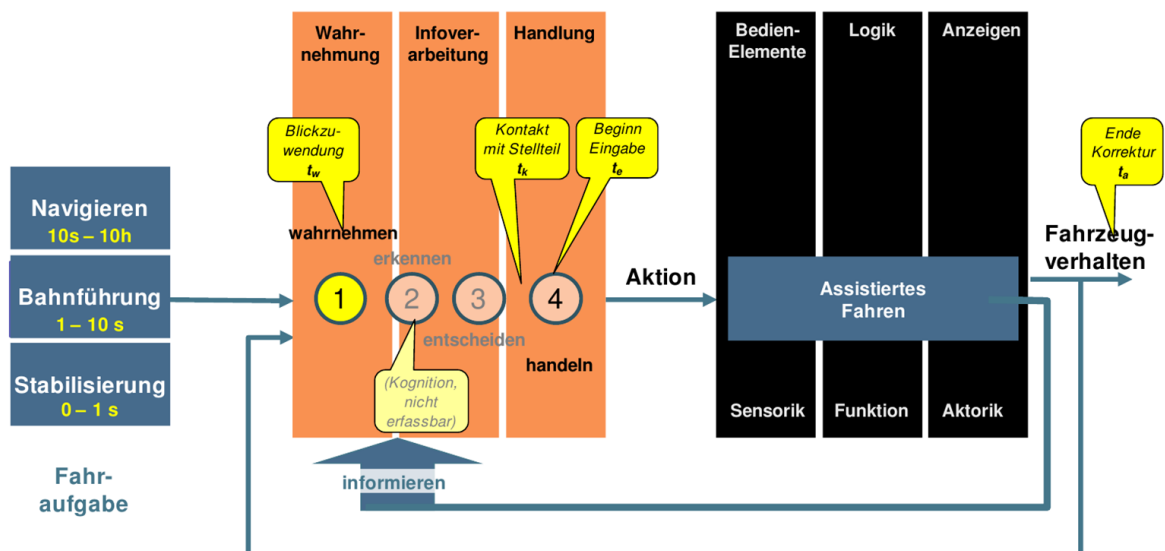


Abb. 2-2: Modell für den Prozess der Übernahme der Fahraufgabe [HEN12]

Im Rahmen des Verbundprojektes Ko-FAS wurden Untersuchungen zum optimalen Warnzeitpunkt bezüglich bevorstehender Kollisionen untersucht. Hierbei wurden optische Informationen in einem Head-up-Display (HUD) dargeboten. Im Ergebnis wurde eine Vorwarnzeit von mindestens einer, im besten Fall zwei bis drei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt empfohlen [NAU12]. Für die vollautomatisierte Fahrt kann das HUD nicht genutzt werden, da keine Veranlassung für den Fahrer besteht, das HUD zu beobachten. Somit müssen zunächst geeignete Modalitäten entwickelt werden.

Neben den bereits heute weit überwiegend eingesetzten optischen und akustischen Hinweisen stehen hier primär haptische Reize im Vordergrund. Während ein optisches Signal leicht übersehen und ein Ton ggf. durch eine laute Umgebung (Musik, Gespräche anderer Insassen usw.) überhört werden können, bleibt z.B. das vestibuläre System, das für die

Beschleunigungswahrnehmung verantwortlich ist, gegenüber solchen Einflüssen unempfindlich.

Für die Bewertung der erfolgreichen oder nicht erfolgreichen Übernahme der Fahraufgabe bieten sich objektiv messbare Größen an:

- Frequenz und Amplitude der Lenkwinkelschwingung nach Übernahme
- Verlauf des Gierwinkels im Vergleich zur Fahrbahntangente (Gierwinkelfehler)
- Längsbeschleunigungsdynamik (z.B. evtl. ruckartiges Bremsen, zu geringer Abstand, unangemessen niedrige oder hohe Geschwindigkeit)
- Fehler in der Bahnführung (Fahrzeug verlässt den eigenen Fahrstreifen u.a.)

Für bestimmte Fahrsituationen kommen darüber hinaus weitere Kriterien wie z.B. die Reaktionszeit (bei kritischer Übernahme) dazu. Neben der Bewertung anhand dieser Größen soll die Einschätzung der Probanden bezüglich ihrer Übernahme anhand von Befragungen ermittelt werden. Konkrete Fragen werden nach Fertigstellung geeigneter Testszenarien erfolgen, die ihrerseits nach der Entwicklung des vollautomatisierten Systems und der entsprechenden Mensch-Maschinen-Schnittstellen (auch HMI – Human-Machine-Interface) erfolgen wird.

3 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Das Vorhaben FAKT 20++ hat zwei wesentliche wissenschaftlich-technische Ziele: die Zurverfügungstellung einer geeigneten Simulationsumgebung für die Untersuchung von Fragestellungen zukünftiger Fahrzeugführung, oder allgemeiner der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, sowie die Erforschung von zwei Ansätzen zukünftiger Assistenzsysteme.

Für die simulierte Darstellung des Fahrens gilt es, einen hochdynamischen Fahrsimulator bezüglich seiner Anforderungen zu definieren, zu beschaffen und in Betrieb zu nehmen. Aus wissenschaftlicher Sicht ist es dafür erforderlich, einen geeigneten Motion Cueing-Algorithmus als wesentliche Software auszuwählen, die aus der gewünschten Bewegungsdarstellung die Stellgrößen für den Prüfstand erzeugt. Ferner muss ein Fahrdynamikmodell eingesetzt werden, das das Fahrzeugverhalten optimal abbildet und der Simulation zur Verfügung stellt.

3.1 Definition, Beschaffung, Aufbau und Inbetriebnahme des Fahrsimulators

Ausgehend von der geplanten Verwendung des Simulators als Werkzeug zur Bewertung der Interaktion zwischen Mensch und Maschine in Verbindung mit Fahrerassistenzsystemen wurden Kriterien entwickelt, die sicherstellen, dass der zu beschaffende Simulator entsprechend genutzt werden kann.

Im Kern geht es darum, die auf den Fahrer im realen Fahrzeug einwirkenden Beschleunigung und die daraus resultierenden Kräfte technisch zunächst quantitativ nachbilden zu können. Dies gilt sowohl für üblicherweise auftretende Fahrsituationen, als auch für besondere Aspekte wie z.B. die Verwendung eines Bremsrucks als Warnsignal.

Bezüglich des erforderlichen Kräfteverlaufs über die drei Raumachsen und die Koordinierung mit dem simulierten Fahrgeschehen werden im weiteren Projektverlauf Algorithmen zur Ansteuerung der Stellmotoren des Bewegungssystems entwickelt.

Um die Validität der Fahrdynamik bewerten zu können, ist ein Vergleich mit real auftretenden Beschleunigungen bei reproduzierbaren Manövern erforderlich. Zunächst sollen die Maximalwerte der dazustellenden Bewegungskennzahlen ermittelt werden. Hierzu werden in einem ersten Schritt die Messdaten aus entsprechenden Fahrversuchen ausgewertet, aus denen die wesentlichen kinematischen Eckdaten entnommen wurden.

Im Einzelnen wurden die Messdaten folgender Fahrversuche herangezogen:

- ISO-Spurwechsel
- VDA-Spurwechsel (ISO 3888-2)
- Slalomfahrt (Pylonenabstand 18 m)
- Lenkwinkelsinus
- Lenkwinkelsprung

Diese Fahrtests stellen typische Manöver zur Bewertung des dynamischen Verhaltens von

Kraftfahrzeugen dar, bei denen bestimmte Kräfte bzw. Beschleunigungen ihre jeweiligen Maxima erreichen. Diese Werte dienen zunächst der Spezifikation des Bewegungssystems. Später stellen sie die Grundlage für die Bewertung der Bewegungsalgorithmen dar.

Aufgrund existierender Konzepte zur Bewegungsumsetzung lassen sich daraus die Anforderungen für einzelne technische Komponenten ableiten. Maßgeblich sind hierbei die translatorischen und rotatorischen Beschleunigungen sowie kurzzeitig erreichte Geschwindigkeiten (vgl. Abb. 3-3).

Der derzeit leistungsfähige Fahrsimulator im europäischen Raum wurde in Stuttgart von der Daimler AG in Betrieb genommen und stellt bezüglich der technischen Daten die obere Grenze dessen dar, was derzeit realisiert werden kann. Leider steht er nicht für öffentliche Forschungsaufgaben außerhalb des Konzerns zur Verfügung.

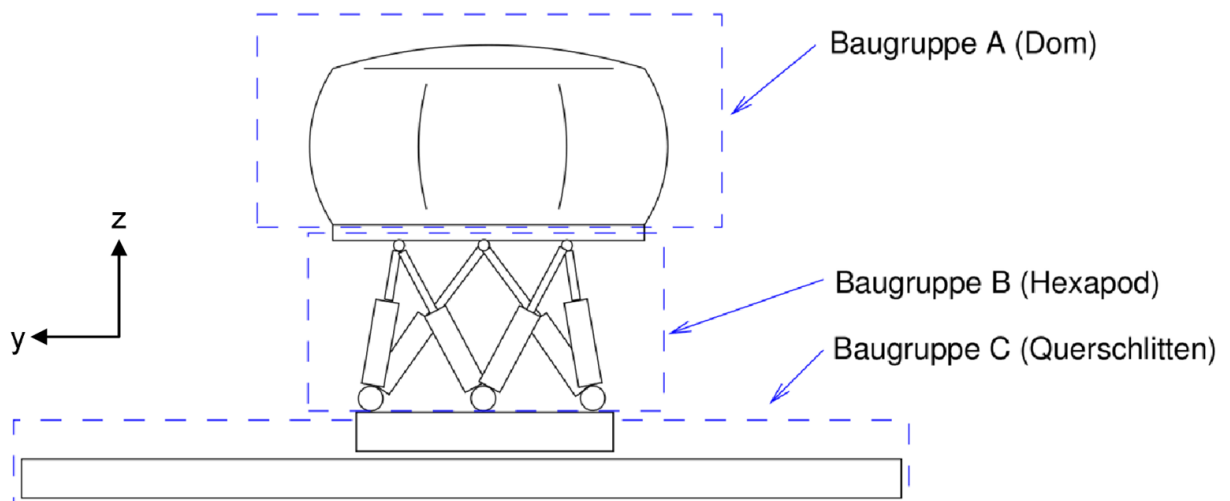


Abb. 3-1: Prinzipbild des erforderlichen Simulators

Der Daimler-Simulator hat eine lange Entstehungsgeschichte, in deren Verlauf unterschiedliche Konzepte für die Umsetzung der Bewegung erwogen, evaluiert und wieder verworfen wurden. Durchgesetzt hat sich letztlich das aktuelle Konzept eines Hexapoden, der auf einem Schlitten in die Fahrzeug-Querrichtung zusätzlich bewegt werden kann (vgl. Abb. 3-1).

In Abb. 3-2 ist die Koordinatendefinition beim Kraftfahrzeug nach DIN 70000 dargestellt. Alle Angaben, die sich auf die räumlichen Achsen beziehen, folgen dieser Konvention.

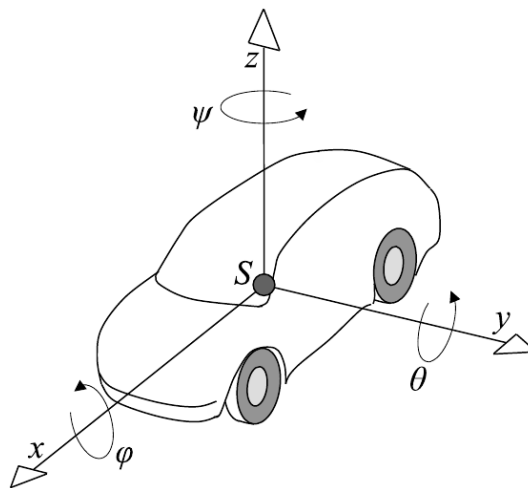


Abb. 3-2: Definition des Koordinatensystems beim Kraftfahrzeug nach DIN 70000

Wie in Abb. 3-3 zu erkennen ist, treten über die verschiedenen Fahrmanöver hinweg die höchsten Beschleunigungen entlang der y-Achse (\ddot{y}) auf und liegen um den Faktor zwei bis vier über den Beschleunigungen in Längsrichtung und entlang der Hochachse. Darüber hinaus unterliegen die Lastwechsel in Querrichtung einer deutlich höheren Dynamik, da sich Lenkbewegungen bezüglich der auf den Fahrer einwirkenden Kräfte bei üblichen Fahrsituationen direkter und schneller auswirken, als Brems- oder Beschleunigungsmanöver. Das unterstreicht die sich ergebenden höheren Anforderungen an die entsprechende Bewegungsdarstellung im Simulator, die letztlich das Erfordernis eines zusätzlichen Freiheitsgrades des Bewegungssystems in Fahrzeug-Querrichtung begründet.

	$\dot{y}_{\text{lokal}}(a_y)$	$\dot{z}(a_z)$	$\dot{x}(a_x)$	$\ddot{y}(a_y)$	$\ddot{z}(a_z)$
	[m/s]	[m/s]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]
ISO-Spurwechsel	0,33	-	4,79	8,5	2,79
VDA-Spurwechsel	0,63	-	0,92	7,44	1,95
Slalomfahrt	0,8	0,71	2,49	8,88	2,55

	$\dot{\phi}$	$\dot{\theta}$	$\dot{\psi}$	$\ddot{\psi}$
	[°/s]	[°/s]	[°/s]	[°/s ²]
ISO-Spurwechsel	30,63	6,24	36,54	211,96
VDA-Spurwechsel	23,73	4,85	32,6	166,09
Slalomfahrt	34,45	7,92	37,32	187,10
Lenkwinkelsprung	-	-	12,22	105,00

Abb. 3-3: Typische Maxima für Messwerte ausgewählter Fahrtests

Unter Berücksichtigung von selten auftretenden Spitzenwerten und den rechnerischen

Möglichkeiten ergeben sich folgende wesentlichen Anforderungen:

- Translatorische Beschleunigung des Hexapoden
- Translatorische Geschwindigkeit des Hexapoden
- Translatorische Geschwindigkeit des Querschlittens
- Rotatorische Geschwindigkeit des Hexapoden

Werden die erforderlichen Werten erreicht, so ergeben sich für die übrigen rotatorischen Werte durch die erforderliche Geometrie des Hexapoden und der Aktoren bereits Drehraten und -beschleunigungen, die eine Darstellung der o.a. Fahrmanöver ermöglichen bzw. deren Anforderungen übertreffen.

Um sicherzustellen, dass das Übertragungsverhalten des Fahrversuches „Lenkwinkelsinus“ abgebildet werden kann, wird für das Übertragungsverhalten des gesamten Bewegungssystems eine Eckfrequenz von über 10 Hz gefordert. Weiterhin muss der Phasenverzug zwischen Soll- und Istwert der Querschleunigung bei harmonischer Anregung mit 2 Hz bei einer Amplitude von 4 m/s^2 unter 8° betragen.

Neben den Anforderungen an das Bewegungssystem, die sich aus den Fahrttests ergeben, müssen noch weitere technische Komponenten spezifiziert werden. Insbesondere der Simulatordom und das Projektionssystem haben großen Einfluss auf die späteren Einsatzbereiche des Simulators und das Realitätsempfinden der Probanden.

Für den Dom wird festgelegt, dass aktuelle Oberklassefahrzeuge und SUVs in ihrer vollen Größe darin Platz finden sollen. Für den Raum, den das Mockup einnehmen kann, ergibt sich daher eine Box von $5,2 \text{ m} \times 2,0 \text{ m} \times 1,9 \text{ m}$. Dabei wird aus Gründen der Wirtschaftlichkeit akzeptiert, dass bei maximaler Ausnutzung dieser Größe eine teilweise Abschattung der Projektionsfläche im unteren rechten Bereich erfolgt, sofern technisch gewährleistet ist, dass eine Reflexion durch angestrahlte Fahrzeugkomponenten in das projizierte Bild unterbunden werden kann. Dies geschieht i.d.R. durch eine Schwarzmaske auf dem projizierten Bild.

Weiterhin soll der Abstand der Projektionsfläche auf der Innenseite des Doms bis zum Auge des Probanden mindestens $3,5 \text{ m}$ betragen, damit die durch die Adaption der Augen bedingte Anstrengung nicht zu groß wird. In Kombination mit einem breiten Öffnungswinkel des nach vorn und zur Seite projizierten Bildes der Umwelt von mindestens 225° und der Option für eine vollständige 360° -Projektion kann so ein maximal realistischer optischer Eindruck der Umgebung des Fahrzeugs entstehen.

Hierfür wird festgelegt, dass die Befestigung der Projektoren so erfolgen muss, dass eine Abdeckung von 360° durch die Anbringung weiterer Projektoren einfach umsetzbar ist. Hierdurch eröffnet sich weiterhin die Option, das Mockup, also das im Simulatordom befindliche Fahrzeug, bezüglich der Fahrzeuglängsachse parallel zur Bewegungsrichtung des Querschlittens zu positionieren, um Versuche mit hohen Anforderungen an die Längsdynamik durchführen zu können.

Die weiteren Spezifikationen betreffen sich ergebende bzw. übliche klimatische Rahmenbedingungen für die Simulatorhalle, die Anbindungen an das Fahrsimulatorgebäude und den Leitstand, Maßnahmen zur Sicherheit der Probanden und der Mitarbeiter während des Simulatorbetriebs sowie Regelungen zu Lieferfristen, Wartung und Dokumentation.

3.1.1 Beschaffung, Aufbau und Inbetriebnahme

Nach Abschluss der Anforderungsdefinition erfolgt die öffentliche Ausschreibung im Sommer 2013. Der Zuschlag an den laut zuvor festgelegtem Bewertungsschema besten Bieter erfolgt im Herbst 2013. Ende 2014 wird die Konstruktion des Fahrsimulators seitens des Lieferanten abgeschlossen und vor Jahresfrist werden die ersten Bauteile in das eigens dafür (aber nicht aus diesem Vorhaben finanzierte) neue Fahrsimulatorgebäude des Instituts eingebracht.

In den folgenden Monaten erfolgen weiter Teillieferung und Teilaufbauten. Überwiegend vom Lieferanten zu vertretende Verzögerungen führen zu projektneutralen Verlängerungen.

Nach Abschluss des Aufbaus erfolgt die offizielle Eröffnung des hochdynamischen Fahrsimulators im Rahmen einer Veranstaltung am 5. Oktober 2016. Unter den rund 120 Teilnehmern befinden sich zahlreiche hochrangige Vertreter aus Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und Presse. Unter anderem wohnen der Eröffnung der parlamentarische Staatssekretär im BMF, Thomas Rachel, der Rektor der RWTH Aachen, Prof. Ernst Schmachtenberg, der Oberbürgermeister der Stadt Aachen, Marcel Philipp sowie der Leiter des Instituts für Krafftfahrzeuge, Prof. Lutz Eckstein bei.

Die folgenden Bilder geben einen Eindruck von der Veranstaltung und dem vollständig aufgebauten Fahrsimulator wieder.





Von links nach rechts:
Prof. Lutz Eckstein (Leiter ika),
Thomas Rachel (parl. Staatssekretär im BMBF),
Prof. Ernst Schmachtenberg (Rektor RWTH Aachen) und
Marcel Philipp (Oberbürgermeister Stadt Aachen)

3.2 Motion Cueing-Algorithmus

Die folgende Zusammenfassung einiger grundlegende Ansätze stellt die Basis von Erweiterungen und Verbesserungen dar. Wesentliche Aspekte zur Fragestellung des geeigneten Motion Cueing-Algorithmus wurden auch in den Zwischenberichten des Vorhabens erläutert.

Im Folgenden wird zunächst eine Übersicht über mögliche Algorithmen gegeben, bevor der gewählte vorgestellt wird.

3.2.1 Klassischer Washout

Reid und Nahon [REI85] beschrieben detailliert den klassischen Washout-Algorithmus, der noch heute die Basis vieler Bewegungsumsetzungen bildet (vgl. Abb. 3-4). Die Eingangsgrößen sind hier die translatorischen Beschleunigungen, dargestellt als sog. spezifische Kräfte (f_v), und die Winkelgeschwindigkeiten (ω_v) des Fahrzeugs, bezogen auf dessen lokales Koordinatensystem. Ausgangsgrößen sind die Position (d_{MC}) und die Lage bzw. Ausrichtung (β_{MC}) im Inertialsystem:

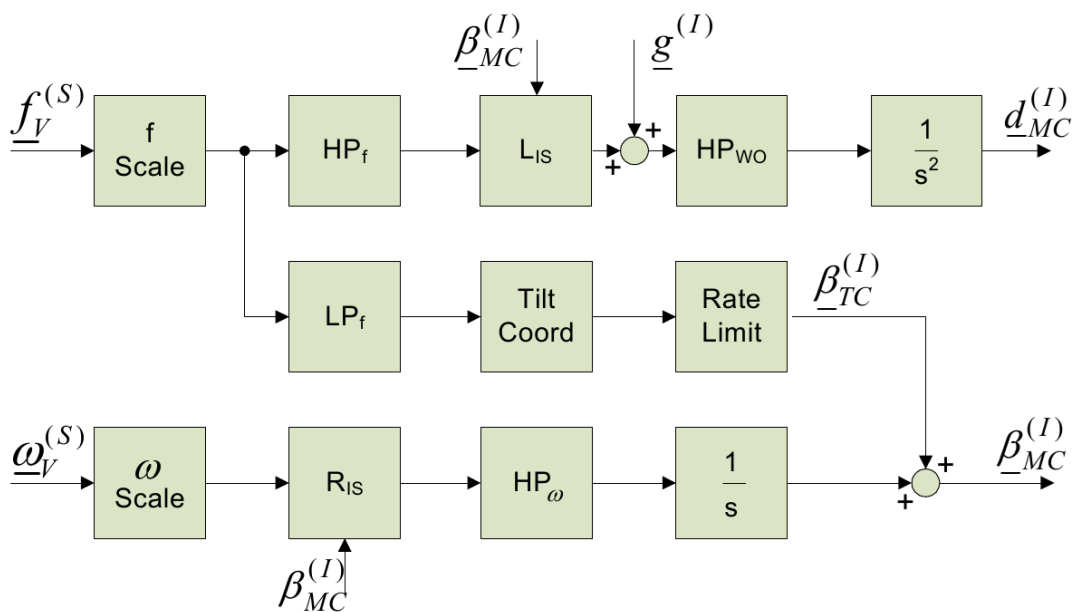


Abb. 3-4: Klassischer Washout-Algorithmus nach [REI85]

Die dahinterstehende Idee ist, hochfrequente Bewegungsanteile durch direkte Bewegung umzusetzen, nachdem diese von lokalen in das inertielle Koordinatensystem transformiert wurden (L_{IS}), während andauernde Beschleunigungen mit Hilfe der sog. Tilt Coordination, also dem Kippen (Tilt) des Mockups (Fahrzeugkabine) und der damit verbundenen Vortäuschung andauernder translatorischer Beschleunigungen durch den Schwerkraftvektor erreicht werden sollen (β_{TC}). Die Kippbewegung selbst wird noch überlagert mit den – wiederum in das ortsfeste Koordinatensystem transformierten (R_{IS}) – Winkelgeschwindigkeiten des simulierten

Fahrzeugs (ω_v). Alle nicht von der Tilt Coordination verursachten Bewegungsanteile durchlaufen einen Hochpassfilter, nachdem sie transformiert wurden. Um die Ausgangsgröße „Position“ bzw. „Lage“ mit den Einheiten Länge und Winkel zu erhalten, werden sie zweimal (im Falle der translatorischen Beschleunigungen) bzw. einmal (im Falle der Winkelgeschwindigkeiten) integriert.

Darüber hinaus werden die Eingangsgrößen selbst vor ihrer Verarbeitung noch skaliert, wodurch dem begrenzten Bewegungsraum von Simulatoren Rechnung getragen wird. Der aus der Tilt Coordination herrührende Anteil der Lageänderung erfährt eine Begrenzung der Drehrate.

3.2.2 „Optimal Control“-Algorithmus

Der ebenfalls von Reid beschriebene „Optimal Control“-Algorithmus [REI85] verwendet anstelle der Winkelgeschwindigkeiten als Eingangsgrößen die Eulerwinkel des simulierten Fahrzeugs. Hierdurch entfällt eine Transformation des Koordinatensystems bezüglich der Lage. Zusätzlich können die Anteile aus translatorischer Beschleunigung, transformierter translatorischer Beschleunigung und Eulerwinkel mit einer Gewichtungsfunktion versehen werden. Außerdem ist die Lage des Fahrzeugs über eine Kopplung und eine Gewichtungsfunktion mit der Simulatorposition verbunden:

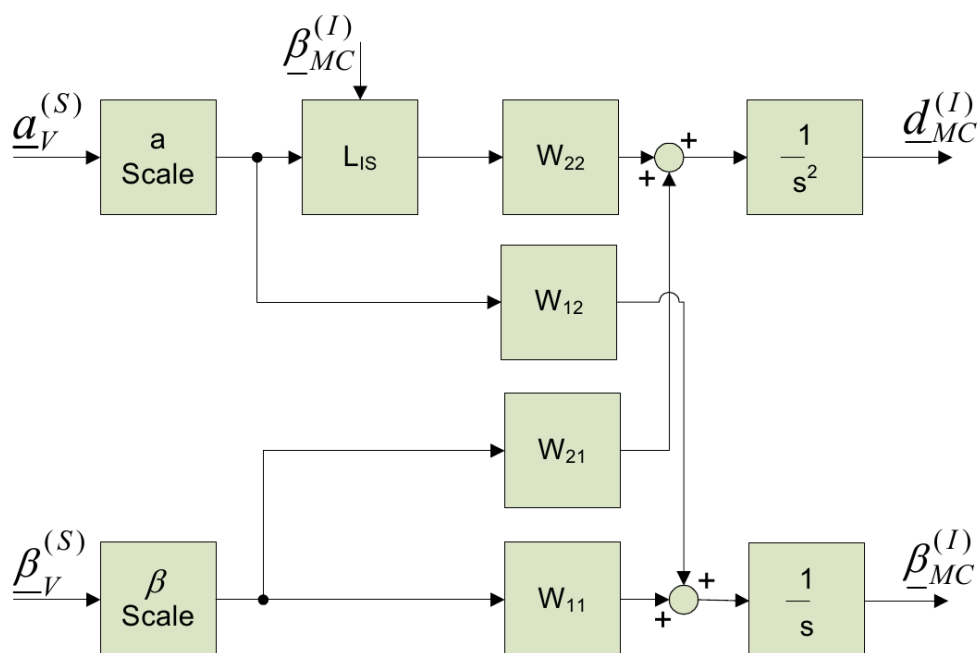


Abb. 3-5: „Optimal Control“-Algorithmus nach [REI85]

Die Parametrierung der Gewichtungsfunktionen (i.d.R. höherer Ordnung) erfolgt anhand von Versuchen, einer Kostenfunktion und durch Wahrnehmungsmodelle [TEL02]. Die Parameter bleiben über die Simulationsdauer hinweg konstant, passen sich also nicht an das Fahrgeschehen oder die Strecke an. Dies leistet hingegen der „Adaptiv Control“-Algorithmus.

Eine Kopplung der translatorischen Beschleunigung über die Funktion w_{12} bewirkt die Tilt Coordination.

3.2.3 „Adaptive Control“-Algorithmus („Coordinated Adaptive“)

Hier werden die Ansätze des klassischen Washout und des „Optimal Control“-Algorithmus ergänzt um eine laufende Optimierung während des Simulationsbetriebs. Die Struktur ist in Abb. 3-3 zu sehen.

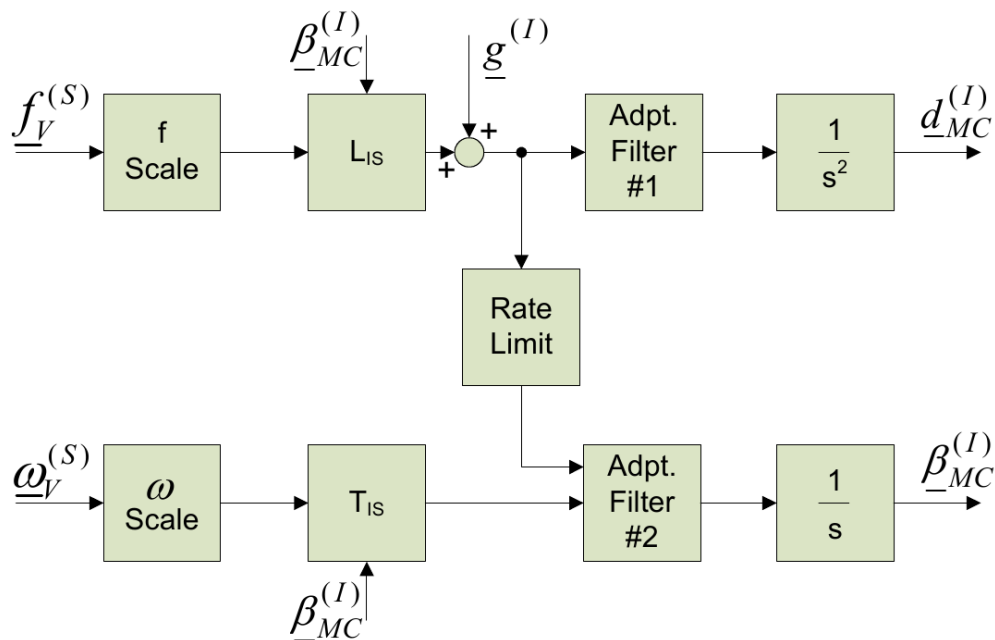


Abb. 3-6: „Coordinated Adaptive“-Algorithmus nach [RE185]

Die eingehenden Größen werden lediglich in das Inertialsystem transformiert und dann über einen adaptiven Filter begrenzt, integriert und wiederum als Lage und Position an die Ausgänge geführt. Ein Kopplungspfad verbindet die translatorischen Beschleunigungsanteile mit der Simulatorlage. Hier findet implizit die Tilt Coordination statt.

3.2.4 Gewählter Motion Cueing-Algorithmus

Allen Ansätzen gemein ist die Umsetzung der Fahrzeugbewegung im Eulerraum mit der klassischen Transformation von Bewegungen mit sechs Freiheitsgraden (f_v und ω_v) aus der Realität bzw. der simulierten Realität in den Bewegungsraum eines Fahrsimulators mit sechs Freiheitsgraden (d_{MC} , β_{MC}). Eine besondere Berücksichtigung der Umsetzung der Simulatorpositionierung entlang einer Querschiene, die entlang des translatorischen Freiheitsgrades über vollkommen andere technische Leistungsdaten verfügt als ein Hexapod, ist bereits hier über die adaptiven Filter- bzw. die Gewichtungsfunktionen und Skalierungsfaktoren in Ansätzen möglich:

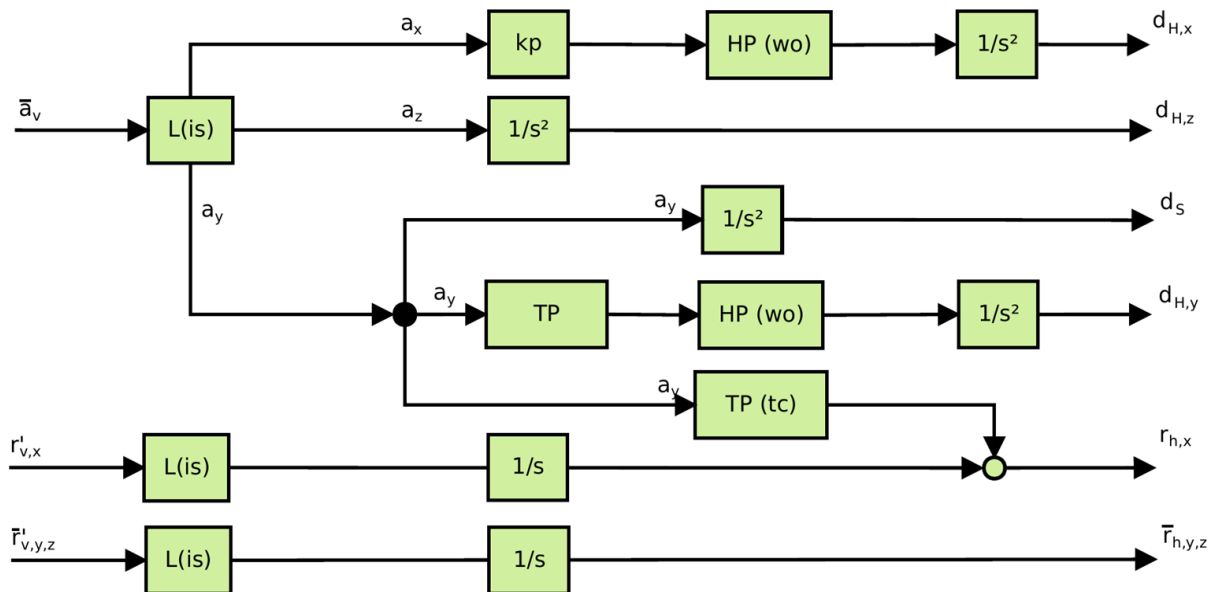


Abb. 3-7: Gewähltes Motion Cueing bei Autobahnfahrt (Schiene in y-Richtung)

Mit den Möglichkeiten eines siebten Freiheitsgrades und des erheblichen Arbeitsraumes, der durch die Querschiene in y-Richtung (bei einem Autobahnscenario) zur Verfügung steht, kann für die Darstellung der Querbewegung ein anderer Ansatz gewählt werden. Das Motion Cueing für den Fall einer Autobahnfahrt bin einer Gesamtfahrbahnbreite von bis zu 12 m für eine Richtung (z.B. durch drei Fahrstreifen) ist vereinfacht in Abb. 3-7 zu sehen.

Auf der linken Seite sind die Eingangswerte aus dem Fahrzeugmodell dargestellt. Dies sind die translatorischen Beschleunigungen und die rotatorischen Geschwindigkeiten. Auf der Ausgangsseite rechts stehen die Position und Lage des Hexapoden sowie die Position des Schlittens auf der Schiene.

Bezüglich der Translation in z-Richtung wird angenommen, dass der Arbeitsraum des Hexapoden über dem darzustellenden Hübe liegt. Somit kann die Beschleunigung in z-Richtung durch zweimaliges Integrieren direkt in den Aktorhub überführt werden. Im realen System werden zusätzlich Hochpassfilter verwendet, um den Effekt von Steigungen oder Gefälle bezüglich des Hubes auszuklammern. Diese sind hier aus Komplexitätsgründen nicht dargestellt.

Die laterale Position des Fahrzeugs entlang einer Richtungsfahrbahn kann direkt durch die Schiene angefahren werden. Sollte diese technisch bedingt nicht direkt zur Verfügung stehen, so kann das hochpassgefilterte Querbeschleunigungssignal zweifach integriert und stattdessen genutzt werden. Dieses Verfahren ermöglicht auch den Einsatz des Algorithmus im urbanen Umfeld.

Für die Rotation um die y- und die z-Achse gilt, dass diese durch das Integral der Drehraten

nach Überführung aus dem Inertialsystem direkt durch den Hexapoden gestellt werden. Das Fahrzeugmodell errechnet aus den auftretenden Beschleunigungen in Längsrichtung die Lage um die Nickachse. Zusätzlich werden Steigungen, aber auch andere streckenbedingte Nickänderungen auf diese Signale addiert und über den Hexapoden umgesetzt. In Abhängigkeit der geplanten Manöver und der befahrenen Strecke können alle Einflussfaktoren vor Beginn der Fahrt skaliert werden.

Die Rotation um die x-Achse dient zum einen zur direkten Darstellung der Wankbewegung und zum anderen zur Abbildung andauernder Querschleunigung mit Hilfe der Tilt Coordination. Außerdem werden streckeninduzierte Wankwinkel (z.B. Kurvenüberhöhung oder Bordstein) hiermit umgesetzt. Hierzu werden direkte Rotationswerte aus dem Fahrzeugmodell zunächst aufteilt. Auf einem Pfad wird das Signal tiefpassgefiltert und zweifach integriert. Auf diese Weise wird andauernde Querschleunigung in langgezogenen Kurven abgebildet.

Längsbeschleunigungen erfolgen als hochpassgefiltertes und zweifach integriertes Signal aus dem Fahrzeugmodell direkt translatorisch und tiefpassgefiltert und skaliert rotatorisch (Tilt Coordination).

Umgesetzt werden dieser und andere Algorithmen in einem im Rahmen dieses Projektes entwickelten Programm, welches intern „Motion Adapter“ genannt wurde.



Abb. 3-5: Screenshot des Programms „Motion Adapter“

3.3 Fahrdynamikmodell

Für die Simulation des Fahrzeugverhaltens in Abhängigkeit der Fahrereingaben bzw. der Vorgaben des Assistenzsystems ist ein mathematisch-numerisches Modell erforderlich, welches die wesentlichen Aspekte der Fahrdynamik für die relevanten Zustände abbilden kann. Die verwendete Simulationssoftware bringt ein einfaches Fahrzeugmodell mit, welches mit einer Frequenz von 60 Hz betrieben wird und einfachen Ansprüchen bei statischen Simulationen genügt.

Für eine adäquate Darstellung der Bewegungswahrnehmung ist jedoch eine Frequenz von mindestens 1.000 Hz unerlässlich, da auch kleinste rechnerische Abweichungen vom Verlauf einer kontinuierlichen Bewegung für den Probanden als spürbarer Effekt wahrgenommen werden. Es stellt sich ggf. das sogenannte Ripple ein, ein Gefühl von Rauigkeit, Welligkeit oder sonstiger Ungleichförmigkeit der Bewegung. Weiterhin erhalten die Darstellung von Aufbauschwankungen bei Nick- und Wankbewegungen eine erheblich größere Bedeutung, da diese sich nicht nur als Verschiebung und Rotation des dargestellten Horizonts, wie beim statischen Simulator, sondern als tatsächliche rotatorische Bewegungen und entsprechend wahrnehmbare Beschleunigungen niederschlagen. Weiterhin ist es zwingend erforderlich, dass ein direkter Eingriff in die Fahrdynamik durch das Assistenzsystem möglich ist.

Aus diesen Gründen wurde ein echtzeitfähiges Fahrdynamikmodell erstellt, das diesen Ansprüchen genügt, und im Folgenden erläutert wird.

Für eine Längssimulation ist es erforderlich, dass die Sollbeschleunigung von eigenen Fahrzeug ausreichend realistisch umgesetzt wird, um Annäherungsvorgänge für Funktionstests abzubilden. Auch das Fahrverhalten des simulierten Vorderfahrzeugs muss im Bezug der zu testenden Eigenschaften möglichst realistisch sein, wenn der Test erste Rückschlüsse auf das Fahrverhalten ermöglichen soll. Während für das Vorderfahrzeug für statische Tests noch ein aufgezeichnetes Geschwindigkeitsprofil für die Simulation ausreichen würde, ist beim eigenen Fahrzeug ein entsprechend detailliertes längsdynamisches Modell erforderlich. Im Kern stellt sich die Längsdynamik als ein Gleichgewichtsproblem zwischen Leistungsangebot und Leistungsbedarf dar.

Für Verkehrssimulationen (z.B. PELOPS) wurden in der Vergangenheit Kennlinien und Kennfelder aufgezeichnet, die einer Beschleunigungsanforderung in Abhängigkeit zahlreicher Parameter, darunter die aktuelle Geschwindigkeit, die Pedalstellung, das Fahrzeuggewicht, die Drehzahl, der eingelegte Gang usw., eine sich ergebende Beschleunigung zuordnen. Andere Parameter wie Steigung, Fahrbahnreibung, Gesamtmasse usw. gehen ebenfalls ein, wobei die Kennlinien i.d.R. bei Ebenheit (0 % Steigung) ermittelt wurden. Mit Hilfe dieser Kennfelder ist es möglich, das charakteristische Verhalten eines bestimmten Fahrzeugs für verschiedene Simulationszwecke nachzuahmen. Ebenso findet sich in den Modellen eine Berücksichtigung analytisch schwer zu erfassender Komponenten wie z.B. der Energieverlust durch Walkarbeit am Reifenlatsch, welche für den Antrieb obligatorisch ist. Nicht berücksichtigt werden z.B. die Windgeschwindigkeit sowie Interferenz- und induzierter Widerstand in

Abhängigkeit der Anströmrichtung des Fahrwindes.

Vergleichsweise einfach zu verwendende Kennfelder standen jedoch nur von Fahrzeugen zur Verfügung, die für den Einsatz des ACC-Systems nicht vorgesehen waren (es handelte sich überwiegend um Nutzfahrzeuge). Aufgrund der sich verändernden Fragestellungen rund um die Längsdynamik wie z.B. die Simulation von Verbrauchsdaten oder Schadstoffemissionen beinhalten moderne Verkehrssimulationen heute detailliertere Modelle mit mehr Einflussgrößen. Deren Qualität ist ebenso gut, wie der kennlinienbasierte Ansatz, sie können jedoch mehrere Informationen bereitstellen. Auch diese arbeiten noch in Teilen mit Kennfeldern, jedoch lediglich im Bereich einzelner Antriebsstrangkomponenten. So sind z.B. jeder Motordrehzahl ein Momentanverbrauch, ein Geräuschpegel und der Ausstoß von Stickoxiden zugeordnet, was diese Fahrzeugmodelle sehr komplex werden lässt.

Auch die Verkehrssimulation PELOPS verfügt über diese Parameter. Hinzu kommen u.a. noch ein detailliertes Fahrermodell, welches z.B. die physische Fußbremskraft des Fahrers, die Reaktionszeiten in verschiedenen Verkehrssituationen, die stufenlos wählbare Neigung, Geschwindigkeitsbegrenzungen zu missachten oder in riskanten Situationen zu überholen sowie zahlreiche weitere Entscheidungsprozesse berücksichtigt. Die Nutzung solch komplexer Modelle ist i.d.R. mit dem Einsatz aufwendiger technischer Methoden zur Sicherstellung von gültigen Lizenzen verbunden. Meist wird zumindest ein Dongle oder eine Netzwerkverbindung, nicht selten aber beides benötigt.

Für die Tests im Fahrsimulator wurde daher beschlossen, ein einfacheres aber valides Längsdynamikmodell zu verwenden, das vor allem dadurch charakterisiert ist, dass es angeforderte Beschleunigungen innerhalb der physikalischen Grenzen von realen Fahrzeugen umsetzt und sich wählbaren Höchstgeschwindigkeiten asymptotisch annähert.

Hierzu wurden die längsdynamischen Grundlagen der Fahrdynamik in einem Programmmodul umgesetzt. Als vereinfachenden Ausgangspunkt dient die Grundgleichung der Fahrdynamik. Sie basiert auf dem Schwerpunktsatz der technischen Mechanik unter der Annahme, dass keine Relativbewegung zwischen den Teilmassen erfolgt. Als Teilmassen sind neben dem Fahrzeug und dessen Ausstattung auch die Zuladung und die rotierenden Teile, vor allem die Räder, zu sehen.

$$\sum(m_i) \cdot \ddot{x} = -F_L - (\sum(G_i)) \cdot \sin(\alpha) + \sum(X_j) \quad \text{Gl. 3-1}$$

Dabei steht F_L für die Luftwiderstandskraft, G für die Gewichtskraft der Teilmassen, m_i für die Teilmassen selbst und X_j für Rotations- und Reibungskräfte. Mit Einführung der Gesamtmasse m und dem Gesamtgewicht G sowie der Zusammenfassung der Änderung der Rotationsgeschwindigkeit des Rades und der translatorischen Beschleunigung lassen sich die Glieder aus o.a. Gleichung umstellen zur folgenden Fahrwiderstandsgleichung vereinfachen.

$$F_x = F_{roll} + F_{luft} + F_{steig} + F_{beschl} \quad \text{Gl. 3-2}$$

Auf der linken Seite der Gleichung steht die Kraft, die das Fahrzeug beschleunigt, während auf der rechten Seite die Widerstandskräfte aufgeführt sind. Für die Beschleunigung steht der Motor zur Verfügung, der sein Drehmoment über das Getriebe an die Reifen überträgt:

$$F_x = \frac{M_{mot}}{r_{dyn}} \cdot i_{gang} \cdot i_{achs} \cdot \eta_{ges} \quad \text{Gl. 3-3}$$

Die Luftwiderstandskraft hängt u.a. von der Geometrie des Fahrzeugs, der Luftdichte und der Geschwindigkeit relativ zur anströmenden Luft in Fahrtrichtung ab. Die Geometrie schlägt sich sowohl in der Stirnfläche A nieder, als auch in dem Luftwiderstandsbeiwert c_w , in welchem Beiwerte für Oberflächenreibung, Verwirbelungen durch geometrische Übergänge und induzierte Druckwiderstände vereint sind. Eine Berücksichtigung der Änderung der Luftwiderstandskomponenten aufgrund veränderter Anströmrichtung oder Geometrie (z.B. durch Lenkwinkel) unterbleibt.

$$F_{luft} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A \cdot c_w \quad \text{Gl. 3-4}$$

Rollwiderstand und Steigungswiderstand bilden sich aus der Summe der Gewichtskräfte (Leergewicht, Betankung, Insassen und Zuladung) sowie dem Rollwiderstandsbeiwert und der Steigung:

$$F_{roll} + F_{steig} = m \cdot g \cdot (c_{roll} + \sin\alpha) \quad \text{Gl. 3-5}$$

Hierbei wird u. a. der sog. Schwallwiderstand außer Acht gelassen, d.h. die Simulation erfolgt diesbezüglich unter der Annahme, dass sich auf der Fahrbahn kein Wasser gebildet hat, das durch die Reifen verdrängt wird. Je nach Anwendungsfall findet jedoch die Fahrbahnbeschaffenheit in der Form eines veränderten Haftreibungsbeiwertes μ an anderer Stelle Berücksichtigung.

Nach Newton ergibt sich die erforderliche Kraft zur Beschleunigung der Masse. Es ergibt sich folgende Gesamtgleichung:

$$\frac{M_{mot} \cdot i_{getr} \cdot i_{gang} \cdot \eta_{getr}}{r_{dyn}} = c_{roll} \cdot m \cdot g + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot c_w \cdot A + \sin\alpha \cdot m \cdot g + m \cdot a \quad \text{Gl. 3-6}$$

Durch Umstellung nach der Beschleunigung erhält man schließlich eine Formel zur Ermittlung der sich ergebenden Beschleunigung in Abhängigkeit aller aufgeführten Einflussgrößen:

$$a = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(\frac{M_{\text{mot}} \cdot i_{\text{achs}} \cdot i_{\text{gang}} \cdot \eta_{\text{getr}}}{r_{\text{dyn}}} - \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot c_w \cdot A\right) - (c_{\text{roll}} + \sin\alpha) \cdot g \quad \text{Gl. 3-7}$$

Bei der Umsetzung in Quellcode werden die Abhängigkeiten von dynamischen Größen soweit reduziert, wie es der gewünschte Simulationszweck erlaubt. Dazu werden zunächst statische und quasi-statische Größen identifiziert. Die Achsübersetzung, die Getriebeübersetzung (für den jeweiligen Gang), die Erdbeschleunigung g und der Widerstandsbeiwert c_w sowie die Bezugsfläche sind per Definition unveränderlich. Das gleiche gilt für den dynamischen Reifenradius. Darüber hinaus lohnt sich die Betrachtung der in der Realität veränderlichen Größen im Einzelnen.

Der Getriebewirkungsgrad, das heißt das Maß für den Leistungsverlust zwischen der Antriebs- und der Abtriebsseite beim Getriebe, ergibt sich aus Gleit-, Roll- und Flüssigkeitsreibung im Getriebe selbst, die an den Zahnflanken, den Lagern und im Getriebeöl entstehen. Die daraus resultierende Wärme beeinflusst ihrerseits wiederum die entsprechenden Effekte, so dass der tatsächliche Wirkungsgrad um wenige Prozent schwankt. Der Einfluss auf die Beschleunigung sinkt mit zunehmender Geschwindigkeit und die Veränderung wirkt sich also lediglich auf die beim Anfahren auftretende Beschleunigung mit diesen wenigen Prozenten aus. Somit wird η_{getr} als konstant angenommen.

Das Motormoment ist von Brennstoff, Luftdichte, Sauerstoffgehalt, Heizwert des Brennstoffs und vor allem drehzahlabhängig (vgl. Abb. 3-8). Die Drehzahl hängt von der Öffnung der Drosselklappe und somit der Fahrpedalstellung ab, wenn man sich weit genug von den Leistungsgrenzen des Fahrzeugs entfernt bewegt. Somit soll eine Varianz dieses Wertes in der Simulation nicht auf der Fahrzeugseite, sondern auf der Seite des Fahrermodells erfolgen.

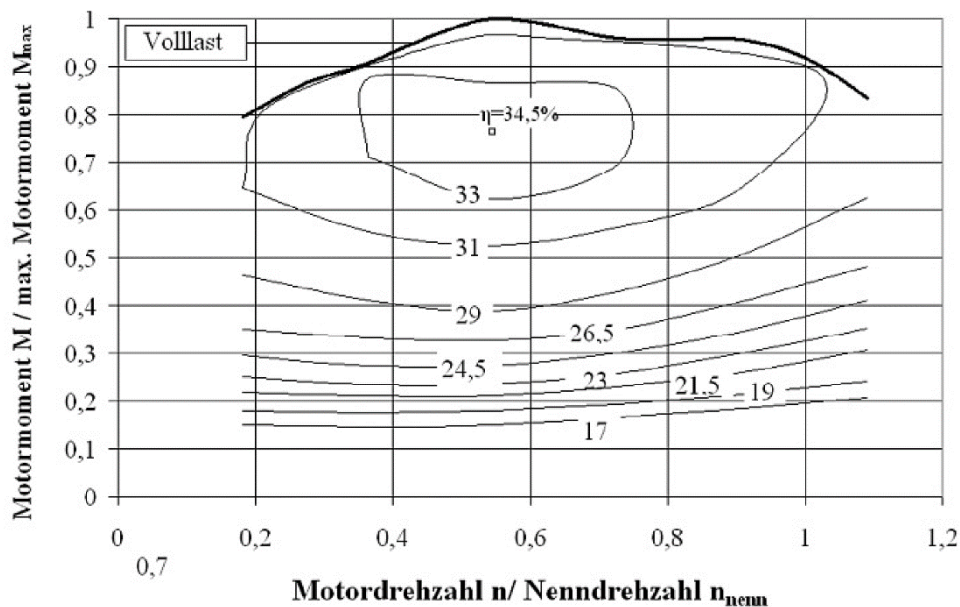


Abb. 3-8: Beispiel für die Abhängigkeit des Motormoments von der Drehzahl bei einem Ottomotor

Die Luftdichte ist abhängig von Luftdruck, Temperatur und spezifischer Gaskonstante. Letztere hängt von der exakten Zusammensetzung des Gases ab und wird i.d.R. über die molare Gaskonstante von trockener Luft angenähert. Bei den entsprechenden Parametern handelt es sich jedoch nicht um Werte, die hochdynamischen Änderungen unterworfen sind. Daher ist es legitim, die Luftdichte über eine Fahrt als konstant anzunehmen.

Der Rollwiderstandsbeiwert hängt von der Materialpaarung Reifen/Untergrund ab und kann zwar stark variieren, jedoch kann für die Simulation von durchgängigem homogenen Straßenbelag ausgegangen werden. Auch die Annahme, auf ebener Fahrbahn (also mit 0 % Steigung) zu fahren, ist erlaubt.

Der Luftwiderstandsbeiwert c_w sowie dessen Bezugsfläche A werden auf Basis von Modellen errechnet und i.d.R. durch zusätzliche Windkanalversuche bestimmt. Auch die in die Modellrechnung eingehenden Werte für die Oberflächenreibung oder typische Werte für den Koeffizienten des Interferenz- und Druckwiderstandes werden üblicherweise durch Windkanalversuche bestimmt. Hier steht kein Messverfahren zur Verfügung, das geeignet wäre, den Wert im realen Fahrzeug dynamisch zu ermitteln. Zumal die Ursachen für eine entsprechende Änderung (z.B. verschmutzte Oberflächen) in der Simulation ohnehin nicht auftreten. Die Simulation geht also von einem gewaschenen Auto ohne Anhaftungen von Schmutz oder Niederschlag aus, so wie es im Windkanal vermessen wurde. Die Größen c_w und A sind also ebenfalls konstant.

Es zeigt sich, dass für die sich einstellende positive Beschleunigung also lediglich das Motormoment und die aktuelle Geschwindigkeit als nicht-statisch angesehen werden müssen. Die aktuelle Geschwindigkeit ist als kinematische Größe leicht zu berechnen, da sie bei null beginnt und in der Folge ausschließlich von der in den vorangegangenen Zeitschritten errechneten Beschleunigung abhängt.

Die negative Beschleunigung wird in ihrem Maximalwert lediglich durch die Haftreibung bzw. den Haftreibungsbeiwert μ begrenzt. Darüber hinaus hängt sie primär von der Stellung des Bremspedals und somit ebenfalls eher vom Fahrermodell als vom Fahrzeugmodell ab. Sie wird im Fahrzeugmodell als lineare Funktion der Bremspedalstellung mit minimaler Verzögerung durch einen Tiefpassfilter realisiert.

3.4 Interaktionsmodelle mit Blick auf das automatisierte Fahren

Im Rahmen des Vorhabens werden grundlegende Fragen der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug bei automatisierter Fahrt unterschiedlicher Automatisierungsstufen untersucht.

3.4.1 Grundlagen

Das zu entwickelnde Assistenzsystem soll dem Fahrer gegenüber mit der Metapher der magnetischen Abstoßung erklärt werden, um ihm so eine intuitive Begründung für den Einfluss des Systems auf das Fahrzeugverhalten zu liefern. Die Wirkung von Magneten ist vielen Menschen aus dem Alltag bekannt, etwa von magnetischen Verschlüssen an Möbeln. Auch

einige Notebooks verwenden Magnete beim Anschluss des Stromkabels. So kann einerseits eine sichere Befestigung erreicht werden, andererseits kann die Verbindung durch Aufbringen einer bestimmten Zugkraft weitgehend verschleiß- und zerstörungsfrei wieder gelöst werden.

Die genannten Beispiele machen sich den magnetischen Anziehungseffekt zu Nutze, während das vorstellte System mit der magnetischen Abstoßung arbeitet. Nichtsdestotrotz können diese Alltagserfahrungen durchaus als Referenz für den Fahrzeugführer dienen, da durch die Änderung der magnetischen Anziehung zur magnetischen Abstoßung hin lediglich das Vorzeichen der wirkenden Kraft wechselt.

Ausgangspunkt der hier ausgeführten Überlegungen ist das Gebiet der Magnetostatik, also der zeitlich konstanten Magnetfelder. Ein solches Feld wird erzeugt durch die Bewegung einer elektrischen Ladung, aber auch durch Permanentmagnete, die auch ohne Ladungsbewegungen ihr statisches Magnetfeld behalten. Von Relevanz für das Assistenzsystem ist vor allem das Verhalten von Permanentmagneten, weshalb die sehr komplexen Auswirkungen des Elektromagnetismus hier nicht weiter betrachtet werden.

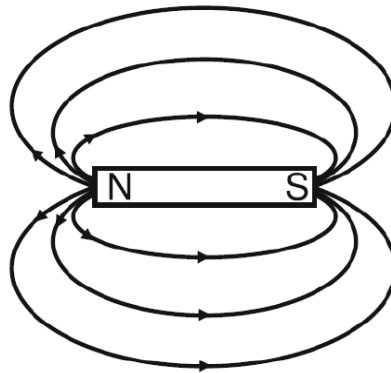


Abb. 3-9: Magnet mit Feldlinien (nach [ERD12])

Magnete existieren grundsätzlich nicht als Monopole, sondern nur als magnetische Dipole. Das heißt, dass sie stets über einen Nord- sowie einen Südpol verfügen. Unterschiedliche Pole ziehen sich an, gleichnamige stoßen sich ab. Abb. 3-9 zeigt einen magnetischen Stab mit dem Feld, das er erzeugt. Die Feldlinien geben die Richtung der wirkenden Kraft an, durch ihre Dichte lässt sich auf die Stärke des Feldes schließen. Man erkennt, dass die Linien stets zwischen Nord- und Südpol verlaufen und immer geschlossen sind; dies bedeutet, dass das Magnetfeld quellenfrei ist.

Im Falle sehr langer Stabmagneten kann man die Pole näherungsweise als Monopole betrachten. Daraus lässt sich das folgende vereinfachte empirische Kraftgesetz herleiten:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{P_1 \cdot P_2}{r^2} \cdot \vec{e}_r$$

Gl. 3-8

Dabei ist r der Abstand zwischen den Polen, P_1 und P_2 sind relative Werte für die Polstärken, von deren Betrag die resultierende Kraft F abhängt. Die Permeabilitätskonstante ist wie folgt festgelegt:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \quad \text{Gl. 3-9}$$

Es wird davon ausgegangen, dass diese Gleichung die in den beschriebenen Alltagserfahrungen auftretende Kraft hinreichend genau beschreibt und daher als Grundlage für den Entwurf des Assistenzsystems geeignet ist. Insbesondere die Tatsache, dass der Kraftverlauf über dem Abstand einen sehr stark nichtlinearen Charakter aufweist, ist eine wichtige Erkenntnis. Diese Nichtlinearität sollte der Fahrer auch bei aktiviertem System erfahren.

Aus Gl. 3-1 ergibt sich folgende vereinfachte magnetische Kraftfunktion:

$$F(d) = k \cdot \frac{1}{d^2}; \quad d > 0 \quad \text{Gl. 3-10}$$

mit dem in Abb. 3-10 dargestellten Verlauf:

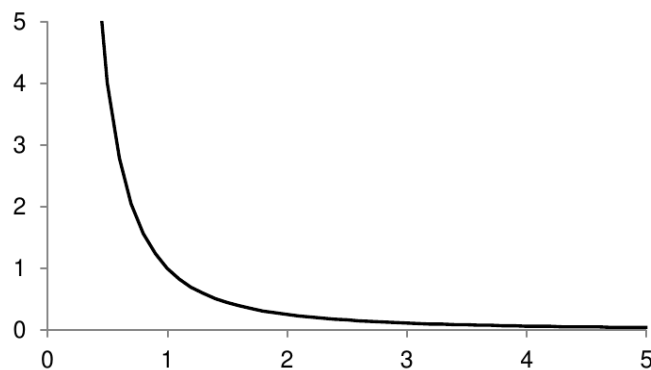


Abb. 3-10: Vereinfachte Kraftfunktion mit $k=1$

Hier werden die Grenzwerte für d gegen 0 und d gegen unendlich erkennbar. Übertragen auf den Anwendungsfall der Magnetanalogie bedeutet dies, dass die magnetische Kraft erst bei einer unendlich hohen Entfernung zwischen den Polen ihre Wirkung verliert, bei einer Entfernung von 0 hingegen unendlich hoch ist. Im Sinne einer komfortablen Fahrdynamikregelung wäre die Darstellung dieser Extrema im günstigsten Falle kontraproduktiv, wenn nicht gar gefährlich.

Es ist daher zu fordern, dass die Kraftfunktion über definierte Maxima für Kraft und Wirkungsentfernung verfügt, was auch dem physikalischen Verhalten von Magneten, sofern dies durch den Menschen erlebbar ist, entspricht. Eine geeignete Parametrierung und die algorithmische Umsetzung der Funktion dauert noch an.

3.4.2 Wirkungsmöglichkeiten

Über die Kraftfunktion hinaus müssen Kanäle identifiziert werden, über die die Kraftwirkung auf den Fahrer übertragen werden kann.

Magnetische Felder sind durch die Sinne des Menschen nicht direkt wahrnehmbar. Ihre Existenz kann, abgesehen vom Einsatz spezieller Messinstrumente (Magnetometer), lediglich durch die Auswirkungen des Feldes auf magnetische Gegenstände beobachtet werden. Für die Verwendung der Metapher der magnetischen Abstoßung des Fahrzeugs stellt dies einen großen Vorteil dar, da das behauptete magnetische Feld nicht im Widerspruch zu den unmittelbaren Sinneseindrücken des Fahrers steht. Nichtsdestotrotz muss die magnetische Wirkung auf eine Art und Weise einen Einfluss auf den Fahrer und/oder direkt auf das Verhalten des Fahrzeugs ausüben. Die prinzipiell zur Verfügung stehenden Möglichkeiten sind in Abb. 3-8 dargestellt.

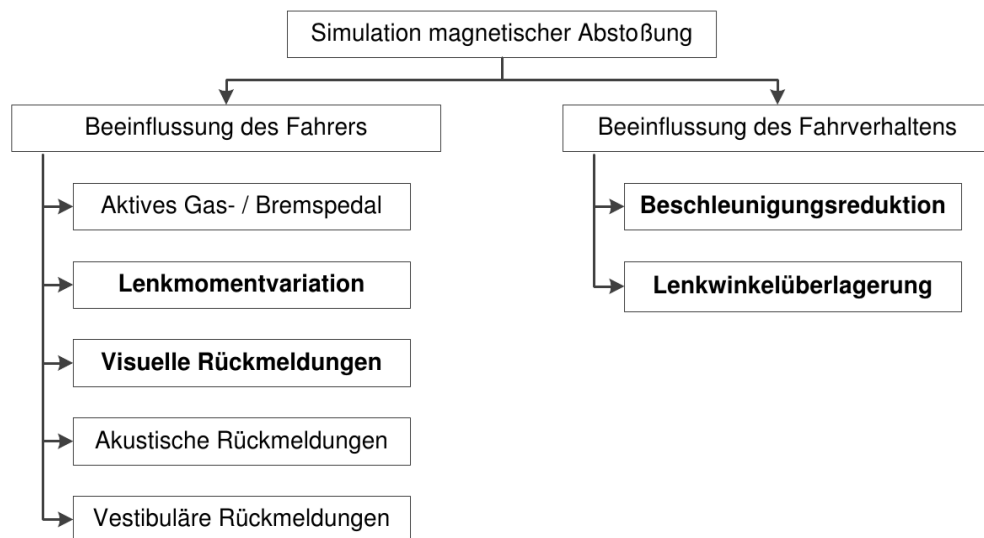


Abb. 3-11: Übersicht der Beeinflussungsmöglichkeiten

Die Optionen wurden hinsichtlich ihrer Eignung diskutiert.

Aktives Gas- und Bremspedal

Eine Möglichkeit zur Umsetzung magnetischer Einflüsse auf die Längsdynamik stellen aktive Brems- und Gaspedale dar. „Aktiv“ bedeutet, dass eine Zusatzkraft auf das Pedal aufgebracht wird, durch die bei gleicher vom Fahrer aufgebrachtener Fußkraft ein anderer Pedalwinkel erreicht wird. Je nach Wirkrichtung der Zusatzkraft kann das Pedal dann weiter oder weniger

tief durchgetreten werden bzw. das Pedal kann leichtgängiger oder schwergängiger arbeiten.

Bei einer von vorne auf das Fahrzeug wirkenden magnetischen Kraft könnte dementsprechend das Gaspedal schwergängiger und das Bremspedal leichtgängiger gemacht werden, so dass der Fahrer dazu bewegt wird, eine geringere Motorleistung anzufordern und damit die Beschleunigung zu verringern. Soll das System komplett eigenständig bremsen können, muss die Aktorik so ausgelegt sein, dass die zum Durchtreten des Bremspedals benötigte Fußkraft auch vom System alleine aufgebracht werden kann.

Beschleunigungsreduktion

Die Längsdynamik des Fahrzeugs kann auch unmittelbar beeinflusst werden, also ohne den Fahrer zu einer Verhaltensänderung veranlassen zu müssen. Dazu muss die tatsächlich aufgebrachte Bremskraft am Rad entkoppelt werden von der Bremspedalstellung und die tatsächlich abgerufene Motorleistung von der Gaspedalstellung. Eine simulierte magnetische Abstoßung von einem Vorderfahrzeug würde dann zu einer Reduktion der Motorleistung führen oder im Falle einer starken magnetischen Kraft zu einer Erhöhung der Bremskraft.

Lenkwinkelüberlagerung

Das Lenkrad stellt die Schnittstelle des Fahrzeugführers zur Kontrolle des Lenkwinkels der (Vorder-) Räder und damit der lateralen Fahrzeugbewegungen dar. Dementsprechend liegt dort der Ansatzpunkt zur Umsetzung einer seitlichen magnetischen Kraft. Die erste Möglichkeit dazu stellt eine Lenkwinkelüberlagerung, also die Addition eines Zusatzlenkwinkels zu dem vom Fahrer gewählten Winkel, dar. So wird eine Abweichung des vom Fahrer gewählten Kurses hervorgerufen, die durch die magnetische Kraft erklärt werden kann. Der zugrundeliegende Gedanke dahinter ist, dass der Fahrer einen bestimmten Lenkwinkel einstellt, dabei jedoch – etwa durch Unachtsamkeit – einen gewissen Fehler macht, der idealerweise durch den Zusatzlenkwinkel korrigiert wird.

Die Schwierigkeit liegt in der Trennung des Lenkwinkels in den gewünschten Winkel und den Fehlerwinkel, und damit in der Ermittlung des benötigten Zusatzlenkwinkels. Im Kontext der Fahrunterstützung durch magnetische Abstoßung soll dieser Winkel aus der wirkenden magnetischen Kraft ermittelt werden. Bei dieser Vorgehensweise verliert die Übersetzungsfunktion ihre Zeitinvarianz, da sie zu verschiedenen Zeiten (bzw. Fahrsituationen) verschiedene Ergebnisse liefert.

Mathematisch gesehen wird der symmetrische Zusammenhang zwischen dem Lenkradwinkel und der Stellung der Vorderräder aufgehoben: einer bestimmten Lenkradstellung ist keine eindeutige Stellung der Vorderräder mehr zugeordnet.

Bedienung durch den Fahrzeugführer

Da das im Rahmen des Projektes zu untersuchende Assistenzsystem Einfluss auf das Verhalten des Fahrzeugs nimmt, muss neben der eigentlichen Funktionalität die Gestaltung

der Mensch-Maschine-Schnittstelle ebenfalls Berücksichtigung finden.

Neben den Aspekten der Wirksamkeit und der Akzeptanz durch den Fahrer spielt die Kontrollierbarkeit eine wichtige Rolle. Der Fahrer muss während der Fahrt jederzeit dazu in der Lage sein, folgende Operationen durchführen zu können:

- Aktivierung und Deaktivierung des Systems
- Wahl des Ausmaßes der Unterstützung bzw. der Stärke der Systemeingriffe in das Fahrverhalten

Der zweite Punkt steht natürlich unter dem Vorbehalt, dass das finale System über eine solche Möglichkeit zur Konfiguration verfügt. Um die Komplexität gegenüber dem Fahrer gering zu halten, sollen die beiden genannten Operationen nicht als unterschiedliche Dimensionen der Bedienung umgesetzt werden, sondern stattdessen dahingehend vereint werden, dass sie durch ein einzelnes Bedienelement repräsentiert werden können. Erreicht wird dies dadurch, dass die Eingriffsstärke in diskrete Stufen eingeteilt wird, von denen die niedrigste dem Zustand „aus“ entspricht und die folgenden Stufen jeweils Verstärkung der Unterstützung erreichen.

Offen gelassen werden muss die Möglichkeit zur Deaktivierung durch das Assistenzsystem selbst. Dies kann erforderlich sein, wenn etwa die Umgebungssituation nicht mehr mit dem Einsatzbereich des Systems kompatibel ist oder, wenn allgemein die Systemgrenzen überschritten werden. Daher kann kein Bedienelement verwendet werden, das über einen eigenen Aktivierungszustand verfügt, wie zum Beispiel ein Druckknopf mit Einrastfunktion. Der gedrückte Zustand (System „an“) könnte nicht hier durch das Fahrzeug selbst gelöst werden, wodurch dem Fahrer gegenüber im Falle einer Selbstdeaktivierung eine widersprüchliche Information über den aktuellen Systemzustand präsentiert würde.

Aus den genannten Überlegungen wurden zwei mögliche Umsetzungsvarianten abgeleitet. Da zum derzeitigen Zeitpunkt noch kein endgültiges Mockup zur Verwendung im Fahrsimulator zur Verfügung steht, wurden beide Varianten prototypisch in einem schon vorhandenen Mockup umgesetzt. Es wurde auf die regulär im Fahrzeug vorhandenen Bedienelemente für das Multimediasystem zurückgegriffen, indem die gesendeten Betätigungssignale am fahrzeugeigenen CAN-Bus abgegriffen wurden.

Die erste und zu bevorzugende Variante setzt auf einen Drehknopf als radiales Bedienelement. Er verfügt über mehrere diskrete Rastpositionen, aber nicht über eine absolute Position oder Nulllage. Da er sowohl links- als auch rechtsherum gedreht werden kann, ermöglicht er eine bidirektionale Wahl der Systemstufen. Beispielhaft dargestellt wird dies in Abb. 3 -9, wobei dort

von zwei implementierten Abstufungen ausgegangen wird.

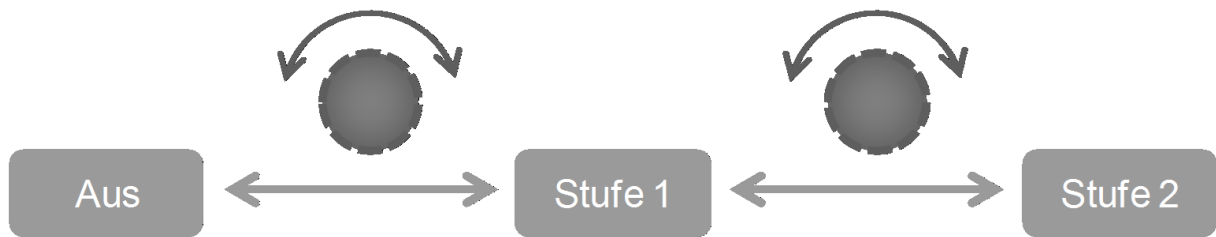


Abb. 3-12: Kontrolle des Assistenzsystems über ein radiales Bedienelement

Da der Drehknopf – wie erwähnt – über keine Absolutposition verfügt, kann er beliebig weit in beide Richtungen gedreht werden. Das System ignoriert über den sinnvollen Bereich hinausgehende Bewegungen und verbleibt auf der Minimal- bzw. Maximalstufe.

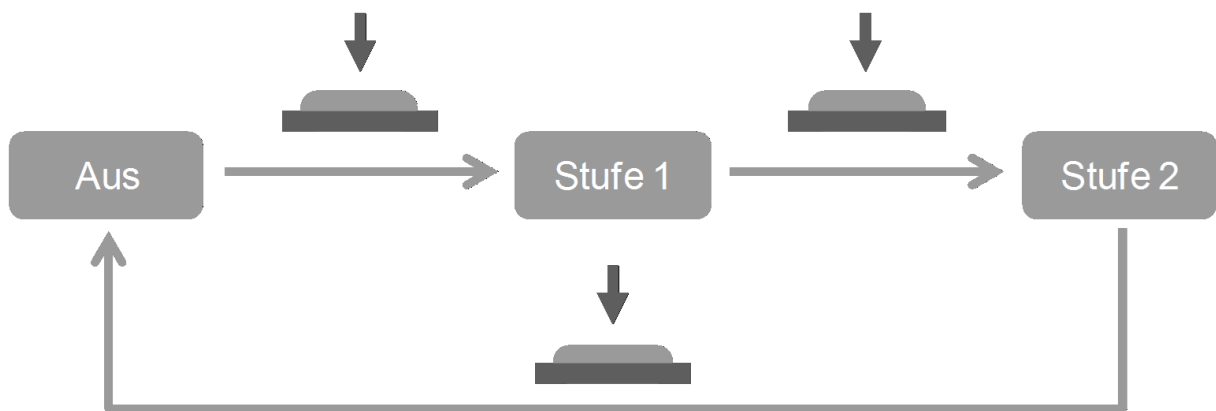


Abb. 3-13: Kontrolle des Assistenzsystems über einen Drucktaster

Alternativ ist die Verwendung eines einfachen Drucktasters möglich, der allerdings nur eine unidirektionale Steuerung des Systems ermöglicht. Wie Abb. 3-13 zeigt, bewirkt ein Tastendruck eine Erhöhung der Systemstufe, bis nach Erreichen des Maximums wieder in die Ausgangslage (Systemzustand „aus“) zurückgesprungen wird.

Prinzipiell ebenfalls denkbar wäre die Verwendung eines zweiten Tasters zum Zurückschalten. Mangels Erfordernis für die Bedienung wurde diese Variante allerdings zunächst nicht umgesetzt.

3.4.3 Visuelle Darstellung des Systemzustandes

Der Fahrer muss das Assistenzsystem nicht nur nach seinen derzeitigen Bedürfnissen konfigurieren können, sondern auch über den aktuellen Zustand informiert werden. Dazu wird ein geeignetes Anzeigekonzept benötigt. Zwar wäre die Nutzung dezidierter Leuchtelemente denkbar, etwa zur Darstellung der gewählten Stufe, eine größere Flexibilität bei der Informationsdarstellung bieten allerdings hochauflösende LC-Displays. In modernen Mittel- und Oberklassefahrzeugen finden sie schon heute eine zunehmende Verbreitung.

Wünschenswert wäre eine grafische Darstellung, welche die zur Beschreibung des Systems verwendete Metapher von der magnetischen Abstoßung nachempfunden. Umgesetzt werden könnte dies zum Beispiel durch eine Abbildung von magnetischen Feldlinien um das Fahrzeug herum bei aktiviertem System. Bei einer Perspektive von oben auf das Fahrzeug könnte diese Darstellung kombiniert werden mit der regulären Kartendarstellung eines Navigationssystems, wie es üblicherweise auf dem Bildschirm in der Fahrzeug-Mittelkonsole angezeigt wird.

Zur computerbasierten Bilderzeugung steht eine Vielzahl an Werkzeugen zur Verfügung, die in unterschiedlichen Bereichen zur Anwendung kommen. Die für die Darstellung dieser Systemvisualisierung evaluierten Tools werden im Folgenden kurz vorgestellt.

CGI Studio

Die Software CGI Studio der Firma Fujitsu wurde speziell zur Gestaltung grafischer 2D- und 3D-Oberflächen für den Einsatz im Automobil entwickelt, etwa für ein volldigitales Kombiinstrument. Sie bietet nicht nur die Möglichkeit zum Entwurf der darzustellenden Inhalte inklusive komplexer Animationen, sondern enthält einen Renderer zur Echtzeitdarstellung durch integrierte Hardware, Tools zur Optimierung, eine Anbindung an externe Zustandsmaschinen sowie die Möglichkeit zur Validierung nach ISO 26262.

Drive Studio (UI Composer)

Das Unternehmen NVIDIA bietet eine vergleichbare Software namens Drive Studio (früher UI Composer) an. Sie ist primär auf die grafische Darstellung der Benutzerschnittstellen fokussiert, insbesondere auf den firmeneigenen für den Automotive-Bereich konzipierten Tegra-Prozessoren.

Blender

Bei der freien Software Blender handelt es sich um ein umfangreiches Programmpaket zur Erstellung von 3D-Modellen wie einzelnen Objekten oder auch kompletten Szenerien. Neben der Möglichkeit zur fotorealistischen Darstellung bietet es zusätzlich ein Modul zur interaktiven Echtzeitanimation von dreidimensionalen Inhalten, was durch eine frei programmierbare Skriptsprache realisiert wird.

Umsetzung

Aufgrund der freien Verfügbarkeit wurde letztendlich Blender für die Umsetzung des Anzeigekonzeptes ausgewählt. Es dient dabei vor allem zur Modellierung der benötigten 3D-Objekte einschließlich des eigenen Fahrzeugs sowie des Magnetfeldes. Die Darstellung der Gesamtanzeige im Fahrzeug und die Anbindung an die Simulation wird durch eine selbst entwickelte Softwarekomponente unter Nutzung des FLTK-Frameworks umgesetzt.

Nachfolgend ist das Magnetfeld abgebildet, wie es für die ersten Versuche dem Fahrer präsentiert wird. Der das Fahrzeug umfassende Magnetring ist in acht Sektionen eingeteilt, die

je nach Fahrsituation einzeln farblich hervorgehoben werden können. Über diese Einfärbung wird dem Fahrzeugführer mitgeteilt, in welcher Richtung sich potentielle Bedrohungen wie

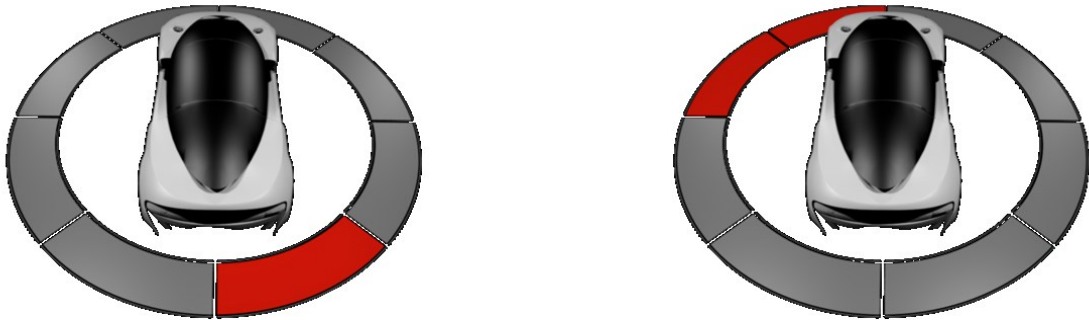


Abb. 3-11: Visuelle Darstellung des Magnetfeldes im Simulatorfahrzeug.
Abstoßung von rechts hin bzw. von links vorne.

etwa andere Verkehrsteilnehmer befinden. Dabei können ebenfalls Hervorhebungen in mehreren unterschiedlichen Richtungen auftreten.

3.4.4 Eingriffsentscheidung

Aus den zuvor diskutierten Möglichkeiten zur Beeinflussung des Fahrtverlaufs wurde die direkt auf das Fahrverhalten wirkenden ausgewählt. Das Assistenzsystem kann die Beschleunigung und damit auch die Geschwindigkeit durch Rücknahme der Leistungsanforderung an den Motor reduzieren oder in kritischeren Situationen durch Anforderung einer Bremsung. Im querdynamischen Bereich bietet die Lenkwinkelüberlagerung die Möglichkeit, das Fahrzeug von der derzeit durch den Fahrzeugführer eingestellten Trajektorie weiter nach links oder weiter nach rechts abzulenken.

Damit stehen drei unterscheidbare Eingriffsmöglichkeiten zur Verfügung:

- Reduzierung der Beschleunigung/Abbremsen
- Ablenkung nach links
- Ablenkung nach rechts

Die Bremsung kann dabei kombiniert werden mit einem Ausweichen nach links oder rechts. Welche dieser Manöver zu einem Zeitpunkt ausgeführt werden, ist abhängig mehreren Faktoren, die im Folgenden beschrieben werden.

Systemstufe

Die vom Fahrer gewählte Systemstufe gibt die generell Stärke der Unterstützungseingriffe an. Systemstufe 0 deaktiviert das System, alle nachfolgenden Stufen erhöhen die Stärke bis zu einem definierten Maximalwert. Die Zahl der Stufen bis zur Maximalstärke ist parametrierbar, für die Tests wurde $n=3$ gewählt.

Time to Collision

Reagiert das magnetische Assistenzsystem auf ein Hindernis, so sind die maßgeblichen Größen einerseits der euklidische Abstand sowie die sog. Time to Collision (TTC) zum Hindernis. Bei letzterer handelt es sich um eine übliche Größe, die wie folgt definiert ist:

$$TTC = -\frac{dx}{dv} \quad \text{Gl. 3-11}$$

dx : Abstand zum Vorderfahrzeug

dv : Differenzgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug (Annäherung bei $dv < 0$)

Bei einer Annäherung an das Vorderfahrzeug gibt die TTC die Zeit bis zur Kollision bei konstanter Differenzgeschwindigkeit an.

Lenkwinkel

Ebenfalls abhängig ist die Reaktion vom Fahrerwunsch, ausgedrückt durch den Lenkwinkel, von der zu erwartenden Position des eigenen Fahrzeugs relativ zum Hindernis zum Zeitpunkt einer Kollision. Diese wird abgeschätzt mit einer Prädiktion des Fahrverlaufs über einen Zeitraum von wenigen Sekunden. Basis dafür ist das Einspurmodell, welches eine einfache Beschreibung des querdynamischen Verhaltens von Fahrzeugen darstellt. Es wird die stationäre Variante des Modells verwendet, welche hochdynamische Effekte vernachlässigt und eine konstante Kreisfahrt annimmt.

Aus den kinematischen Gegebenheiten eines über die Vorderachse gelenkten Kraftfahrzeugs lässt sich folgender Zusammenhang herleiten:

$$\delta = \frac{l}{r} + EG * a_y \quad \text{Gl. 3-12}$$

δ ist der Lenkwinkel am Vorderrad, l die Fahrzeuglänge, R der Kurvenradius und a_y die seitliche Beschleunigung. EG ist der sog. Eigenlenkgradient, der das Stabilitätsverhalten eines Fahrzeugs in Kurvenfahrten charakterisiert und angepasst wird an das zu simulierende Fahrzeugmodell. Mit Hilfe dieser Gleichung lässt sich aus dem durch den Fahrer eingestellten Lenkwinkel nun der Kurvenradius ableiten und der eingeschlagene Kurs vorhersagen, wobei für den Prädiktionshorizont der gegenwärtige Lenkwinkel als konstant angenommen wird.

Wie in Abb. 3-14 dargestellt, ist das Ergebnis der Prädiktion nicht nur die Zeit bis zur (potentiellen) Kollision, sondern auch der Winkel zwischen Fahrzeug und Hindernis. Liegt dieser im Bereich von 180° , wird ausschließlich eine Verzögerung abgerufen. Je näher er den seitlichen 90° annähert, desto stärker wird die Ausweichreaktion bei gleichzeitiger Reduktion der Bremsung.

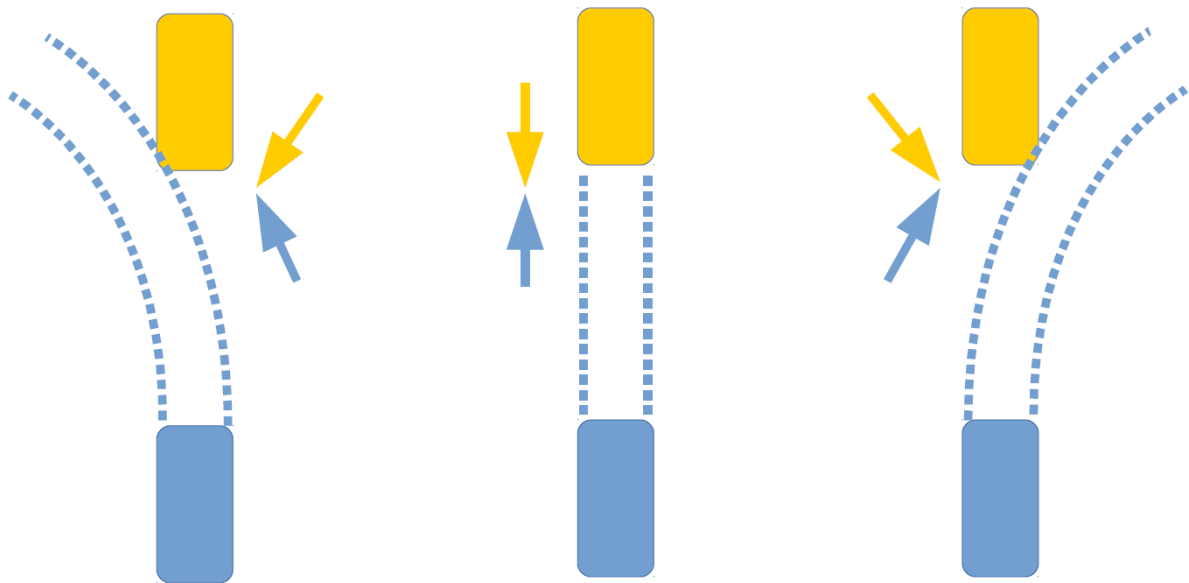


Abb. 3-14: Prädiktion der Fahrtrajektorie zur Ermittlung des Wirkungswinkels

Blinkerzustand

Die zweite Stufe der Entscheidungsfindung berücksichtigt den Blinkerzustand. Hat der Fahrer keinen Blinker gesetzt, werden Bremsreaktionen priorisiert und Ausweichmanöver weitestgehend vermieden, um kein unbeabsichtigtes Verlassen des eigenen Fahrstreifens zu veranlassen. Ist dagegen der Blinker gesetzt, so wird davon ausgegangen, dass ein Spurwechsel vom Fahrer erwünscht ist. In diesem Fall wirkt das Assistenzsystem als Unterstützung bei diesem Manöver.

Fahrstreifenbelegung

Die letzte und wichtigste Instanz im Entscheidungsprozess ist die Belegung der seitlichen Fahrstreifen. Sind diese von anderen Fahrzeugen blockiert, löst das System keinen Spurwechsel aus. Im Gegenteil werden vom Fahrer ausgelöste Spurwechsel sogar unterdrückt. Visuell dargestellt wird dies durch ein seitliches Aufleuchten des „Magnetringes“ um das Fahrzeug im Kombiinstrument. Dementsprechend wird das Fahrzeug in diesem Fall abgebremst, um eine Kollision mit dem Hindernis zu vermeiden.

3.4.5 Schnittstellen mit dem Fahrzeug und der Simulationsumgebung

Um die Funktionalität des Assistenzsystems realisieren zu können, wurden die benötigten Eingangsdaten identifiziert und spezielle Soft- und Hardwareschnittstellen zu ihrer Bereitstellung geschaffen. Eine Möglichkeit zur Einteilung ist die in jene Informationen, die unmittelbar aus dem Simulatorfahrzeug (Mockup) stammen, sowie den durch die Simulation erzeugten Daten. Vom Fahrzeug selbst sind für diesen Anwendungsfall vor allem der Zustand der primären und sekundären Bedienelemente relevant. Auf Seiten der Simulationssoftware dagegen ist die anfallende Datenmenge deutlich umfangreicher, wie Abb. 3-13 verdeutlicht.

Fahrzeugdaten	Simulationsdaten	
	Lokal	Umgebungsfahrzeuge [1..n]
<ul style="list-style-type: none"> • Gaspedalstellung [0..1] • Gaspedal-Kickdown • Bremspedalstellung [0..1] • Lenkwinkel [rad] • Blinkerzustand • Systemstufe [0, 1, 2, 3] 	<ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeit • Längsbeschleunigung • Querb beschleunigung • Spurbablage • Gierwinkelfehler • Fahrbahnkrümmung 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativposition zum Egofahrzeug • Relativgeschwindigkeit • Fahrstreifenzuordnung

Abb. 3-13: Eingangsdaten des Assistenzsystems

Die im Mockup verbauten Bedienelemente sind entweder direkt oder über einen Analog-Digital-Wandler an einen integrierten PC angeschlossen. Dessen primäre Aufgabe ist es, die Zustände der Bedienelemente über ein Netzwerkprotokoll an die Softwarekomponente des Assistenzsystems weiterzuleiten.

Als Schnittstelle mit der Simulationssoftware wurde dagegen ein virtueller Sensor implementiert. Er stellt einerseits die eigenen Fahrdaten wie Geschwindigkeit und Beschleunigung zur Verfügung. Andererseits aggregiert und filtert dieser Sensor die Informationen über die anderen Verkehrsteilnehmer und stellt sie dem Assistenzsystem ebenfalls über ein Netzwerkprotokoll in nutzbarer Form bereit. Soweit anwendbar werden SI-Einheiten verwendet, als Format dienen 64-Bit-Gleitkommazahlen.

Die Ausgangsdaten des Assistenzsystems stehen in mehreren Varianten zur Verfügung. In Variante 1 können angepasste Signale für die Pedale und das Lenkrad ausgegeben werden, die vom Fahrdynamikmodell so verarbeitet werden, als seien es direkt Fahrereingaben. Wenn das verwendete Fahrzeugmodell über eine Sollbeschleunigungsschnittstelle verfügt, die ein gewünschtes Beschleunigungsziel selbstständig eingeregelt, so wird in Variante 2 dieses statt der Pedalwerte zurückgeliefert. In Variante 3 besteht die Möglichkeit, laterale Kurskorrekturen nicht über eine Lenkwinkelüberlagerung durchzuführen, sondern über radindividuelle Bremsengriffe. Hierzu wird daher kein angepasster Lenkwinkel ausgegeben, sondern die Bremskraft an jedem Rad. Voraussetzung ist dabei die Unterstützung durch das jeweils genutzte Fahrzeugmodell.

Variante 1	Variante 2	Variante 3
<ul style="list-style-type: none"> • Gaspedalstellung [0..1] • Bremspedalstellung [0..1] • Lenkwinkel [rad] 	<ul style="list-style-type: none"> • Sollbeschleunigung [m/s²] • Lenkwinkel [rad] 	<ul style="list-style-type: none"> • Gaspedalstellung [0..1] • Radindividuelle Bremskraft [N]

Abb. 3-14: Ausgangsdaten des Assistenzsystems

Der Rückkanal vom Assistenzsystem zur Simulationssoftware erfolgt über das gleiche Netzwerkprotokoll. Somit integriert sich das magnetische System als regulärer Bestandteil in die Regelstrecke Fahrer-Fahrzeug-Simulator.

3.4.6 Längsregelung

Im Folgenden wird die Längsregelung beschrieben.

Systemaufbau und Datenfluss

Wie in Abb. 3-15 zu erkennen, stehen die Eingangsdaten, also Fahrerwunsch, Radardaten und Fahrzeugsensorik, jeder der drei Reglerkomponenten (s.u.) zur Verfügung. Dabei werden diese zunächst verwendet, um zu erkennen, in welcher Situation sich das Fahrzeug befindet. Anschließend wird für die Beschleunigung ein Sollwert errechnet, der dann, wiederum in Abhängigkeit der Situation und der Eingangsdaten, gegebenenfalls nachbearbeitet werden kann.

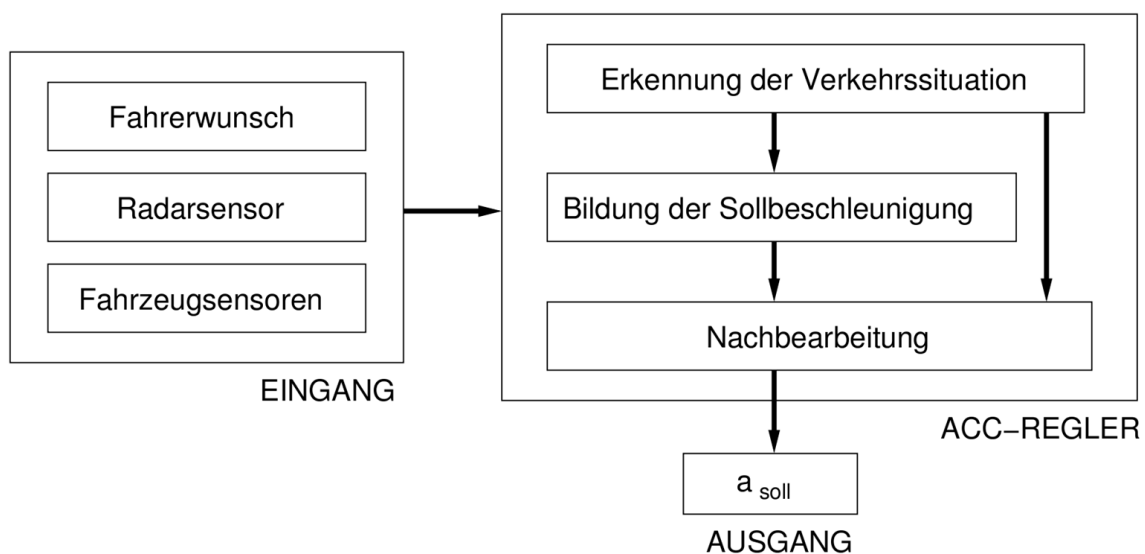


Abb. 3-15: Aufbau des neuen ACC-Systems

Unter Fahrerwunsch ist hier vor allem die Wunschgeschwindigkeit und, im Falle eines existierenden langsameren Vorderfahrzeugs, der Wunschabstand zu verstehen, der i.d.R. als zeitlicher Abstand („Zeitlücke“) in den Regelalgorithmus eingeht und den Regelkomfort maßgeblich beeinflusst. Diese Informationen werden über die Mensch-Maschine-Schnittstelle, also die Bedienelemente des Fahrzeugs, erfasst. Auch die generelle Aktivierung oder Deaktivierung des Systems durch Betätigung eines Kipphebels sowie die Reaktivierung nach längerem Stillstand und die Deaktivierung durch Bremsengriff werden als Fahrerwunsch in der Regelung verarbeitet.

Der Radarsensor liefert in erster Linie Informationen über den Abstand und die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs. Die Sensoren des eigenen Fahrzeugs geben Auskunft darüber, ob der Fahrer das Fahrpedal oder das Bremspedal betätigt, ob er blinkt, wie schnell das eigene Fahrzeug fährt und mit welcher Beschleunigung etc. Auch die Querbeschleunigung und der Lenkradwinkel werden berücksichtigt.

Diese Informationen werden zunächst verwendet, um zu erkennen, in welcher Situation sich das Fahrzeug befindet. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Situationskatalog

weiterentwickelt, der den Anspruch erhebt, jede für die Längsregelung relevante Lage zu erkennen, damit die Koeffizienten der Sollwertermittlung entsprechend gewählt und nachgelagerte Filter passend eingesetzt werden können. Die Situationen und ihre Erkennung werden im Folgenden erläutert.

Die Berechnung der Sollbeschleunigung erfolgt nach der bereits vorgestellten Methode, wobei im Unterschied zum ursprünglichen Regler als Erweiterung nun noch die Relativgeschwindigkeit in die Sollwertberechnung eingeht.

Schließlich werden wiederum alle verfügbaren Eingangsdaten sowie die erkannte Verkehrssituation verwendet, um den errechneten Sollbeschleunigungswert nochmals zu modifizieren. Eine solche Modifikation kann aus den unterschiedlichsten Gründen erfolgen, z.B. soll bei erkannter Kurvenfahrt (also bei hoher Querschleunigung) das Fahrzeug ab einem konfigurierbaren Grenzwert nicht weiter beschleunigen, auch wenn der Fahrstreifen vor dem Fahrzeug frei ist und die Wunschgeschwindigkeit noch nicht erreicht wurde.

Die eingesetzten Filter werden im Folgenden detailliert beschrieben.

Protokolldefinition in der OSI-Anwendungsschicht

Bevor die Regelung selbst implementiert wurde, war es erforderlich, eine möglichst vollständige Liste aller erforderlichen Ein- und Ausgangsdaten zu erstellen, die Daten bezüglich ihrer Genauigkeit, mit der sie auf dem CAN-Bus übertragen werden, zu bewerten und festzulegen, welche Bereiche gültig sind bzw. wie Fehler erkannt werden können. Dem OSI (Open Systems Interconnection)-Schichtenmodell [OSI91] folgend handelt es sich hierbei um die Anwendungsschicht. Da der Regler leicht für verschiedene Fahrzeuge anwendbar sein soll, werden diese Ein- und Ausgangswerte durch sogenannte Gateways in eine einheitliche Form gebracht bzw. aus dieser übernommen. So befindet sich zwischen dem Fahrzeug und dem Regler auf der Eingangsseite ein Gateway, das die Fahrzeugsensordaten in das hier festgelegte Format bringt, während auf der Ausgangsseite die Sollbeschleunigung sowie andere Werte, die innerhalb der Regelung generiert werden (z.B. Warnmeldungen an den Fahrer, Vorhalte-Bremsdruck usw.) direkt hinter dem Regler in das für das jeweilige Fahrzeug entsprechende Format gebracht werden.

Im Inneren des so entstandenen Bereichs sollten die Daten dabei mit der Genauigkeit verarbeitet werden, die sich aus physikalischer Sicht als sinnvoll erweist. Die hierfür vorgenommenen Betrachtungen seien am Beispiel der Geschwindigkeit einmal beispielhaft nachvollzogen:

Die allgemeine Beschreibung der Umrechnung eines digitalen Signals (zumeist aus einer CAN-Botschaft entnommen) in den physikalischen Wert erfolgt nach Gl. 3-13, wobei n_p für die physikalische Größe, n_d für den dimensionslosen digitalen Wert, $n_{d,off}$ für den ebenfalls dimensionslosen Offset des digitalen Wertes und r für die Auflösung (Resolution) und die entsprechende Einheit steht.

$$n_p = (n_d + n_{d,off}) \cdot r \quad \text{Gl. 3-13}$$

Im einfachsten Fall hat der Offset den Wert 0 und die Auflösung den Wert 1 mit der entsprechenden Einheit. Dann entspräche der digitale Wert direkt der physikalischen Größe. Wenn der Offset nicht 0 ist, handelt es sich i.d.R. um eine physikalische Größe, die positive und negative Werte annehmen kann. Die Auflösung r ermöglicht es, Werte mit einer höheren Genauigkeit als 1 zu verarbeiten. Offset und Auflösung werden lediglich in der Protokollvereinbarung festgelegt und sind den übertragenen Werten nicht entnehmbar.

Zwar ist es technisch möglich, sowohl vorzeichenbehaftete Werte, als auch nicht ganzzahlige Werte zu übertragen, jedoch trägt der konsequente Einsatz dieser Vorschrift zur Fehlervermeidung bei und kann auch helfen, die Datenmengen zu reduzieren. Bei Fließkommazahlen wird dies besonders deutlich, da bei Orientierung an den nach IEEE 754 genormten Fließkommazahlen mit einfacher Genauigkeit für die Übertragung immer 32 Bit benötigt würden. Würde man mit geringerer Genauigkeit nach diesem Schema übertragen, müsste man für Mantisse und Exponent Bitbreiten vorgeben und erwarten, dass der Wert sowohl bei der Kodierung, als auch bei der Dekodierung korrekt umgesetzt wird, zumal diese Fließkommazahlen von keiner Entwicklungsumgebung direkt unterstützt würden. Die ingenieurmäßige Praxis zeigt, dass eine solche Vorgehensweise der Betriebssicherheit des Endproduktes abträglich wäre.

Um die möglichen Fehler durch die evtl. zu geringe Auflösung der Daten abzuschätzen, sind die Grenzbereiche zu betrachten. Dies betrifft sowohl die kleinste, als auch die größte übertragbare Veränderung des Wertes im Verhältnis zur erwarteten Veränderung der zugrundeliegenden physikalischen Größe. Kleine Geschwindigkeitsänderungen spielen bei einer Folgefahrt mit einem Abstandsregeltempomaten (auch ACC – Adaptive Cruise Control) keine Rolle, so dass direkt der Fall größer absoluter Längsbeschleunigungen betrachtet werden kann. Hier wiederum gibt eine Bremsung die höhere Änderung vor, denn bei der Beschleunigung erreicht das Fahrzeug bedingt durch die Leistung des Motors deutlich kleinere Werte.

Bei einer sehr starken Bremsung mit einer Beschleunigung von $a_x = -10 \text{ m/s}^2$ verändert sich die Geschwindigkeit in 10 ms um 0,1 m/s. Das liegt im Bereich der Messgenauigkeit der Raddrehzahlsensoren. Die zu messende Geschwindigkeit liegt immer im positiven Bereich und sicherlich unter 100 m/s. Diese Überlegung ergibt dann für die Genauigkeit der Geschwindigkeitsinformation eine Auflösung von 10 Bit. Damit lassen sich 2^{10} Zustände erfassen, also 1.024. Wenn man nun eine Auflösung von 0,1 mit der Einheit m/s definiert, lassen sich Geschwindigkeiten von 0 - 102,4 m/s (0 - 368,6 km/h) übertragen. Üblicherweise wird der höchste übertragbare Wert (alle Bits „1“) zur Signalisierung von Fehlern genutzt. Somit erstreckt sich der Bereich also bis 102,3 m/s. Die mit 10 Bit übertragbare Geschwindigkeit liegt mit rund 368 km/h unrealistisch hoch. Bei gleicher Auflösung wären jedoch mit 9 Bit nur 184 km/h übertragbar, was zu wenig wäre. Nun liegt es nahe, den tatsächlichen Geschwindigkeitsbereich des Fahrzeugs zu verwenden, und die Definition der Auflösung so zu ändern, dass die 10 Bit möglichst effektiv genutzt werden. Für 250 km/h

Höchstgeschwindigkeit ergäbe sich folgende Rechnung:

$$\begin{aligned}
 V_{x,max, km/h} &= 250 \text{ km/h} && \text{Gl. 3-14} \\
 V_{m/s} &= V_{x,max, km/h} \cdot 3,6^{-1} = 69,44 \text{ m/s} \\
 r &= V_{m/s} \cdot 2^{-10} = 0,0678125 \text{ m/s} && (1) \\
 r &= V_{x,max,km/h} \cdot 2^{-10} = 0,2441406 \text{ km/h} && (2)
 \end{aligned}$$

Die theoretisch übertragbare Auflösung läge also mit 0,0678125 m/s „höher“ als 0,1 m/s in dem Sinne, dass bis 250 km/h Höchstgeschwindigkeit eine feinere Abstufung übertragbar wäre. Viele Fahrzeughersteller und -zulieferer gehen bei der Entwicklung der CAN-Protokolle diesen Weg. Für den vorliegenden Fall soll die Einfachheit zugunsten der Fehlervermeidung künftiger Benutzer des Reglers den Vorrang bekommen, da die Auflösung von 0,1 m/s, wie zuvor beschrieben, auch bei extremen Fahrmanövern ausreicht.

Am Beispiel der Quereschleunigung a_y kann man die Verwendung von Offset $n_{d,off}$ und Auflösung r sehen. Die Bitanzahl beträgt 11, es können also digitale Werte bis zu 2.048 auftreten (normalerweise ist dieser Wert vereinbarungsgemäß ein Hinweis auf einen Fehler, da alle Bits auf „1“ gesetzt wurden). Die Hälfte des Wertes wird als negativer Offset festgelegt und die Auflösung soll bis auf zwei Nachkommastellen genau sein. Mit $r = 0,01 \text{ m/s}^2$ und $n_{d,off} = -1024$ ergeben sich somit für zwei Beispielwerte $n_d = 0$ und $n_d = 1500$ folgende Rechnungen:

$$\begin{aligned}
 n_p &= (0 - 1024) \cdot 0,01 = 0 \text{ m/s}^2 && \text{Gl. 3-15} \\
 n_p &= (1500 - 1024) \cdot 0,01 = 4,76 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

Nach diesem Schema wurden alle benötigten Eingangs- und Ausgangswerte untersucht und in einem Protokoll festgelegt. In erster Linie sind das Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs, eigene Geschwindigkeit, Abstand zum Vorderfahrzeug, gewählte Zeitlücke usw.

Ob eine rechnerische Auflösung sinnvoll ist oder nicht, ergibt sich auch aus der Genauigkeit der eingesetzten Sensoren. Oft liefern heutzutage Sensoren ihre Werte direkt über eine CAN-Schnittstelle (sog. „intelligente Sensoren“), d.h., dass eine Vorverarbeitung der dem Messverfahren zugrundeliegenden physikalische Größe bereits durch einen Mikrocontroller stattfindet, der im Gehäuse des Sensors verbaut ist. In diesem Fall können die Auflösung und der Offset direkt übernommen werden, wobei im vorliegenden Fall zu beachten ist, dass das Assistenzsystem in unterschiedlichen Fahrzeugtypen eingesetzt werden kann und daher die Eigenschaften der Sensoren für die Eingangsdaten nicht notwendigerweise identisch sind.

Eine Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Auflösungen der eingehenden Sensordaten wurde nicht explizit vorgenommen. Die Entwicklung geeigneter Testverfahren für das Gesamtsystem stellt jedoch sicher, dass die sich ergebenden Abweichungen erfasst werden.

Erweiterung um Gewichtung der Relativgeschwindigkeit

Für eine bessere Abstimmbarkeit des Reglers soll nun neben dem Abstand zum Vordermann und der eigenen Wunschgeschwindigkeit auch die Relativgeschwindigkeit berücksichtigt werden. In Vorgängerversion dieses ACC-Systems wurden schon Versuche unternommen, die Beschleunigung in einem nachgelagerten Filter in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit besser an die Fahrsituation anzupassen, jedoch sind von einem direkten Einfluss bei der Berechnung des Sollwertes bessere Ergebnisse zu erwarten.

Bei Verwendung eines Radarsensors wird die Relativgeschwindigkeit direkt über den Dopplereffekt ermittelt und muss nicht über Differenzierung des Abstandes ermittelt werden. Eine Einbeziehung bedeutet daher zumindest keine Verschlechterung der Eingangsdatenbasis. Die im Kapitel beschriebene Regelung wird daher um eine Regelkaskade erweitert, wie in Abb. 3-16 dargestellt.

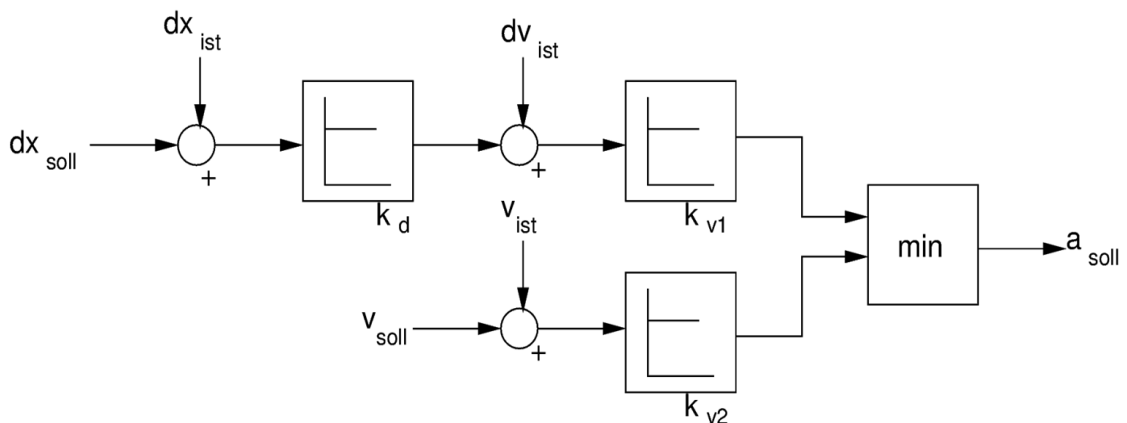


Abb. 3-16: ACC-Regler mit Berücksichtigung der Relativgeschwindigkeit

Dieses Regelprinzip kann nicht ohne Änderung des bisherigen Parameters k_d übernommen werden. Wie man erkennen kann, muss die Einheit von k_d nun s^{-1} betragen und nicht mehr s^{-2} . Es ändern sich auch die Werte von k_d und es ergibt sich nach der Applizierung von k_d nun eine Sollrelativgeschwindigkeit, die von der Istrelativgeschwindigkeit abgezogen wird. Die Differenz wird mit dem Koeffizienten eines neuen P-Gliedes k_{v1} multipliziert. k_{v1} hat die Einheit s^{-1} und somit ergibt sich eine Sollbeschleunigung. Nun hat man bei der Reglerabstimmung die Möglichkeit, den Einfluss der Relativgeschwindigkeit und den des Abstandes einzeln zu gewichten. Dies kommt in Verbindung mit der erkannten Verkehrssituation besonders zum Tragen.

Der bisherige Koeffizient k_v wird nun zu k_{v2} und kommt nach wie vor bei der Geschwindigkeitsregelung zum Einsatz. Hier sind keine Änderungen erforderlich.

Situationsbezogene Variation der Regelparameter

Die Regelparameter k_d , k_{v1} und k_{v2} bestimmen direkt die sich ergebende Beschleunigung bei

der Sollwertberechnung. Ihre Werte sind also dafür verantwortlich, ob eine Bremsung zügig bis ruppig oder sanft und komfortabel erfolgt. Es hängt jedoch vom aktuellen Verkehrsgeschehen ab, welches Verhalten gewünscht ist. Wenn z.B. auf der Autobahn ein Fahrzeug unmittelbar vor dem eigenen Fahrzeug einschert und dann die Geschwindigkeit schnell verringert, so ist eine zügige Bremsung unbedingt erforderlich, um eine Kollision zu vermeiden. Wenn jedoch das einscherende Fahrzeug nach dem Einscheren direkt beschleunigt oder bereits eine deutlich höhere Geschwindigkeit hat als man selbst, so ist dies nicht erforderlich, da eine Kollision nicht zu befürchten ist.

Diese Beispiele zeigen, dass die Steifigkeit des Regelkreises bei der Abstands- oder Geschwindigkeitsreglung nicht immer gleich bleiben, sondern alle verfügbaren Informationen zur Abstimmung einbeziehen sollte.

Der ursprüngliche Regler unterschied bereits zwischen Fahrten innerorts und Fahrten außerorts und verwendete hierfür als einziges Kriterium die Geschwindigkeit. Im Rahmen des Projekts wurden nun in zahlreichen Testfahrten ein neuer, erheblich erweiterter Situationskatalog und eine entsprechende Situationserkennung entwickelt, bei der sehr viel mehr Sensordaten genutzt werden.

Der Ausgangspunkt waren die folgenden Situationen:

- Freie Fahrt bei Geschwindigkeiten unter 50 km/h
- Freie Fahrt bei Geschwindigkeiten über 50 km/h
- Folgefahrt bei Geschwindigkeiten unter 50 km/h
- Folgefahrt bei Geschwindigkeiten über 50 km/h
- Stillstand

Diese Situationen können als Grundsituationen bezeichnet werden, wobei der Stillstand nicht der Parametrierung der Regelparameter dient, sondern als Zustand für die automatische Aktivierung und Deaktivierung der Regelung bedeutsam ist.

Als „freie Fahrt“ im Sinne der Regelung wird eine Fahrt bezeichnet, bei der kein Vorderfahrzeug vorhanden ist oder der Abstand zum Vorderfahrzeug so groß ist, dass dessen Betrachtung keine Rolle spielt. In diesem Fall ist die Wunschgeschwindigkeit die Führungsgröße (Geschwindigkeitsregelung). Bei der „Folgefahrt“ ist die Wunschgeschwindigkeit höher als die aktuelle Geschwindigkeit, jedoch fährt ein langsames Fahrzeug voraus, so dass der Abstand dazu zur Führungsgröße wird (Abstandsregelung). Die jeweiligen Situationen, so wie sie nach Abschluss der Testfahrten feststanden, werden im Verlaufe dieses Abschnitts weiter unten noch detailliert beschrieben.

In dieser Phase der Entwicklung wurden wiederholt folgende Schritte durchlaufen:

1. Erkennung eines unerwünschten Regelverhaltens durch den Fahrer
2. Reproduktion der Verkehrssituation, die zum unerwünschten Regelverhalten führt
3. Identifikation von Mustern, die sich zur algorithmischen Erkennung eignen (Geschwindigkeits- oder Abstandsverlauf usw.)
4. Implementierung und Verifizierung der Situationserkennung
5. Benennung und Priorisierung der Situation (Priorisierung durch Situationsnummer, s.u.)
6. Anpassung der Regelparameter für eine Verbesserung des Regelverhaltens
7. Erneute Simulator-Testfahrten und Wiederholung der Schritte 1 bis 6, bis kein unerwünschtes Regelverhalten mehr festgestellt wird

Eine Feinabstimmung der Regelparameter erfolgte jedoch nicht. Diesem Aspekt wurde in den abschließenden Tests Rechnung getragen.

Den Situationen wurden aus praktischen und programmiertechnischen Gründen Kurznamen und Nummern zugewiesen, so dass deren Erkennung durch einfache Diagnoseprogramme überwacht werden konnte. Im Falle der Autobox können Werte zur Laufzeit durch das Programm Controldesk beobachtet werden, so dass es nicht notwendig ist, einen eigenen Diagnosekanal über CAN-Bus oder Ethernet zu implementieren. Abb. 3-17 zeigt ein solches Diagnosefenster. Der obere Graph stellt die Historie der erkannten Situationen bzw. Situationsnummern da. Aktuell wird die Situation 40 („freie Fahrt“) erkannt. Darunter befinden

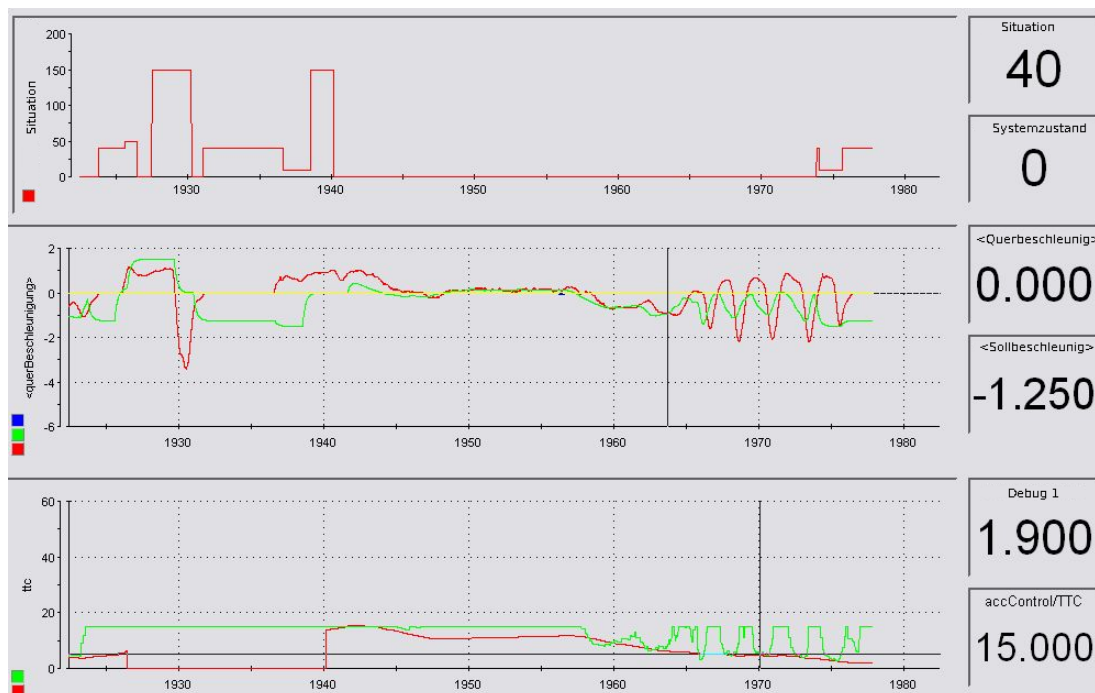


Abb. 3-17: Diagnoseoberfläche zur Erkennung der Situation (Controldesk)

sich Werte, deren Beobachtung bei der Testfahrt gerade bedeutsam war – in diesem Fall z.B. die Quereschleunigung und die sich ergebende Sollbeschleunigung.

Durch gezielte Beobachtung dieser Werte während der Fahrt gelang es in einem ersten Schritt, Muster zu erkennen, die eine Identifizierung der Verkehrssituation ermöglichen. Eine solche gezielte Beobachtung erfolgte immer dann, wenn während der Testfahrten festgestellt wurde, dass unter besonderen Umständen ein nicht optimales oder gar unerwünschtes Regelverhalten feststellbar war.

Dabei kommen die Fahrzeugsensoren (z.B. für die Erfassung von Geschwindigkeit, Längs- und Quereschleunigung, Lenkradwinkel, usw.) ebenso zum Einsatz wie die Umfeldsensoren (die z.B. Abstand und Relativgeschwindigkeit sensieren) und Werte, die das Regelsystem daraus ermittelt hat (z.B. Time to Collision). Gelegentlich war es möglich, in einem vorhandenen Versuchsfahrzeug eine ungefährliche Fahrsituation bei Fahrten im öffentlichen Straßenverkehr herbeizuführen. In anderen Fällen wurden mit Hilfe eines zweiten Versuchsfahrzeugs auf einer abgesperrten Teststrecke entsprechende Situationen hergestellt.

Da der Fahrer anhand der Sollzeitlücke in mehreren Stufen Einfluss auf die Regelung nehmen konnte, war es darüber hinaus notwendig, auch die jeweiligen Maximal- und Minimalwerte daraufhin zu überprüfen, ob durch den Einsatz des Systems unter diesen Umständen eine Gefährdung entstehen kann oder nicht. Im Falle einer gefährlichen Annäherung wurde jedoch nicht direkt die Regelung verändert, sondern eine Warnmeldung an den Fahrer veranlasst. Dem liegt die Entscheidung zugrunde, das ACC als Komfort- und nicht als Sicherheitssystem auszulegen. Ein Sicherheitssystem im Sinne eines Bremsassistenten kommt bei wesentlich einfacherer Struktur sequentiell hinter den Komfortsystemen zum Einsatz und war daher nicht Entwurfsziel. Jedoch würde eine zu häufige Warnung an den Fahrer ein deutliches Indiz dafür darstellen, dass das ACC eher eine Gefahrenquelle als eine Unterstützung wäre, weshalb hier jeweils ein Kompromiss zwischen Komfort und Sicherheit gesucht und gefunden wurde.

Wenn nun eine neue Situation identifiziert wurde, erhielt sie einen Namen und eine Nummer und die Situationserkennung wurde anhand der entsprechenden Eingangswerte im zweiten Schritt so konfiguriert, dass sie die Situation zuverlässig ermittelte.

Bei diesem Vorgang war festzustellen, dass es Situationen gab, die sich hinsichtlich ihrer Erkennung und auch hinsichtlich der Parametrierung nicht voneinander unterschieden, tatsächlich aber doch unterschiedlich waren. So ist z.B. bezüglich der Sensordaten das „Sich-zurückfallen-lassen“ kaum vom Einschervorgang eines schnelleren Fahrzeugs vor dem eigenen Fahrzeug zu unterscheiden und auch so zu behandeln. In solchen Fällen passen die Kurznamen der Situationen nicht immer zu den vom Menschen wahrgenommenen Situationen, die getroffenen Maßnahmen jedoch durchaus.

Im dritten Entwurfsschritt wurden dann die Regelparameter für die Sollwertermittlung mit dem Ziel angepasst, dass das Fahrverhalten sich möglichst so einstellt, als wenn ein Mensch Gas- und Bremspedal bedienen würde.

Dieses Ziel war im Rahmen der Sollwertberechnung nicht immer zu erreichen, weshalb die erkannte Situation auch in der nachgelagerten Filterkette (siehe Abschnitt 54) noch zur Verarbeitung zur Verfügung steht. So ist es zum Beispiel in der Sollwertberechnung nicht vorgesehen, die Sollbeschleunigung bei schneller Kurvenfahrt zu begrenzen. Das ist nicht möglich, da in den kaskadierten Regelkreis die Querschleunigung nicht als Rechengröße eingeht.

In den nachgelagerten Filtern jedoch steht diese Information zur Verfügung und kann in Verbindung mit der Fahrsituation für eine kurvenabhängige Begrenzung verwendet werden.

Nachdem alle bedeutsamen Situationen auf diese Weise berücksichtigt wurden, war es noch erforderlich, diese zu priorisieren, da sich bei der Erkennung prinzipbedingt Überschneidungen ergaben. So ist z.B. die Situation „Schnelle Annäherung an Vorderfahrzeug“ immer auch eine „Folgefahrt“, jedoch gegenüber der einfachen Folgefahrt höher zu priorisieren. Die Priorisierung erfolgt anhand der Situationsnummer. Situationen mit kleineren Nummern besitzen eine höhere Priorität als solche mit größeren Nummern. Diese Rangfolge entspricht sowohl dem Sprachgebrauch (Priorität „1“ gilt als höchst wichtig), als auch z.B. der Arbitrierung auf dem CAN-Bus, wo Botschaften mit niedriger ID sich gegenüber denen mit einer hohen ID durchsetzen.

Die möglichen Situationen sind nicht in der Struktur einer Zustandsmaschine organisiert. Diese Entscheidung basiert auf der Erkenntnis, dass ähnliche Situationen auftreten können, obwohl die Übergänge in diese Situationen und aus ihnen wieder heraus von grob unterschiedlicher Natur sind. Eine Zustandsmaschine muss darüber hinaus nicht nur definierte Übergänge enthalten, sondern auch vollständig sein. Wenn keine Kriterien erfüllt sind, die eine Situation eindeutig identifizieren, dann ist im aktuellen Modell eine Standardeinstellung vorgesehen, die noch sinnvollen Regelkomfort bietet. Diese Rückfallebene steht in der Zustandsmaschine nicht zur Verfügung, da immer ein bekannter und definierter Zustand herrschen muss.

Es folgt eine Diskussion der schließlich gefundenen Situationen sowie ihrer Erkennung und Bedeutung und deren Auswirkung auf die Regelung.

Freie Fahrt

Die freie Fahrt wird dadurch erkannt, dass vom Umfeldsensor die Abstandsinformation 0 m übertragen wird. Bei Entfernungen über 200 m, die außerhalb des Erfassungsbereichs des Sensors liegen, wird ebenfalls eine Entfernung von 0 m übertragen. Dieses Sensorverhalten muss bei Verwendung eines anderen Sensors geprüft werden, wobei durch die Adapterfunktion des Gateways, welches an den Versuchsträger angepasst ist, diese Werte gewährleistet werden.

Weiterhin muss für die Erkennung die Geschwindigkeit über eine Schwelle liegen, die vom Entwickler frei definiert werden kann. Die Geschwindigkeitsschwelle wurde u.a. eingeführt, um den Stillstand von freier Fahrt zu unterscheiden, wobei beim Stillstand je nach Sensortyp nicht

immer 0 km/h von den Fahrzeugsensoren übertragen wird. Typische Schwellen sind z.B. der Bereich oberhalb der kleinsten laut CAN-Protokoll darstellbaren Geschwindigkeit, die kleinste Geschwindigkeit, die so hoch ist, dass sie gerade nicht mehr rückwärts gefahren werden kann, oder auch die für den konkreten Einsatzfall erforderliche Mindestgeschwindigkeit bei der Aktivierung des Systems, falls kein Einsatz ab 0 km/h gewünscht ist.

Bei freier Fahrt spielen die Parameter k_{v1} und k_d keine Rolle. Über den Parameter k_{v2} wird die Differenz zwischen der Wunsch- und der Istgeschwindigkeit gewichtet und in eine Sollbeschleunigung überführt. Der Parameter wurde so gewählt, dass bei mäßiger Geschwindigkeitsverringerung in der Ebene lediglich das Motorschleppmoment zum Einsatz kommt, während eine aktive Bremsung erst ab einer zu hohen Istgeschwindigkeit von mehr als 40 km/h über v_{soll} erfolgt. Eine positive Beschleunigung erfolgt im Bereich bis 20 km/h Steigerung mit einer Sollbeschleunigung von bis zu $1,2 \text{ m/s}^2$. Die Beschleunigungsschnittstelle des Gateways erlaubt im Übrigen aus Komfortgründen keine Beschleunigungen von mehr als $1,5 \text{ m/s}^2$, um besonders im niedrigen Bereich ruckhaftes Anfahren zu vermeiden. Diese Grenze wird auch in der nachgelagerten Filterkette nochmals sichergestellt.

Diese Werte wurden den Testfahrern „abgeschaut“, denn das Beschleunigungsverhalten eines menschlichen Fahrers ist hier der Maßstab. Die Fahrversuche haben gezeigt, dass in diesem Fall glücklicherweise keine Unterscheidung zwischen positiver und negativer Beschleunigung bezüglich des Parameters k_{v2} erforderlich ist, um das gewünschte Verhalten zu erreichen.

Die aktuelle Geschwindigkeit wird ebenfalls für eine Unterscheidung der Geschwindigkeitsbereiche und damit für die Unterscheidung zwischen Autobahn und Stadtverkehr verwendet. Im Stadtverkehr Aachens ist eine freie Fahrt jedoch ein so seltenes Ereignis, dass dafür in den Testfahrten kein gesonderter Parameter ermittelt werden konnte. Obwohl es also zwei Situationen für freie Fahrt gibt, ändert sich der Parameter k_{v2} hier nicht. Die Priorität bzw. Nummer der Situation ist 150.

Wird eines der Erkennungskriterien verletzt, so wird die Situation verlassen. Üblicherweise ist dies der Fall, wenn entweder ein Fahrzeug vom Umfeldsensor erfasst wird, oder das eigene Fahrzeug stehen bleibt.

Heranfahren (Anrobben)

Die Situation „Heranfahren“ ist mit der Priorität 20 gekennzeichnet und soll den Übergang zwischen einer freien Fahrt ohne Sensorziel und der geregelten Folgefahrt komfortabel gestalten. Um sie zu erkennen muss ein Fahrzeug vom Umfeldsensor erfasst worden sein, dessen Relativgeschwindigkeit negativ ist. Darüber hinaus dürfen der Sollabstand bzw. der Wunschabstand noch nicht unterschritten sein.

Der Wunschabstand ergibt sich aus der direkt vom Fahrer gewählten Zeitlücke und der aktuellen Geschwindigkeit, wobei noch ein absoluter Sicherheitsaufschlag erfolgt. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die von Fahrer gewählte Zeitlücke für diesen nicht als Wert in

Sekunden erkennbar ist, sondern lediglich als Schaltstufe, deren Einzelschritte durch Abstandsbalken grafisch dargestellt werden.

Zusätzlich tritt diese Situation auch ein, sollte ein Zielfahrzeug stark beschleunigen und so drohen, aus dem Bereich der geregelten Fahrgasse zu entweichen. Die Ermittlung der Sollbeschleunigung erfolgt nun anhand der Parameter k_{v1} und k_d , da nun Relativgeschwindigkeit und Abstand zu berücksichtigen sind.

Auch hier wird durch die Sollbeschleunigungsschnittstelle des Fahrzeugs bzw. durch das Gateway maximal eine positive Beschleunigung von ca. $1,5 \text{ m/s}^2$ umgesetzt, um den eingestellten Wunschabstand zu erreichen.

Zusätzlich zur allgemeinen Annäherung wurde eine weitere Situation für die schnelle Annäherung auf Landstraßen und Autobahnen mit der Priorität 160 eingeführt, um bei hohen Relativgeschwindigkeiten (z.B. mehr als 20 km/h) besser auf die drohende Auffahrgasse reagieren und so stärker abbremsen zu können. Zur Abgrenzung wird wieder die Geschwindigkeit herangezogen.

Bei Erreichen der Wunschgeschwindigkeit oder des Wunschabstandes werden die jeweiligen Heranfahr-Situationen verlassen und münden meist in die geregelte Fahrgasse oder in die freie Fahrt.

Schnelle Annäherung bei niedriger Geschwindigkeit

Im innerstädtischen Bereich kommt es häufig zum Wechsel des Fahrstreifens sowie zu Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen. Die besondere Dynamik des engen Stadtverkehrs erfordert eine andere Abstimmung, als die von weniger Wechseln begleitete Fahrt außerhalb. Häufig treten dabei vergleichsweise hohe Relativgeschwindigkeiten auf, da größere Abstände zum Vorderfahrzeug gerne von benachbarten Fahrstreifen aus besetzt werden.

Die Annäherung an ein Fahrzeug im Stadtverkehr muss daher zügiger erfolgen, als auf der Landstraße, wobei es gilt, Abstände schnell auf ein akzeptables Niveau zu verkleinern. Aufgrund der geringeren Geschwindigkeiten lässt sich das zügig beschleunigende Fahrzeug mit moderaten Bremsbeschleunigungen immer noch sicher abbremsen, wobei hier darauf zu achten ist, dass die Annäherung an das Vorderfahrzeug nicht so dicht erfolgt, dass der Umfeldsensor das Ziel verliert.

Für die Erkennung dieser Situation muss ein Fahrzeug erkannt sein, die Relativgeschwindigkeit im hohen negativen Bereich liegen und die eigene Geschwindigkeit darf eine festgelegte Schwelle nicht überschreiten.

Schnelle Annäherung im hohen Geschwindigkeitsbereich

Auf Autobahnen und Landstraßen kommt es vor, dass man selbst auf ein deutlich langsames

Fahrzeug aufschließt. Das können ein Lkw auf der Autobahn oder ein Traktor auf der Landstraße sein. Da hier die Geschwindigkeit meist recht hoch ist, muss der Regler frühzeitig eine Bremsung einleiten, um keine gefährliche Situation herbeizuführen. Die Relativgeschwindigkeiten liegen hierbei deutlich höher als im innerstädtischen Bereich. So sind Unterschiede von 50 km/h und mehr möglich.

Die Sollwertbildung erreicht hier durch eben diese hohen Relativgeschwindigkeiten zum Teil Verzögerungswerte, die vom Fahrer als unnötig ruppige Bremsung empfunden werden. Es zeigte sich, dass eine Abschwächung des Einflusses der Relativgeschwindigkeit, also eine Verringerung von k_{v1} , bei Beibehaltung des Abstandsbeiwertes k_d , zu einer harmonischeren Annäherung führen, ohne dass sich ein Gefühl der Unsicherheit einstellen würde.

Überholwunsch

Wenn die Wunschgeschwindigkeit noch nicht erreicht ist und das Egofahrzeug sich an ein Vorderfahrzeug annähert, führt ab einer Geschwindigkeit von 60 km/h die zusätzliche Erkennung des Linksblinkens dazu, dass der Abstandsweit k_d herabgesetzt wird. Auf diese Weise „zieht“ sich das Egofahrzeug relativ dicht an das Vorderfahrzeug heran, wie es bei Überholvorgängen oft zu beobachten ist. Auf diese Weise verringert sich die Häufigkeit, mit der Fahrer in solchen Situationen das ACC-System überstimmt, indem er Gas gibt.

Die Geschwindigkeitsschwelle ist nötig, um den Vorgang von einem bevorstehenden Linksabbiegen zu unterscheiden.

Wird der Blinker wieder deaktiviert ohne zu überholen, erfolgt je nach Abstand eine recht deutliche Bremsung, da der tatsächliche Abstand zu diesem Zeitpunkt unter Umständen erheblich unter dem Wunschabstand liegt.

Einscheren

Wenn der Umfeldsensor einen plötzlichen Abstandssprung von -8 m oder mehr übermittelt oder wenn ein Ziel plötzlich vor dem Egofahrzeug auftaucht, obwohl vorher keines da war, wird die Situation Einscheren erkannt. Zusätzlich wird noch unterschieden, ob das einscherende Fahrzeug eine positive oder eine negative Relativgeschwindigkeit gegenüber dem Egofahrzeug aufweist.

Bei negativer Relativgeschwindigkeit wird die Geschwindigkeit an das Vorderfahrzeug angeglichen, wobei die Verzögerung, mit der dies geschieht, vom Abstand abhängt und bei sehr geringem Abstand entsprechend kräftig ausfällt.

Ist die Relativgeschwindigkeit positiv, so wird der Abstandsbeiwert k_d herabgesetzt, um eine harte Bremsung zu vermeiden. Denn da das Vorderfahrzeug sich bei positiver Relativgeschwindigkeit entfernt, wird der Abstand nicht nur durch eine Bremsung des Egofahrzeugs allein, sondern auch durch die Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs wiederhergestellt.

Diese Situation endet oft durch Erkennung einer Folgefahrt oder durch Erkennung einer freien Fahrt. Da jedoch der Einschervorgang nur durch einen kurzen Zeitraum des Einschierens selbst erkannt wird, existiert eine Übergangssituation, die zwingend auf einen erkannten Einschervorgang und die Situation „Einschieren“ folgt und die entsprechenden Regelparameter für eine Mindestdauer auf ihrem Wert hält. Diese „Nach dem Einschieren“-Situation hält für mindestens zwei Sekunden an, nachdem ein Einschervorgang, erkannt wurde, dessen Erkennung ja lediglich zwischen zwei Sensorzyklen erfolgt und der somit nur als einmaliger Wert von der Situationserkennung übertragen wird.

Es spielt für die Anpassung der Regelung keine Rolle, ob der Einschervorgang vom eigenen Fahrzeug verursacht wurde (z.B., weil man sich vor einer Autobahnausfahrt zwischen zwei Lkw auf die rechte Spur begibt) oder ob ein Fahrzeug von einem benachbarten Fahrstreifen aus vor das Egofahrzeug zieht.

Zurückfallen

Wenn ein Vorderfahrzeug leicht abbremst oder nach der Situation „Nach dem Einschieren“, wird der Abstand zum Vorderfahrzeug in der Regel als Reaktion des Reglers wieder vergrößert, nachdem dieser zunächst unter den Sollabstand fiel. Dieser Zustand wird als „Zurückfallen“ erkannt, wenn die Relativgeschwindigkeit positiv, der Sollabstand unterschritten und die Wunschgeschwindigkeit ebenfalls unterschritten ist.

Somit dient der Zustand primär der allmählichen Wiederherstellung des Wunschabstandes bei der Abstandsregelung und wird nicht erkannt, wenn das Vorderfahrzeug eine höhere Geschwindigkeit als die eigene Wunschgeschwindigkeit einnimmt. Hier tritt beim Egofahrzeug dann die Situation „Freie Fahrt“ ein, sobald der Abstand groß genug ist.

Beim „Zurückfallen“ versucht der Regler, die Geschwindigkeit mäßig zu drosseln, ohne die Bremse zu benutzen. Für dynamischere Situationen existiert die bereits besprochene Situation „Schnelle Annäherung“. Die Unterscheidung zwischen diesen Situationen liegt dann auch in der höheren Relativgeschwindigkeit und in deren Vorzeichen.

Anhalten

Bei einer sogenannten Stop & Go-ACC-Regelung (auch als FSRA – Full Speed Range ACC bezeichnet) erfolgt eine Regelung bis zum Stillstand des Egofahrzeugs und innerhalb einer gewissen Zeitspanne fährt das Fahrzeug auch selbständig wieder an. Wenn das erfasste Vorderfahrzeug bereits steht und das Egofahrzeug sich langsam annähert, wird die Situation „Anhalten“ erkannt. Oft, aber nicht immer, mündet diese in die Situation „Stillstand“.

Eine besondere Erkennung des Anhaltens war erforderlich, um Schwächen der Bremsregelung des Versuchsträgers auszugleichen, der im Bereich sehr niedriger Geschwindigkeiten von unter ca. 5 km/h ohne besondere Maßnahmen keine sanfte Bremsung bewerkstelligen kann. Es gibt nur einen kleinen Bereich für die vorgegebene

Bremsbeschleunigung, die dazu führt, dass der Versuchsträger weder ruckartig und hart bremst, noch die Bremse löst und beschleunigt. Die verfügbaren Sollbeschleunigungen werden bei dieser Situation auf diesen Bereich hin saturiert. Die Anpassung an die erkannte Situation „Anhalten“ wird in der nachgelagerten Filterkette realisiert und im Abschnitt 54 erläutert.

Stillstand

Wenn die Geschwindigkeit unter einen festgelegten Mindestwert fällt, der i.d.R. die technische Schwelle der Geschwindigkeitsmessung markiert, wird Stillstand erkannt. Im Stillstand wird die Sollbeschleunigung auf einen Wert gesetzt, der dazu führt, dass die recht ungenaue Bremsregelung die Bremse nicht unabsichtlich löst, was ein Anfahren des Fahrzeugs zur Folge hätte. Die Bremsregelung des Versuchsträgers reagiert auf eine Verringerung der Bremsbeschleunigung von z.B. -2 m/s^2 auf -1 m/s^2 nicht nur mit einer Verringerung des Bremsdrucks, sondern löst die Bremse kurzzeitig vollständig. Da durch die beim Automatikgetriebe eingelegte Fahrstufe immer ein leicht positives Drehmoment anliegt, fährt das Fahrzeug sofort an. Nun messen die Fahrzeugsensoren folgerichtig eine positive Beschleunigung, die mit dem Zustand „Anhalten“ oder „Stillstand“ nicht in Einklang zu bringen ist. Die Regelung geht also von der Situation „Anfahren“ aus und parametriert die Beiwerte so, dass das Anfahren sanft erfolgt.

Daher muss auch der Stillstand als eine Situation betrachtet werden, die nicht der Beschleunigungsregelung, sondern dem Ausgleich einer Schwäche des Versuchsträgers geschuldet ist. Sie wird ebenfalls über die Filterkette umgesetzt und in Abschnitt 54 diskutiert.

Der Stillstand wird wie folgt erkannt:

- Das eigene Fahrzeug hat die Geschwindigkeit 0 km/h (ggf. wird Rauschen der Messwerte durch ein Totband berücksichtigt).
- Ein Vorderfahrzeug ist im Erfassungsbereich und steht (hier wird ebenfalls anhand eines Totbandes ein Messwertrauschen berücksichtigt). Das ist nur möglich, wenn es bereits erfasst wurde, als es noch fuhr.

Anfahren

Durch die geringe Übersetzung bei niedrigem Gang steht dem Fahrzeug beim Anfahren ein erheblich höheres positives Beschleunigungsvermögen zur Verfügung, als während einer Fahrt im bereits fließenden Verkehr. Wenn der Fahrer nun bei freiem Fahrstreifen das System mit einer hohen Differenz zwischen Soll- und Istgeschwindigkeit (letztere ist ja ohnehin 0 km/h) aktiviert, führt das bei der Sollwertbildung zu hohen positiven Beschleunigungen, die von den Fahrzeuginsassen als unkomfortabel empfunden werden.

Gleichzeitig soll das Anfahren aber z.B. an einer Ampel, die wieder auf grün umschaltet, so zügig erfolgen, dass der Fahrer nicht den Wunsch verspürt, das System durch Gasgeben zu

überstimmen.

Die feine Abstimmung auf diese Anforderungen gelang nur durch das Einführen der Situation „Anfahren“, welche sowohl auf die Regelbeiwerte, als auch auf die Postfilter eine Auswirkung hat.

Sie wird anhand folgender Kriterien erkannt:

- Das Fahrzeug befand sich im Zustand „Stillstand“.
- Der Umfeldsensor erfasst entweder kein Vorderfahrzeug oder stellt eine positive Relativgeschwindigkeit fest.
- Die aktuelle eigenen Längsbeschleunigung ist positiv.
- Die Wunschgeschwindigkeit ist unterschritten (was sich ohnehin ergibt).

Folgefahrt

Die Folgefahrt wird angenommen, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Die Wunschgeschwindigkeit ist nicht erreicht.
- Es befindet sich ein Fahrzeug im Erfassungsbereich des Umfeldsensors vor dem Egofahrzeug auf demselben Fahrstreifen.
- Die Relativgeschwindigkeit befindet sich innerhalb eines definierten Bereichs nahe 0 km/h.
- Der Linksblinker ist nicht gesetzt.

Die Folgefahrt unterscheidet noch zwischen zwei verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen, um eine Abstimmung für Autobahn und Landstraße einerseits, und Stadtverkehr andererseits zu ermöglichen.

Abstimmungsziel ist hier ein Folgeverhalten, bei dem das eigene Fahrzeug mit möglichst geringen Beschleunigungen dem Vorderfahrzeug in einem Abstand folgt, der vom Fahrer als angemessen empfunden wird. Diesen Abstandsbereich kontrolliert der Fahrer auch mit der gewünschten Zeitlücke. Bei dichtem Verkehr kann der Fahrer eine kleine Zeitlücke wählen und auf diese Weise die Wahrscheinlichkeit verringern, dass ein Fahrzeug sich von einem benachbarten Fahrstreifen aus vor das eigene Fahrzeug setzt (Kolonnenspringen). Dabei ergeben sich durch den Abstandszweig in der Regelung auch höhere Beschleunigungen. Ist der Verkehr weniger dicht, so ermöglicht eine große Zeitlücke ein entspanntes „Mitschwimmen“ bei niedrigen Beschleunigungen.

Dabei kann es vorkommen, dass der Abstand durch Beschleunigen oder Abbremsen des Vorderfahrzeugs in einen Bereich kommt, der mit dem Zustand „Folgefahrt“ nicht vereinbar ist. In diesem Fall stellen sich kurzzeitig die Situationen „Heranfahren“ oder „Zurückfallen“ ein.

Nachgelagerte Filterkette

Nachdem ein Sollwert für die Beschleunigung errechnet wurde, wird dieser an eine dem Berechnungsprozess nachgelagerte Filterkette übergeben. Hier finden Anpassungen statt, die nicht durch die Beiwerte der Regelkettenglieder abgedeckt werden können oder die zu Gunsten einer klaren Struktur nicht in die Sollwertbildung eingehen sollen. Den Filtern stehen dabei alle Informationen zur Verfügung, die sich aus der Sensorik, den Benutzereingaben oder aus der bisher stattgefundenen Datenverarbeitung ergeben, wie z.B. die aktuelle Situation oder die TTC. Auf einige der Filter soll im Folgenden näher eingegangen werden.

Ruckbegrenzung

Über zwei diskrete Zeitschritte hinweg lassen die Ruckbegrenzungsfiler nur eine bestimmte Veränderung in positive und negative Richtung zu, wobei die Grenzwerte für Bremsen und Beschleunigen einzeln konfigurierbar sind.

Da ein Beschleunigungsruck von unterschiedlichen Probanden nicht bei einem einheitlichen Wert als zu stark oder komfortabel empfunden wird, ist eine ausgegliederte Konfiguration sinnvoll, da sie die leichte Anpassung des Wertes erlaubt und ein weiteres Verständnis der Regelalgorithmik nicht erforderlich ist. Darüber hinaus hat die Änderung der Beschleunigungsanforderung auf unterschiedlichen Fahrzeugen, insbesondere bezüglich einer Bremsung, unterschiedliche Auswirkungen, was die Qualität der Umsetzung angeht. So ist es möglich, durch eine großzügige Filterung eventuelle Schwächen einer Bremsanlage etwas auszugleichen.

Saturierung der Beschleunigung

Um zu vermeiden, dass bei sehr hohen Unterschieden zwischen der Wunsch- und der Istgeschwindigkeit eine unangenehm hohe Beschleunigung auftritt, die je nach verfügbarem Motormoment und angeforderter Beschleunigung darüber hinaus noch häufigen Wechseln unterworfen ist, wurde eine geschwindigkeitsabhängige Beschleunigungsbegrenzung nach oben und unten in Form eines Beschleunigungsbandes umgesetzt. Sie kommt häufig bei der Reaktivierung des Systems nach einem Stillstand zum Einsatz, wo das Fahrzeug für einen kurzen Moment erhebliche Beschleunigungen umsetzen könnte, die einem Kavaliertart nahe kämen.

Kurzzeitiger Verlust des Radarziels

Aufgrund technischer Einschränkungen des Radarverfahrens führen Reflexionen und Abschattungen zur Notwendigkeit der aufwändigen Interpretation durch Softwarealgorithmen, was bei intelligenten Sensoren schließlich zur Ausgabe eines aufbereiteten Radarziels führt. Dabei werden Objekte, die kurzzeitig nicht mehr erkennbar sind, für einen Moment nachgehalten und die sprunghafte Veränderung von Positionen durch Tiefpassfilterung auf ein physikalisch mögliches Maß reduziert. Dennoch kommt es noch vor, dass auch ein Sensor mit sehr hoch entwickelter Software ein Radarziel „verliert“, obwohl dies sich noch im

Erfassungsbereich befindet.

Mit dieser Situation muss die ACC-Regelung dahingehend umgehen können, dass nicht sofort die Situation „Freie Fahrt“ erkannt wird bzw. dass nicht sofort die Sollbeschleunigung so hoch gesetzt wird, dass sich der Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug gefährlich verringert. Der entsprechende Postfilter verhindert bei erkannten Zielverlust, dass positiv beschleunigt wird, während Bremsungen natürlich erlaubt bleiben. In der Praxis bedeutet das, dass das Egofahrzeug ohne zu beschleunigen weiter rollt, bis das Ziel wieder erfasst wurde oder davon auszugehen ist, dass wirklich kein Fahrzeug mehr vorausfährt.

Anhaltebeschleunigung

Die schlechte Umsetzung der Sollbeschleunigung im sehr niedrigen Geschwindigkeitsbereich im Versuchsträger führte dazu, dass bei Verringerung der Bremsbeschleunigung die Bremse kurzzeitig gelöst wurde. Abhilfe schafft ein Filter, der bei erkannter Situation „Anhalten“ lediglich noch eine Verstärkung der Bremsung, nicht jedoch eine Verringerung bis zu einem bestimmten Maß ermöglicht. Bei Unterschreiten einer weiteren Geschwindigkeitsschwelle wird, ausreichend Abstand vorausgesetzt, eine konstante Bremsbeschleunigung bis zum Stillstand gehalten. Dies führt i.d.R. zu einem sehr sanften Anhaltevorgang.

Eintauchgrenze

Als Sicherheitselement überwacht die Software vollkommen unabhängig von der Sollwertbildung und der Situationserkennung den Abstand zum Vorderfahrzeug sowie die eigene Beschleunigung und Geschwindigkeit. Der Regler ist grundsätzlich so parametrierung, dass der zeitliche Abstand („Zeitlücke“) einen vorher definierten Mindestwert nicht unterschreitet, der in ISO 22179 auch „Clearance“ genannt und für den ein Wert über 2,0 m gefordert wird. Sollte dennoch aufgrund besonderer Situationen, wie z.B. das plötzliche Abbremsen des Vorderfahrzeugs, eine Unterschreitung der harten Eintauchgrenze drohen, kann dieser Filter warnen und bei Bedarf auch die negative Beschleunigung verstärken. Der Bremsengriff durch diesen Filter ist jedoch derzeit deaktiviert, da es sich beim verwendeten Radarsensor um einen Prototyp handelt.

Lenkradwinkel-Beschleunigungsbegrenzung

Wenn der Lenkradwinkel einen bestimmten Wert, der über eine Kennlinie von der Geschwindigkeit abhängig ist, überschreitet, wird keine positive Beschleunigung mehr zugelassen. Auf diese Weise kann in Kurven, in denen es aufgrund einer Überhöhung des Kurvenäußeren zu einem geringen Anstieg der Querschleunigung kommt, die Beschleunigung begrenzt werden.

Lenkradwinkel-Anfahrerschutz

Um zu verhindern, dass das Fahrzeug bei stark nach links eingeschlagenem Lenkrad beim

Anfahren sofort auf die Gegenfahrbahn gerät, weil z.B. der Fahrer während des Stillstandes im Stop & Go-Passiv-Modus das Lenkrad bewegt hat, wird ein Wiederaufahren ab einem Lenkradwinkel-Schwellwert unterbunden.

Maximale Querschleunigung

Um in Kurven nicht bis zur eingestellten Wunschgeschwindigkeit zu beschleunigen, sondern bei Erreichen einer gewissen Komfortgrenze bezüglich der Querschleunigung die Geschwindigkeit konstant zu halten, existiert dieser Filter. Bei der Querschleunigungsgrenze handelt es sich um eine geschwindigkeitsunabhängige Beschleunigungsgrenze. Sie hilft der Regelung auch, wenn aufgrund des geringen Kurvenradius der Umfeldsensor das Ziel verliert.

4 Zusammenfassung

Die Automatisierung des Straßenverkehrs adressiert wesentliche gesellschaftliche Ziele:

- die Verbesserung der Verkehrssicherheit durch eine signifikante Reduzierung der Anzahl von Unfällen und somit von Verletzten und Toten
- die Verbesserung der Verkehrseffizienz und damit insbesondere auch der verkehrsbedingten Emissionen
- die Verbesserung der Mobilitäts-Souveränität von Menschen, die bisher aufgrund ihres Alters nicht mehr selbstbestimmt und eigenständig individuell mobil sein können.

Auf dem Weg zu diesen Zielen gibt es zahlreiche grundlegende Fragestellungen wissenschaftlicher und technischer Art zu bearbeiten und Lösungen herbeizuführen. Um diese Untersuchungen, die in vielen Fällen auch den Einsatz von Probanden erfordern, gefahrlos durchführen zu können, ist vor allem im frühen Entwicklungsstadium einzig die Methode Fahrsimulation geeignet. Aus diesem Grund ist im Rahmen des Vorhabens ein hochdynamischer Fahrsimulator hinsichtlich seiner Anforderungen definiert, beschafft und in Betrieb genommen worden, der dem Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen und seinen zahlreichen Forschungspartnern die genannten Untersuchungen ermöglicht.

Darüber hinaus wurden wesentliche Softwareelemente entwickelt, die für den Betrieb und vor allem die valide Darstellung der zu simulierenden Fahrzeugbewegung elementar sind. Pilothaft konnte die zukünftige Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug, die sich mit fortschreitenden Automatisierungsgraden ergibt, untersucht werden. Hier hat sich gezeigt, dass insbesondere eine Vereinfachung der heute noch Einzelsystem-bezogenen Regler und Schalter hin zu einer einfachen und intuitiven Steuerung erfolgen muss.

Die Methode Fahrsimulation steht dank des Vorhabens nun der gesamten Forschungslandschaft in Form des hochdynamischen Fahrsimulators zur Verfügung. Sie ermöglicht, die Wirksamkeit beginnend bei Fahrerassistenzsystemen und hin zu hoch- und vollautomatisierten Fahrfunktionen zu untersuchen. Auf dieser Grundlage kann der Absicherungsaufwand, der zur Sicherstellung von Wirksamkeit und Betriebs- bzw. Bediensicherheit erfolgen muss, effizient betrieben werden. Somit steht ein wesentliches Werkzeug für die erfolgreiche Einführung einer zunehmenden Anzahl automatisierter Fahrzeuge zur Verfügung und somit die Sicherstellung der Zukunftsfähigkeit der deutschen Automobilindustrie, die ein zunehmendes Zusammenspiel mit IT-Unternehmen erfordert.

5 Literatur

- [DIN01] N.N.
DIN-Norm: „Systematik der Straßenfahrzeuge – Begriffe für Kraftfahrzeuge, Fahrzeugkombinationen und Anhängerfahrzeuge“
DIN 70010:2001-04, Beuth-Verlag
Berlin 2001
- [ECK09] Eckstein, L.
Längsdynamik von Kraftfahrzeugen
Vorlesungsumdruck RWTH Aachen
Aachen, 2009
- [ECK10] Eckstein, L.
Aktive Fahrzeugsicherheit und Fahrerassistenz
Vorlesungsumdruck RWTH Aachen
Aachen, 2010
- [HAK11] Haken, K. L.
„Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik“
Carl Hanser Verlag
München, 2011
- [HEI09] N.N.
„Europäisches Parlament stimmt ESP-Pflicht zu“
Heise-Verlag
<http://www.heise.de/autos/artikel/Europaeisches-Parlament-stimmt-ESP-Pflicht-zu-476269.html>
Hannover, 2009
- [HEN12] Henne M., Josten J., Zlocki A., Eckstein L.
„Untersuchung des Fahrverhaltens beim Übergang zwischen automatisiertem und manuellem Fahren“
Projektbericht
Aachen, 2012
- [KBA09] N.N.
„Segmente – Die meisten sind kompakt“
Kraftfahrtbundesamt
Statistik über den Bestand an Personenkraftwagen am 01. Januar 2009
http://www.kba.de/Cln_015/nn_212378/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Segmente/2009__b__segmente__kompakt__tabelle.html
Flensburg, 2009

- [KBA10] N.N.
„Methodische Erläuterung zu Statistiken über Fahrzeugzulassungen“
Kraftfahrtbundesamt
http://www.kba.de/ckn_015/nn_212378/DE/Statistik/Fahrzeuge/fz__methodische__erlaeueterungen__200901__pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/fz_methodische_erlaeueterungen_200901_pdf.pdf
Flensburg, 2009
- [NAU12] Naujoks F., Grattenthaler H., Neukum A.
„Zeitliche Gestaltung effektiver Fahrerinformation zur Kollisionsvermeidung auf Basis kooperativer Perzeption“
Tagungsband zum „Workshop Fahrerassistenzsysteme“
Walting, 2012
- [SAB09] Sabbert, D.
„CAN-Datenbusse“
Vorlesungsfolien FST09, Ostfalia
Wolfsburg, 2009
- [STA13] N.N.
„Anzahl der bei Straßenverkehrsunfällen Getöteten in Deutschland von August 2012 bis August 2013“
<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/161724/umfrage/verkehrstote-in-deutschland-monatszahlen/>
Statista GmbH, abgerufen am 14.11.2013
Hamburg 2013
- [WAL05] Wallentowitz, H.
„Strukturentwurf von Kraftfahrzeugen“
ISBN 3-925-194-71-1
Aachen, 2005