

Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme
der Technischen Universität München

Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen

Michael Schraut

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Manfred Lang

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Färber
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. Friedrich Schneider

Die Dissertation wurde am 30.05.2000 bei der Technischen Universität eingereicht
und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 20.11.2000
angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der BMW Group in der Forschungsabteilung für Fahrerassistenzsysteme. Die Arbeit wurde in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme der Technischen Universität München angefertigt.

Insbesondere möchte ich mich hiermit bei Prof. Dr. Färber und Prof. Dr. Schneider für Ihre Unterstützung bei dieser Arbeit und Ihr Vertrauen in die Zielsetzung der Arbeit bedanken. Besonderen Dank für die fortwährende Begleitung möchte ich hier auch an meinen Betreuer bei der BMW Group, Dr. Karl Naab richten.

Bei meinen Kollegen und Vorgesetzten in der Forschungsabteilung, aus verschiedenen anderen Fachabteilungen bei der BMW Group und den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme möchte ich mich für die Unterstützung und für die wertvollen Diskussion bzw. Anregungen über die Thematik dieser Arbeit bedanken.

Ebenfalls bedanke ich mich für die Unterstützung durch die Praktikanten bzw. Diplomanden, die Teile zu der Arbeit beigetragen haben.

Schließlich bedanke ich mich bei allen weiteren Personen, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG	1
1.1. Automatisierung im Straßenverkehr	1
1.2. Aufgabenstellung	5
1.2.1. Ansätze zur Realisierung	7
1.3. Stand der Technik.....	9
1.4. Aufbau der Arbeit.....	12
2. FAHRZEUGPOSITIONIERUNG.....	13
2.1. Positionsbestimmung.....	13
2.2. GPS - ein Überblick	14
2.2.1 Koordinatensysteme	16
2.2.2 Differential GPS	19
2.2.3. Carrier Phase Differential GPS	22
2.2.4. Referenzsysteme im Vergleich.....	24
2.3. Koppelnavigation	25
2.3.1. Kalman-Bucy-Filter zur Positionsfortschreibung.....	27
2.4. Map-Matching	30
2.4.1. Lotabbildung.....	31
2.4.2. Qualitätsbestimmung	32
2.4.3. Mehrfachzuordnungen	33
3. DIGITALE KARTEN	35
3.1. Überblick.....	35
3.2. Standardisierung.....	35
3.3. Genauigkeit, Verfügbarkeit, Beispiel.....	36
3.4. Beschreibung der digitalen Navigationskarte.....	38
3.4.1. Aufbau der digitalen Navigationskarte.....	38
3.4.2. Wichtige Eigenschaften von Straßenstücken.....	39
3.4.3. Zugriff auf die digitalen Navigationskarten	40
3.5. Anforderungen an Karten	41
3.5.1. Karten der 2.Generation (Längsregelungssysteme).....	41
3.5.2. Karten der 3.Generation (Querregelungssysteme)	42
3.5.3. Genauigkeit der Attribute.....	43
3.6. Relational DataBase Managment System	45
3.6.1. Aufbau der RDBMS.....	46
3.6.2. Beschreibung der Daten und Relationen	47
3.6.3. Versuchsgebiet	49
3.6.4. API, Schnittstelle zur Applikation.....	50
3.6.5. Bestimmung der Vorausschau	53
3.6.6. Vorverarbeitung der Geometriedaten.....	53
4. LERNEN.....	59
4.1. Problembeschreibung	59
4.2. Geometrie	60
4.2.1. Verändern vorhandener Geometrie.....	61
4.2.2. Erzeugung neuer Punkte.....	63
4.2.3. Zuordnung der neuen Daten	63
4.2.4. Erzeugung von Geometriedaten aus Messungen	67
4.2.5. Aufbau einer cm-genauen Karte	70
4.3. Attribute	72
4.3.1. Verkehrsschilder.....	72
4.3.2. Geschwindigkeiten	73

4.3.3. Straßeneigenschaften	74
4.3.4. Routen.....	74
4.4. Nachbearbeitung von Karten	75
4.5. Lernen im Kollektiv	76
4.5.1. eXtended Floating Car Data.....	77
5. ANWENDUNGEN	78
5.1. Längsregelung	79
5.1.1. Längsregelungsanwendung	79
5.1.2. Kurvengeschwindigkeiten.....	80
5.1.3. Beschleunigungen.....	86
5.1.4. Sportlichkeitsparameter.....	87
5.1.5. Weitere geschwindigkeitsbeeinflussende Attribute	87
5.1.6. Mensch Maschine Interface	88
5.2. Querregelung (Heading Control).....	89
5.2.1. Eingangsgrößenberechnung	90
5.3. ALC (Adaptive Light Control)	92
5.3.1. Steuerung über Kartendaten.....	93
5.3.2. Steuerung über Kartendaten und Fahrdynamik	95
5.3.3. Allgemeines zum System	95
5.4. Weitere Anwendungen	96
5.4.1. SAM (Situations Adaptives Antriebsmanagment)	96
5.4.2. ACC (Active Cruise Control).....	97
6. BEWERTUNG	99
6.1. Ziel der Bewertung.....	99
6.2. Vorbereitungen	99
6.2.1. Versuchsgebiet	99
6.2.2. Fragebogen.....	101
6.2.3. Expertenbefragung.....	101
6.2.4. Fahrdaten.....	103
6.2.5. Stichprobe	103
6.3. Versuchsdurchführung.....	103
6.4. Ergebnisse	104
6.4.1. Einschätzung des Fahrstils vor und nach der Fahrt	104
6.4.2. Empfinden	106
6.4.3. Eignung	108
6.4.4. Beeinflussung des Fahrers durch NavSpeed.....	109
6.4.5. Beeinflussung von Fahrstil und Fahrerleben	110
6.4.6. Ergebnisse Fahrdaten	111
6.5. Beurteilung und Zusammenfassung der Ergebnisse	112
6.5.1. Ausblick.....	113
7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	115
7.1. Zusammenfassung	115
7.2. Ausblick	118
Anhang.....	122
A. Befragung.....	122
A.1. Fragebogen	122
A.2. Kommentare der Versuchspersonen	130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Objektbewertung ohne Umgebungsinformation	4
Abbildung 1-2: Objektbewertung mit Umgebungsinformation	4
Abbildung 1-3: Umgebungsmodell	6
Abbildung 1-4: Übersicht der Aufgabe.....	7
Abbildung 1-5: Längsregelung auf Basis digitaler Karten.....	8
Abbildung 1-6: Querablage und Richtungsfehler eines Fahrzeuges	9
Abbildung 2-1: GPS-Satellitenkonstellation.....	14
Abbildung 2-2: GPS-SPS-Messung.....	15
Abbildung 2-3: Koordinatensystem.....	17
Abbildung 2-4: Oberfläche des Ellipsoids.....	18
Abbildung 2-5: Fehlerabschätzung bei vereinfachter Entfernungsberechnung	19
Abbildung 2-6: Prinzip von Differential GPS	20
Abbildung 2-7: Beispiel einer Differential GPS-Messung	21
Abbildung 2-8: Beispiel einer Carrier Phase Differential GPS-Messung	22
Abbildung 2-9: Bild der Referenzstation	23
Abbildung 2-10: Genauigkeiten im Vergleich	25
Abbildung 2-11: Positionsfortschreibung	26
Abbildung 2-12: Realisierung eines Kalmanfilters	27
Abbildung 2-13: Vergleich von gefilterter und ungefilterter Messung	30
Abbildung 2-14: Prinzip von Map-Matching	31
Abbildung 2-15: Zugehörigkeitsfunktionen	33
Abbildung 2-16: Mehrfachzuordnungen	34
Abbildung 3-1: Genauigkeit digitaler Navigationskarten	36
Abbildung 3-2: Winkelgenauigkeit bei unterschiedlichen Punktabständen	37
Abbildung 3-3: Aufbau von digitalen Navigationskarten	38
Abbildung 3-4: Ankoppelung der zusätzlichen Datenbank	45
Abbildung 3-5: Zusätzliche Datenbank.....	47
Abbildung 3-6: Versuchsgebiet.....	50
Abbildung 3-7: Datenbank-API	51
Abbildung 3-8: Ablaufdiagramm der Api.....	52
Abbildung 3-9: Knickwinkel zwischen 3 Kartenpunkten.....	54
Abbildung 3-10: Geometrie für Vorverarbeitung.....	55
Abbildung 3-11: S-Kurvensituation	58
Abbildung 4-1: Vergleich zwischen gelernten und Originaldaten	61
Abbildung 4-2: Lot von Messung auf Karte	62
Abbildung 4-3: Lücke zwischen gelernten und Originaldaten.....	64
Abbildung 4-4: „Einblenden“ von Daten.....	64
Abbildung 4-5: Kreuzungssituation mit verschobener Kreuzung.....	65
Abbildung 4-6: Mehrfachkreuzungspunkte	66
Abbildung 4-7: Kreuzung mit Mehrfachkreuzungspunkten	66
Abbildung 4-8: Offsets bei Abbiegevorgängen	67
Abbildung 4-9: Algorithmus zur Geometrieberechnung.....	68
Abbildung 4-10: cm-genau vermessene Versuchsstrecke	70
Abbildung 4-11: cm-Vermessungssystem	71
Abbildung 4-12: Kartenfehler der Strecke	72
Abbildung 4-13: Nachbearbeitungstool für digitale Karten	75
Abbildung 4-14: Landmarks auf einer Versuchsstrecke	76
Abbildung 5-1: Anwendungen im Vergleich zur Genauigkeit.....	78

Abbildung 5-2: Prinzipbild von Längsregelsystem	80
Abbildung 5-3: Kurvengeschwindigkeiten.....	81
Abbildung 5-4: Zugehörigkeitsfunktion	82
Abbildung 5-5: angepasste Kurvengeschwindigkeiten	82
Abbildung 5-6: Querbeschleunigungen	83
Abbildung 5-7: Brems- bzw. Beschleunigungspunkte in Kurven	85
Abbildung 5-8: Beschleunigungskennlinie.....	86
Abbildung 5-9: LED's im Tacho zum Anzeigen von Geschwindigkeiten	89
Abbildung 5-10: Eingangsgrößen für Heading Control.....	91
Abbildung 5-11: Krümmung über zwei Kartenpunkten	91
Abbildung 5-12: Vergleich der Ausleuchtung mit (links) und ohne (rechts) ALC	93
Abbildung 5-13: Winkel zwischen Fahrzeug und Straße.....	94
Abbildung 5-14: Annäherung an eine Geschwindigkeitsbeschränkung.....	96
Abbildung 5-15: Pfadprädiktion mit bzw. ohne digitale Karten	98
Abbildung 6-1: Rundkurs für Testfahrten mit den Versuchspersonen.....	100
Abbildung 6-2: Verteilung der gesetzlichen Geschwindigkeit über den Rundkurs...	100
Abbildung 6-3: Fahrstil (Mittelwert von 14 Versuchspersonen)	104
Abbildung 6-4: <i>Erfahrung</i> der Geschwindigkeitsregelung.....	106
Abbildung 6-5: <i>Empfindung</i> der vom System geregelten Geschwindigkeit	106
Abbildung 6-6: Wahrnehmung des Systemzustands von NavSpeed.....	107
Abbildung 6-7: <i>Gefühl</i> mit NavSpeed.....	108
Abbildung 6-8: Eignung von NavSpeed (verschiedene System-Aspekte).....	109
Abbildung 6-9: Wirkung des Systems auf den Fahrer.....	109
Abbildung 6-10: Beeinflussung von Fahrstil und Fahrerleben durch Systemnutz..	110
Abbildung 6-11: Aktivierung der Assistenzsysteme: Modus NavSpeed und ACC...	111
Abbildung 6-12: Prozentuale Übertretung der Geschwindigkeitsvorgabe durch N..	111
Abbildung 6-13: Geschwindigkeitsverlauf im Teilabschnitt.....	112
Abbildung 7-1: Bandbreite heutiger Positioniersysteme	115
Abbildung 7-2: Übersicht der Anwendungen	117
Abbildung 7-3: Online Datenbanken	118

Bezeichnungen

Kapitel 2

d	Abstand zweier Positionen
s	Weg
θ	Winkel
v	Geschwindigkeit
ω	Gierrate
λ	Breitengrad
φ	Längengrad
D	Vektor zwischen zwei Positionen
M	Messung als Vektor
T	senkrechter Vektor auf Messung
k_1	Skalar für Match zwischen zwei Punkten
k_2	Skalar für Abstand von Match
pd	Abstand zum letzten Kartenpunkt
d_{road}	Abstand zum Match
$\theta_{messung}$	gemessener Winkel gegen Nord
θ_{Karte}	Kartenwinkel gegen Nord
$err_{messung}$	Fehlervarianz der Messung
err_{Karte}	Fehlervarianz der Karte
P	Wahrscheinlichkeit

Kapitel 3

α_x	Knickwinkel
d_x, d_y	Abstände
h_{err}	Fehler der digitalen Karte
r	Radius
b	Bogenlänge
$p(d)$	Abstandswahrscheinlichkeit
$p(\alpha)$	Winkelwahrscheinlichkeit
$p(r)$	Radiuswahrscheinlichkeit
p_{Kurve}	Gesamtwahrscheinlichkeit für neuen Punkt
\mathcal{O}_{Kurve}	Kurvengesamtwinkel
\mathcal{E}_{Ende}	Kurvenüberhang am Ende
\mathcal{E}_{Anfang}	Kurvenüberhang am Anfang
r_{Kurve}	Kurvenradius

Kapitel 4

r	Radius
v	Verhältnis
λ_{learn}	gelernter Breitengrad
φ_{learn}	gelernter Längengrad

Kapitel 5

a	Beschleunigung
l_{brems}	Abstand
l_{accel}	Abstand
v_{Kurve}	Kurvengeschwindigkeit
s	Skalierungsfaktor
l	Abstand
h_{err}	Kartenabstandsfehler
ψ_{err}	Kartenwinkelfehler
$d\theta$	Deltarichtung
d_{spur}	Ablage zur Mittellinie
s_{ALC}	ALC-Vorausschau
ψ_{ALC}	ALC-Winkel

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Anti Blockier System
ACC	Active Cruise Control
ACC-Assist	Anti Collision Assist
ADAS	Advanced Driver Assistant Systems
ADASE	Advanced Driver Assistant Systems Europe
AHS	Automated Highway System
ALC	Adaptive Light Control
ALF	Accurate Positioning by Low Frequency
API	Application
ASC	Automatic Stability Control
AWARE	Anti Collision Warning and Avoidance Radar Equipment
BMW	Bayerische Motoren Werke
CARIN	Car Information
CDGPS	Carrier Phase Differential Global Positioning System
CHAUFFEUR	Truck Automation on European Highways
DAB	Digital Audio Broadcast
DGPS	Differential Global Positioning System
DNK	Digitale Navigationskarte
DOP	Dilution Of Precision
DRIVE	Dedicated Road Infrastructure and Vehicle Systems
DSC	Dynamic Stability Control
EPS	Echtzeit Positionierungs-Service
ETRS	Europäisches Terrestrisches Referenz System
FCD	Floating Car Data
FS	Fahrschlauch
GDF	Geographical Data Format
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
h	Stunde
HC	Heading Control
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
HEPS	Hochpräziser Echtzeit Positionierungs-Service
ISA	Intelligent Speed Adaptation
ITRS	Internationales Terrestrisches Referenz System
km	Kilometer
LKW	Lastkraftwagen
MHz	Megahertz
MMI	Mensch Maschine Interface
MOTIV	Mobilität und Transport im Intermodalen Verkehr
NavTech	Navigation Technologies
NextMAP	Next MAP for transport telematics applications
POI	Point Of Interest
PRC	PseudeRangeCorrection
PROMETHEUS	PROgramme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety
RASANT	Radiounterstützte Satellitennavigationstechnik
RDBMS	Relational Database Management System

RRC	RangeRateCorrection
SA	Selective Availability
SAM	Situations Adaptives Antriebsmanagment
SDAL	Shared Data Access Library
SPS	Standard Positioning Service
UDC	Urban Drive Control
USERE	User Equivalent Range Error
UKW	UltraKurzWelle
VDOP	Vertical Dilution of Precision
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS	World Geodetic koordinate SYSTEM
XFCD	eXtended Floating Car Data

1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

1.1. Automatisierung im Straßenverkehr

Automatisierung im Straßenverkehr ist ein Thema, das seit mehr als zwanzig Jahren in der Automobilindustrie diskutiert wird. Seitdem sind die Ingenieure mit der Entwicklung von Systemen beschäftigt, die das Autofahren leichter, sicherer, komfortabler und effizienter machen. Ein guter Ansatz bei der Entwicklung solcher Systeme ist die Analyse, wie ein geübter Autofahrer diese Aufgaben bewältigt. Die Kernaufgaben beim Autofahren sind dabei hauptsächlich:

- die Planung der zu fahrenden Strecke
- die Wahl der Führungsgrößen (z.B. Sollgeschwindigkeit und Sollspurlage)
- die Stabilisierung des Fahrzeuges

Zur Planung zieht der Fahrer seine Ortskenntnis bzw. Papierlandkarten als Informationsquelle heran. Die Auswahl der günstigsten bzw. kürzersten Strecke kann dabei sehr aufwendig werden. Ist die Strecke schließlich geplant, muss sie während der Fahrt immer wieder mit der Wirklichkeit abgeglichen werden, z.B. überprüft ein Beifahrer ständig, ob und wann ein Abbiegevorgang bzw. Richtungswechsel notwendig wird und gibt dem Fahrer entsprechende Hinweise. Befindet sich kein Beifahrer im Fahrzeug, ist die einzige verkehrssichere Möglichkeit für das Abgleichen von unbekanntem Strecken, eine Haltemöglichkeit zu suchen und den Abgleich im Stillstand durchzuführen. Der Fahrer muss sich also nicht nur auf die Führung und Stabilisierung seines Fahrzeuges konzentrieren, sondern zusätzlich die Planung bzw. den Abgleich mit der geplanten Strecke durchführen. Ist das Befahren der geplanten Strecke, z.B. wegen eines Staus, nicht möglich, muss der Fahrer eine Neuwahl der Strecke durchführen und die komplette Planung wiederholen.

In der Führungsebene zieht der Fahrer eine große Anzahl an Informationen zur Wahl der entsprechenden Größen heran. Die wesentlichen Aufgaben des Fahrers in diesem Bereich sind Bremsen, Beschleunigen und Lenken. Der Fahrer weiß in der Regel, wann er wie stark eine der oben genannten Aktionen ausführen muss. Das Wissen erlangt er dabei aus seiner Erfahrung und der aktuellen Umgebung. Die Erfahrung wiederum durch gespeichertes und aufgearbeitetes Wissen von vergangenen Fahrten, während die Umgebung durch seine Sinne erfasst wird. Wesentlich sind dabei das Sehen, das Hören und das „Gespür für Druck“ auf den Körper, mit dem unter anderem Beschleunigungen erfasst werden. Die Erfahrung spiegelt sich dabei in Regeln wieder wie z.B.:

- „Das Fahrzeug sollte innerhalb der Spurmarkierungen geführt werden“
- „Fährt ein langsames Auto voraus, sollte man bremsen und im konstanten Abstand folgen“
- „Die Geschwindigkeit sollte der gesetzlich erlaubten Geschwindigkeit angepasst werden“
- „In Kurven sollte man die Geschwindigkeit der Umgebung anpassen“
- usw.

Die Eingangsgrößen für die Regelsätze werden aus der aktuellen Situation durch die Sinne erfasst. Z.B. schätzt der Fahrer die Geschwindigkeit eines vorausfahrenden

relevanten Fahrzeuges durch Beobachtung (Sehen) und leitet in Abhängigkeit seiner Eigengeschwindigkeit und eventueller Umgebungsparameter wie z.B. Reibwert der Straße eine seiner Sportlichkeit angepasste Bremsung ein, um dem vorausfahrenden in konstantem Abstand zu folgen.

Die Stabilisierung eines modernen Fahrzeuges stellt in normalen Fahrsituationen kein großes Problem mehr dar. Die Fahrwerke sind inzwischen soweit entwickelt, dass selbst starke Beschleunigungen oder heftige Lenkbewegungen in der Regel problemlos umgesetzt werden können. In Situationen, in denen jedoch die Grenzbereiche erreicht werden, steht der Fahrer vor einer schwierigen und gefährlichen Aufgabe. Unter anderem stellen diese Situationen wegen ihrer Seltenheit im Vergleich zur Gesamtfahrleistung und damit der Unerfahrenheit des Fahrers eine erhöhte Schwierigkeit dar. Die Stabilisierung des Fahrzeuges erreicht er in diesen Situationen, indem er z.B. bei Ausbrechen des Fahrzeuges gelernte Aktionen wie z.B. eine Stotterbremsung ausführt oder durch Gegenlenken das Fahrzeug stabilisiert. Problem dabei ist die notwendige, schnelle und richtige Reaktion des Fahrers. Er muss fast intuitiv reagieren, um in diesen Situationen eine Stabilisierung wieder herbeizuführen.

Zur Entwicklung von Systemen, die den Fahrer bei diesen Aufgaben unterstützen können, wird dabei die Erfahrung eines geübten Autofahrers gemeinsam mit erforschten physikalischen Gesetzmäßigkeiten in für Computer verständliche Regelsätze formuliert. Diese werden dann mit den entsprechenden Eingangsgrößen aus den Messungen gefüttert. Die Regelsätze lassen sich dabei vergleichsweise einfach in für Computer verständlicher Sprache formulieren, so dass sich ein großer Teil der Fahraufgabe dadurch schon heute automatisieren ließe. Die Erfassung der für die Regelsätze nötigen Eingangsgrößen hingegen beschreibt beim heutigen Stand der Technik ein viel größeres Problem. So sind die Eingangsgrößen nicht nur erfasste Informationen wie z.B. unaufbereitete Sensordaten, sondern vielmehr mit gespeichertem Wissen aufgearbeitete und interpretierte Informationen. Der Mensch vergleicht dabei erfasste Informationen mit ihm bekannten Vorstellungen der Umgebung, die er erlernt hat, und kann so entsprechende Interpretationen ableiten. So werden z.B. weiße Striche auf der Fahrbahn in der Regel als Spurmarkierungen erkannt und der aktuelle Versatz des eigenen Fahrzeuges zu diesen Linien eingeschätzt. Gleichzeitig prädiziert der Fahrer die Bewegungsrichtung seines Fahrzeuges zu diesen Markierungen. Die daraus gewonnenen Informationen dienen als Eingangsgrößen für die eventuell notwendigen Lenkbewegungen. Die Qualität der Erkennung dieser Streifen auch bei schlechten Bedingungen (z.B. Wetter) bzw. die Interpretation bei z.B. Ausfahrtstreifen und die Beurteilung der Situation bei eventuell nicht vorhandenen Streifen sind dabei technisch problematisch. Zur Bewältigung wird vom Fahrer eine Vielzahl weiterer Informationen verarbeitet, die hauptsächlich aus erlerntem Wissen abgeleitet wird. So kann er auch aus Leitpfosten am Straßenrand bzw. anhand der Bruchkante zwischen Straße und Wiese den Fahrspurverlauf erkennen. Bei der Wahl der Geschwindigkeit erfasst und interpretiert der Fahrer eine vorausliegende Situation anhand einer Vielzahl von Parametern. Diese sind unter anderem die Geometrie (z.B. Kurve), die Komplexität (z.B. Fußgänger am Straßenrand), vorausfahrender Verkehr, die Übersichtlichkeit (Haltesichtweite), der Straßenbelag bzw. die Witterungsbedingungen (Eisglätte) etc. Mit Hilfe dieser Information bildet der Fahrer eine Sollgeschwindigkeit und eine angepasste Beschleunigung und leitet dann die Aktionen ein.

Die „Sensorik“ bzw. die Vorverarbeitung der erfassten Information durch den Menschen ist heute noch nicht komplett durch Computer bzw. elektronische Sensoren zu

ersetzen. Ein automatisches Auto ohne Fahrer wird also vermutlich in unmittelbarer Zukunft nicht entwickelt werden können. Um das Bedürfnis an zusätzlichen Hilfestellungen beim Autofahren trotzdem zu erfüllen, kann man die Aufgabe jedoch in mehrere Teilaufgaben mit weniger komplexen Beschreibungen aufteilen. Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu sogenannten Fahrerassistenzsystemen – im Englischen als Advanced Driver Assistent Systems (ADAS) bezeichnet – haben zum Ziel, die Fahrerbelastung zu verringern, die Auswirkungen fahrerspezifischer Defizite zu entschärfen und so einen wirkungsvollen Beitrag zur Erhöhung von Fahrkomfort und -sicherheit zu leisten [Naab 2000].

Wie der Fahrer konkret Unterstützung bei der Ausführung seiner Fahrtätigkeit erhält, variiert von System zu System: Die längste Tradition hat die Fahrerassistenz auf dem Gebiet der Stabilisierung. So unterstützt z.B. das Anti-Blockier-System (ABS) den Fahrer bei starken Bremsvorgängen, indem das Blockieren der Räder verhindert wird, die Anti-Schlupf-Regelung (ASC) bei Anfahrvorgängen bzw. starken Beschleunigungen, indem das Durchdrehen der Räder verhindert wird, die Dynamische Stabilitätskontrolle (DSC) stabilisiert das Fahrzeug in Kurven, indem Räder einzeln gebremst werden. Diese Systeme reagieren in der Regel schneller und besser als ein durchschnittlicher Fahrer und tragen somit im wesentlichen zur Verkehrssicherheit bei.

Systeme zur Fahrerassistenz auf Planungsebene (z.B. Navigationssysteme oder digitale Verkehrsnachrichten) sind hingegen vergleichsweise neu. Diese planen die kürzeste, schnellste bzw. landschaftlich schönste Route und geben dem Fahrer aktiv während der Fahrt Richtungsanweisungen, so dass sich dieser rein auf die Wahl der Führungsgrößen und die Stabilisierung des Fahrzeuges konzentrieren kann. Staus o.ä. werden über Radiodienste vom System erkannt und durch automatische Neuplanung der Route umfahren, ohne dass eine Interaktion vom Fahrer notwendig wird. Dieses Fahrerassistenzsystem für die Planungsebene erhöht somit deutlich den Komfort und die Verkehrssicherheit.

Die Assistenz des Fahrers bei der Wahl von Führungsgrößen (z.B. Stärke von Beschleunigung und Bremsvorgang; Lenkung des Fahrzeuges usw.) kann schließlich als völlig neues Gebiet bezeichnet werden. Hier eröffnen sich grundsätzlich zwei Anwendungsbereiche: Fahrerassistenz bei Längs- und Fahrerassistenz bei Querführung. Ein Beispiel für die Längsführung ist dabei eine erweiterte Tempomatfunktion. Einmal eine Wunschgeschwindigkeit eingestellt regelt der Tempomat diese Geschwindigkeit, bis er wieder abgeschaltet wird bzw. der Fahrer das Bremspedal berührt. Auf freien Strecken wird dem Fahrer die ständige Regelung der Wunschgeschwindigkeit abgenommen. Bei sehr verkehrsreichen Straßen jedoch ist dieses System nur noch teilweise nutzbar, da der Fahrer z.B. durch langsamere vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer immer wieder korrigierend eingreifen muss. Eine naheliegende Erweiterung ist das automatische Abbremsen des eigenen Fahrzeuges in entsprechenden Situationen. Active Cruise Control (ACC) füllt diese Lücke: Das Fahrzeug wird bei langsamem vorausfahrenden Verkehr automatisch gebremst und anschließend bei wieder freier Strecke auf die Wunschgeschwindigkeit beschleunigt. Analysiert man diese Teilaufgabe anhand der Aufgabenbewältigung durch den Menschen, sind dafür im Standardfall folgende Informationen notwendig: Geschwindigkeit und Beschleunigung des Vordermannes, aktueller Abstand und gewünschter Abstand zum Vordermann, Eigengeschwindigkeit, Eigenbeschleunigung.

Die Eigenzustände werden dabei über Raddrehzahlsensoren, die des Vordermannes über eine am eigenen Fahrzeug angebrachte Radarsensorik erfasst. Die Informationen aus den Sensoren sind in der Regel deutlich genauer als die Einschätzung des

Menschen. Das System sollte perfekter als der Mensch funktionieren. Dieser Fall tritt auch ein, wenn die von den Entwicklern getroffenen Annahmen der aktuellen Realität entsprechen. Eine gängige Annahme ist dabei z.B., die aktuelle Verwindung der Straße in die Zukunft zu präzisieren. D.h. bewegt sich das eigene Fahrzeug gerade (Lenkwinkel gering, Gierrate gering) wird angenommen, dass man sich auf einem geraden Stück Straße befindet (siehe Abbildung 1-1).

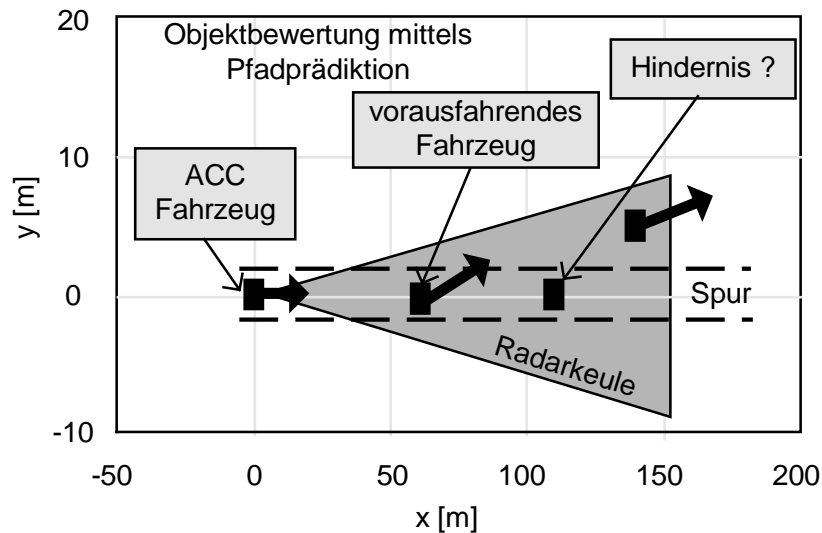


Abbildung 1-1: Objektbewertung ohne Umgebungsinformation

Diese Annahme wird auch auf das vorausfahrende Fahrzeug projiziert und so die Relevanz des erfassten Objektes beurteilt. Relevanz bedeutet dabei, ob sich das Objekt in der eigenen Spur oder in einer Nachbarspur befindet. Befindet sich das vorausfahrende Fahrzeug in der Nachbarspur, aber in einer Linkskurve, kann es zu Fehlzuordnungen kommen, worauf dann in der Regel falsche Aktionen vom System ausgelöst werden (siehe Abbildung 1-2).

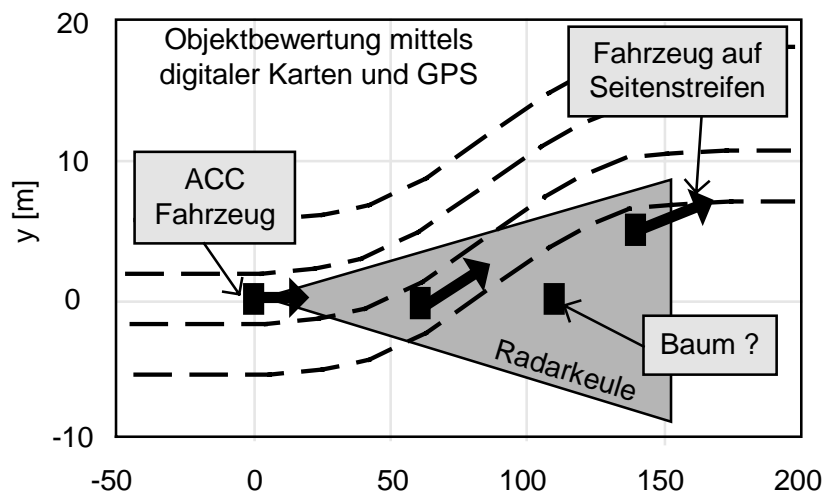


Abbildung 1-2: Objektbewertung mit Umgebungsinformation

Oben genannte Parameter reichen also nicht aus, um die vorliegende Situation vollständig zu beschreiben. Dies ist ein Beispiel für ein klassisches Problem von Fahrerassistenzsystemen. Die aktuellen Messwerte müssen innerhalb der gerade aktuellen Umgebung und Situation interpretiert werden. Die Erfassung der Umgebung wiederum ist sehr vielseitig und somit nur schwer mit einem einzelnen Sensorsystem zu erfassen. Ein Ansatz zur Lösung ist dabei das Bestücken eines Fahrzeuges mit verschiedenen Sensoren (Video, Radars, Reibwert usw.) zur ausführlichen Erfassung der Umgebung. Die hohen Anforderungen (z.B. Wetter, Dunkelheit, ausreichende Voraussicht, Interpretation bei Verdeckungen usw.) können aber von Sensoren heute nicht bzw. nur teilweise erfüllt werden. Die Integration solch einer erweiterten Sensorik ist auch im Rahmen heutiger Systemkosten für ein Serienfahrzeug nicht verwirklichtbar.

Ist die statische Umgebung (also alle nicht beweglichen Objekte) vor dem Fahrzeug jedoch bekannt, wäre z.B. die Spurzuordnung in obigem Beispiel kein Problem mehr. Die Interpretation der aktuell gemessenen Signale könnte in einem wirklichkeitsnahen Kontext erfolgen und nicht statische (bewegliche) Objekte besser von statischen separiert werden. Neben der Interpretation von Sensorsignalen innerhalb der Umgebung kann durch vorausschauende Bewertung der vorausliegenden Geometrie einer Straße eine Einschätzung von Kurven erfolgen und entsprechende Kurvengeschwindigkeiten berechnet werden. Auf Basis dieser Information kann der Fahrer vor überhöhter Geschwindigkeit gewarnt werden bzw. automatisch in die Längsregelung des Fahrzeuges eingegriffen werden. Durch Kenntnis des Straßentyps bzw. gesetzlicher Geschwindigkeitsbeschränkungen kann der Fahrer über die aktuelle Regelung informiert oder gewarnt werden. Mittels sehr exakter Umgebungsinformation kann sogar eine Spurhalteunterstützung ermöglicht werden. Weitergehende Systeme benötigen exakte Informationen zur Umgebung, um Kollisionen mit statischen Gegenständen zu vermeiden bzw. sinnvolle Ausweichmanöver zu planen.

1.2. Aufgabenstellung

In der vorliegenden Arbeit soll ein System entwickelt werden, das Fahrerassistenzsystemen Informationen über die statische Umgebung um das Fahrzeug während der Fahrt liefert. Ein Großteil in der realen Welt vorkommender Modelle könnte in einem System gespeichert und bei Bedarf angewendet werden. Um jedoch wieder die Modelle einer Situation zuzuordnen, sind Sensoren notwendig, die eine umfassende Interpretation erfordern. Nachdem sich aber diese Modelle definitionsgemäß (da statisch) nicht bewegen, sind sie an einen Ort gebunden. Somit kann man jedem Modell einen Ort zuordnen. D.h. man speichert für jeden Ort ein Modell in einer Datenbank. Bei bekannter Position des Fahrzeuges kann also beim Befahren einer Strecke ein exaktes Modell der statischen Umgebung als Grundlage für die Interpretation der aktuellen Sensorsignale dienen und die Interpretation somit erleichtern. Nicht statische Objekte hingegen können von anderen Sensoren leichter erkannt werden, wenn alle statische Objekte nicht mehr betrachtet werden müssen.

In dieser Arbeit soll ein System entwickelt werden, das diese statischen ortsspezifischen Modelle für einen frei wählbaren Bereich vor dem Fahrzeug ausgibt und somit verschiedenen Fahrerassistenzsystemen eine umfassende Umgebungsbeschreibung zur Verfügung stellt. Diese entspricht dabei einer Modellwelt, in der die aktuellen Messwerte z.B. einer Radarsensorik oder auch Bildverarbeitung etc. interpretiert werden. Der Einsatz von Modellen für die Umgebung ist nicht neu in der Entwicklung

von Fahrerassistenzsystemen. Jedoch sind heute verwendete Modelle vergleichsweise starr und einfach. Eine Beschreibung wie z.B.: „Die Straße, auf der sich das Fahrzeug bewegt, hat eine Spur von 3.25 m, einen Seitenstreifen mit 0.75 m, keine Trennung zum Gegenverkehr, Spurmarkierungen mit der Breite von 0.15 m, beschreibt einen Radius von 50 m, einen Reibwert von 0.75, wird sich in 120 m auf zwei Spuren aufweiten und befindet sich in einem Waldstück (eventuelle Längsschatten)“ könnte z.B. einem videobasierten Spurerfassungssystem bereits wertvolle a-priori-Informationen zur Interpretation der Messungen liefern. Auch in Radarsystemen kann mit Hilfe so detaillierter Modelle eine zusätzliche Bewertung der gemessenen Daten erfolgen und so eine Fehlmessung von vornherein ausgeschlossen werden. Diese Modelldaten müssten vor allem schon vor der Erfassung durch die Messsysteme zur Verfügung stehen, so dass die Messung nur im benötigten Bereich mit entsprechender Parametrisierung erfolgen kann.

Neben der Unterstützung vorhandener Systeme können auf einem Modell mit ausreichender Genauigkeit für eine vorausliegende Situation auch eigenständige Systeme aufsetzen. Das vorliegende Modell wird einfach ohne weitere Kontrollmessung als die Realität angenommen und entsprechende Regelsysteme mit diesen Informationen gefüttert. Das Fahrzeug bewegt sich also in einer Modellwelt (siehe Abbildung 1-3).

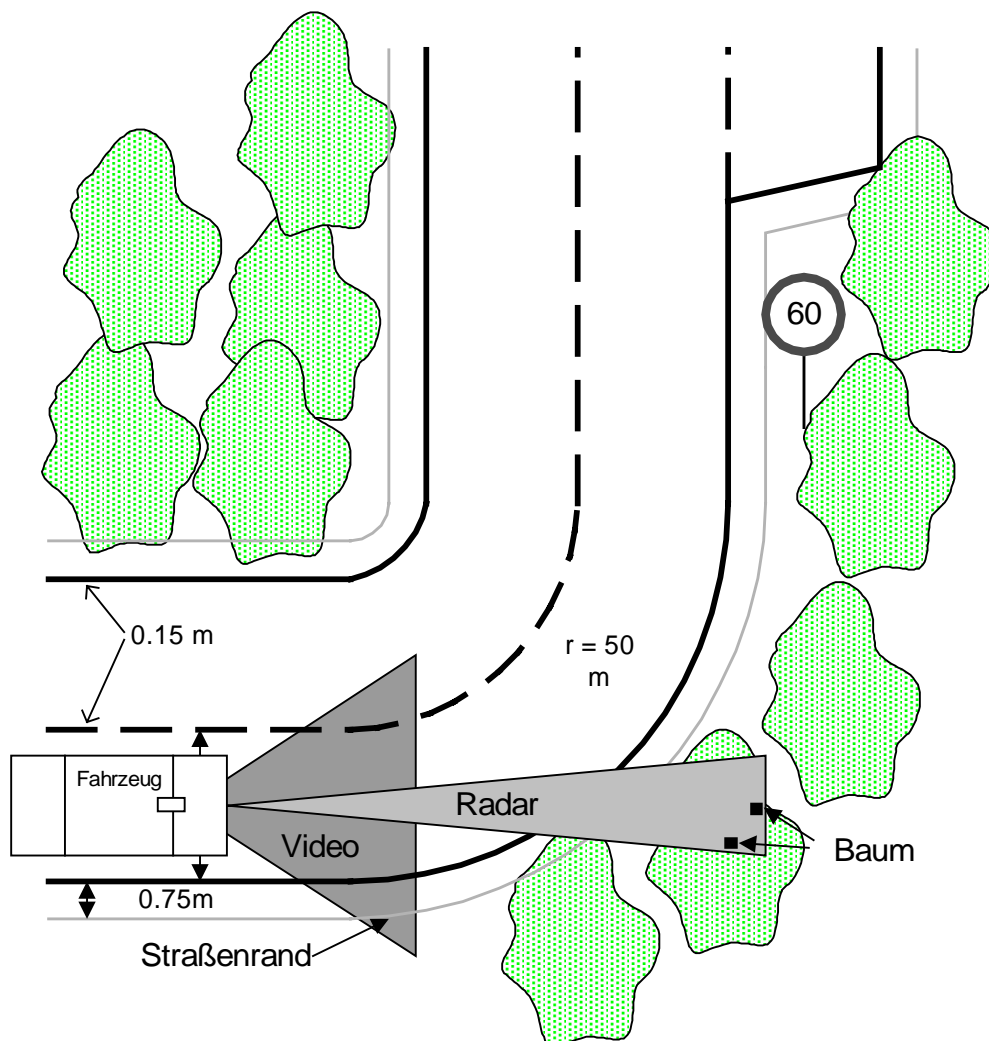


Abbildung 1-3: Umgebungsmodell

In dieser Arbeit sollen die Anforderungen bzw. Mittel für ein solches System bestimmt werden. Eine Zuordnung von Modellen zu Orten muss erfolgen, ebenso die Untersuchung der benötigten bzw. möglichen Genauigkeit einer Ortsbestimmung. In einem zweiten Schritt wird der Detaillierungsgrad der benötigten Modelle festgestellt und den entsprechenden Fahrerassistenzsystemen zugeordnet. Weitere Möglichkeiten zur automatischen Erstellung bzw. Verbesserung von Modellen werden entwickelt und schließlich entsprechende Fahrerassistenzsysteme auf Basis dieses Systems entwickelt, getestet und bewertet.

1.2.1. Ansätze zur Realisierung

Ein Großteil des benötigten Modellwissens über die Umgebung (Straße usw.) befindet sich bereits in Plänen von Straßenbauämtern. Da diese jedoch meist in Papierform vorliegen, ist eine Abbildung der vorhandenen Information in einer für Computer verständlichen Form sehr aufwendig. Etwas ungenauere Informationen über Straßen und deren Umgebung befinden sich aber in Landkarten, die heute bereits digital auf CDs verfügbar sind. Die meisten kommerziell verfügbaren digitalen Karten speichern dabei die Information in Bilddateien, die zumindest elektronisch nur schwer auswertbar sind. Digitale Karten, wie sie heute schon in Navigationssystemen verwendet werden, sind sogenannte Vektorkarten. Diese speichern eine Linie nicht mehr als eine Ansammlung von nicht zusammenhängenden Punkten, sondern als Vektor. Eine Straße wird folglich als zusammenhängende Vektorkette beschrieben. Zusätzlich können die Vektoren in der Karte verschiedene Attribute besitzen (z.B. Anzahl der Spuren).

Digitale Karten in Vektorform sollen in dieser Arbeit die Grundlage bzw. den ersten Lösungsansatz darstellen. Da nicht alle für Fahrerassistenzsysteme benötigten Informationen in heutigen digitalen Karten vorhanden sind, müssen Möglichkeiten für die Erweiterung bzw. Veränderung der Daten entwickelt werden. Für die Zuordnung der entsprechenden Daten auf den Ort, an dem sich das Fahrzeug befindet, kommen ähnliche Ansätze wie in Navigationssystemen zur Anwendung. Abbildung 1-4 stellt den Gesamtumfang der Arbeit dar.

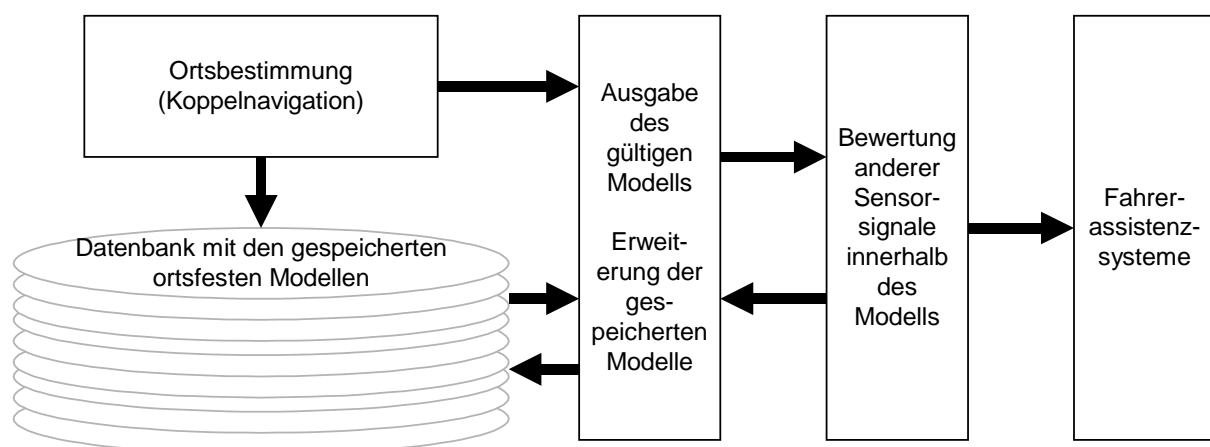


Abbildung 1-4: Übersicht der Aufgabe

Als Beispiel werden zwei verschiedene Fahrerassistenzsysteme auf Basis dieses Systems aufgebaut und diskutiert.

1.) Längsregelungssystem auf Basis digitaler Karten

Ziel der Anwendung ist die vorausschauende Empfehlung einer bestimmten Geschwindigkeit aufgrund einer vorausliegenden statischen Situation. Mit Hilfe einer digitalen Landkarte und Sensoren zur Ortung wird eine Umgebungsanalyse durchgeführt und somit z.B. der Kurvenradius einer vorausliegenden Kurve bestimmt (siehe Abbildung 1-5).

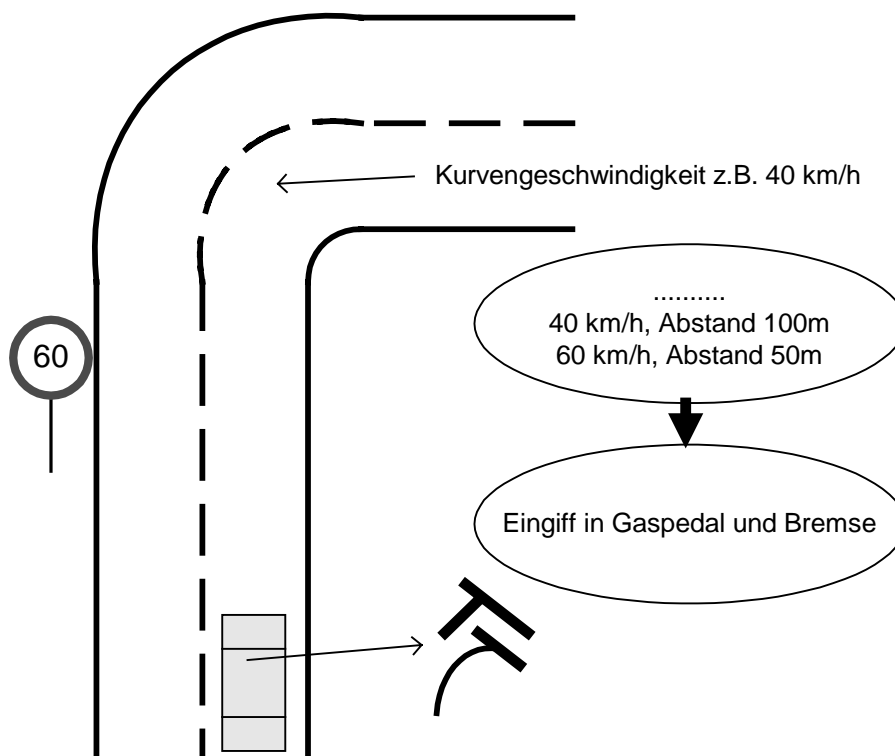


Abbildung 1-5: Längsregelung auf Basis digitaler Karten

Die aus dem Kurvenradius berechnete maximale Geschwindigkeit kann durch weitere Kriterien eingeschränkt werden, die nicht nur durch die erweiterte Umgebung (z.B. Art der Straße, Geschwindigkeitslimit, Verkehrszeichen usw.) bzw. durch natürliche Ereignisse (z.B. Wetter, Sicht, Tag / Nacht usw.) festgelegt sind, sondern auch durch Fahrerstile (z.B. economy / sportlich). Mit Hilfe lernender Datenbanken kann zusätzlich zur Verbesserung der digitalen Karte das Fahrerverhalten bezogen auf eine bestimmte Umgebung erlernt und dem Fahrer beim nächsten Befahren der Strecke wieder „vorgespielt“ werden. Er soll hierbei auch die Möglichkeit haben, seiner Datenbank explizit einen Geschwindigkeitswunsch mitzuteilen („Macro-Aufzeichnung“). Die digitale Karte soll aber auch ohne explizite Aufforderung durch gesammelte und bewertete Daten erweitert werden.

Im Zusammenhang mit obigen Zielen müssen unter anderem folgende Fragestellungen näher betrachtet werden:

- Wie hoch sind die Anforderungen an die Positionierung bzw. die digitale Karte, Genauigkeit, Zuverlässigkeit bei Längsregelsystemen?
- Wie werden Kurven vom Fahrer gefahren (Geometrie, Geschwindigkeit)?
- Welche Folgen hat Fehlverhalten des Systems bzw. des Fahrers?
- Inwieweit können die vom Fahrer gesammelte Daten gelernt werden?
- Wie werden dem Fahrer Informationen über den Zustand des Systems mitgeteilt?
- Wo liegt der Nutzen für den Fahrer bzw. Verkehr?
- Wie groß ist der Nutzen der durch Lernen veränderten Daten für das System?

2.) Querregelungssystem auf Basis digitaler Karten

Ziel der Anwendung ist die vorausschauende Empfehlung einer bestimmten Lenkrichtung aufgrund einer vorausliegenden statischen Situation (z.B. Spurverlauf einer Straße). Mit Hilfe einer digitalen Landkarte und Sensoren zur Ortung wird eine Umgebungsanalyse durchgeführt und somit z.B. die Querablage und der Richtungsfehler des Fahrzeuges bestimmt (siehe Abbildung 1-6).

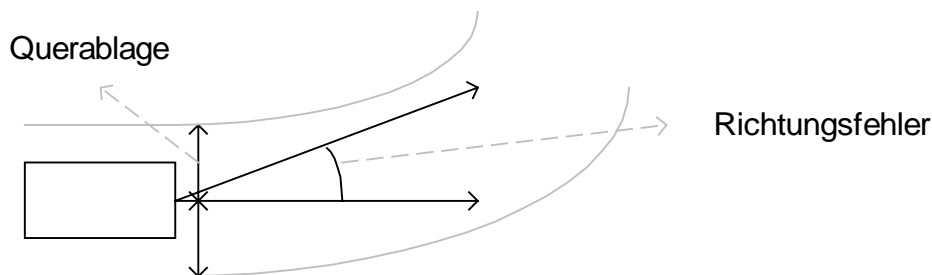


Abbildung 1-6: Querablage und Richtungsfehler eines Fahrzeuges

Im Zusammenhang mit obigen Zielen müssen unter anderem folgende Fragestellung näher betrachtet werden: Wie hoch sind die Anforderungen an die Positionierung bzw. die digitale Karte, Genauigkeit, Zuverlässigkeit bei Querregelsystemen?

1.3. Stand der Technik

Wesentliche Meilensteine im Bereich von Fahrerassistenzsystemen wurden in PROMETHEUS (PROgramme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety) gelegt. Um technologische Grundlagen für den Betrieb intelligenter Automobile auf intelligenten Straßen zu erarbeiten, wurde zwischen 1986 und 1994 eine Vielzahl von Funktionen und Systemen erarbeitet [BRAESS, Reichart, 1995]: z.B. sicherheitstechnische Aspekte wie Sichtverbesserung bei Nacht mit UV-Scheinwerfern oder Infrarot-Kamerasystemen, Straßenzustandserkennung mit optischen und akustischen Sensoren, Verbesserung der Fahrstabilität, Spurhalteunterstützung, Abstands- und Geschwindigkeitsregelung (ACC), Kollisionsvermeidung usw. [Naab, 2000]. Im gleichen Zeitraum fanden zwei weitere europäische Forschungsprojekte statt – DRIVE I und DRIVE II (Dedicated Road Infrastructure and VEHICLE Systems) – die jedoch deutlich weniger technologieorientiert waren, sondern sich vorrangig mit dem gesamtverkehrlichen Aspekt und der Integration der Ver-

kehrssysteme beschäftigten [Naab, 2000]. Vor allem die Ansätze von PROMETHEUS wurden im Laufe der Jahre in weiteren langfristigen nationalen Forschungsprojekten weitergeführt. Es handelt sich hierbei zum Beispiel um die Projekte:

- UDC (Urban Drive Control): Kopplung der in PROMETHEUS entwickelten ACC-Funktion mit externen Geschwindigkeitsempfehlungen und Verkehrsregelungssystemen mit dem Ziel, den Verkehrsfluss auf großen städtischen Durchgangsstraßen zu verbessern.
- Anti-Collision-Assist (AC-Assist): Untersuchung der Auswirkungen der Kollisionswarnung und der Intervention durch Bremsmanöver unter nahezu idealen Sensorik-Bedingungen.
- AWARE (Anti-Collision Warning and Avoidance Radar Equipment): präzise Erfassung und Zuordnung insbesondere stehender Objekte zur eigenen Fahrtrajektorie.
- ISA (Intelligent Speed Adaption): Ansatz zur automatischen Einhaltung vorgegebener Höchstgeschwindigkeiten.
- SAVE: Entwicklung von Ansätzen, die warnend oder korrigierend eingreifen, wenn sich der Fahrer unaufmerksam oder nicht situationsgerecht verhält.
- CHAFFEUR: Verkopplung von Lastkraftwagen nach dem Prinzip der elektronischen Deichsel.
- Combi Road: Konzept für den vollautomatisierten Containertransport auf eigens hierfür erstellten Trassen.
- MoTIV (Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr), ein 1996 in Deutschland gestartetes Forschungsprojekt, das u.a. Systeme zur Abbiege- und Spurwechselassistentz, zu ACC im Ballungsraum und zum vorausschauenden Fahren durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation entwickelte.

Während PROMETHEUS und seine Nachfolgerprojekte vorrangig den Ansatz verfolgten, den Fahrer nach Möglichkeit vollständig zu entlasten und die Fahrzeugführung komplett zu automatisieren, hat sich heute eine andere Auffassung durchgesetzt: Aus Sicht der meisten Automobilhersteller führt der Weg der Einführung von Advanced Driver Assistant Systems über sogenannte Komfortsysteme, die nur eine indirekte Sicherheitswirkung versprechen. Dies wird ein evolutionärer Weg sein, wobei diese Systeme nach Möglichkeit völlig autark arbeiten, d.h. mit einem Minimum an infrastruktureller Veränderung auskommen müssen. Ziel dieser Systeme ist es, möglichst viele Informationen der Fahrumgebung zur Verfügung zu stellen. Das System verfügt damit über Informationen, die dem Fahrer selbst nicht zugänglich wären, z.B. Informationen über die Straße selbst sowie deren aktuelle und vorausliegende Geometrie, die Position des eigenen Automobils auf der Straße, den Straßentyp und den aktuellen und vorausliegenden Oberflächenzustand, die Sichtverhältnisse und die aktuelle Verkehrsregelung.

Die Gründe für diesen Paradigmenwechsel vom automatischen Auto hin zum unterstützenden Komfortsystem sind vielschichtig: Zu nennen sind u.a. die Erkenntnis, dass die für das automatische Fahren nötige Vollständigkeit der Informationen über die Fahrumgebung mit den in absehbarer Zeit zur Verfügung stehenden Mitteln nicht erreichbar ist. Des Weiteren wirft der Wunsch nach 100%-iger Zuverlässigkeit unlösbare Probleme auf (Produkthaftung, rechtliche Fragen). Nicht zuletzt spielen auch

die Bedürfnisse der Kunden eine bedeutende Rolle: Ein vollautomatisches Automobil deckt kaum den Wunsch nach Fahrspaß und -erlebnis ab. Assistenzsysteme, die dem Fahrer die Freiheit lassen, seinen individuellen Fahrstil auszuleben, wann immer die Situation dies zulässt, und ihm bei schwierigen, Unsicherheiten und Stress hervorrufenden oder ermüdenden Situationen unterstützend zur Seite stehen, ermöglichen ein fast partnerschaftliches Verhältnis zwischen Mensch und Maschine und erfahren dadurch sicherlich eine deutlich höhere Akzeptanz.

Derzeit in Entwicklung befindliche bzw. gerade in die Serienproduktion aufgenommene Fahrerassistenzsysteme zur Längs- und Querregelung sind z.B. Active Cruise Control (ACC) und Heading Control (HC).

Im 5. Forschungsrahmenprogramm, Teilprojekt ADASE, wurden erstmals auch digitale Karten als Sensor zur Umgebungserfassung in einem größeren Forschungsrahmen erkannt.

In IN-ARTE wird versucht, eine erweiterte elektronische Voraussicht aus verschiedenen Sensorsystemen zu verwirklichen. Dabei sollen die Informationen aus Radar- und CCD-Sensoren sowie aus digitalen Karten dem Fahrer zusätzliche unterstützende Informationen in visueller Form liefern.

Im Teilprojekt NextMap des 5. EU-Forschungsrahmenprogrammes werden schließlich die Anforderungen an digitale Karten der Zukunft bestimmt, um diverse Fahrerassistenzsysteme zu unterstützen bzw. zu entwickeln. An ausgewählten Beispielanwendungen soll die Wirksamkeit nachgewiesen werden und schließlich endgültige Anforderungen formuliert werden.

In weiterführenden Projekten wird bereits die Erkennung von Tempolimits durch Videoerkennung der Verkehrsschilder erprobt [Hibi, 1996]. Starke Einschränkungen müssen hier allerdings bei schlechter Sicht hingenommen werden. Radarsysteme können hingegen sehr gut zur Entfernungsmessung und der Erkennung von Hindernissen bzw. vorausfahrenden Fahrzeugen eingesetzt werden.

Andere Ansätze versuchen, durch eine zusätzliche Infrastruktur am Straßenrand bzw. im Straßenbelag Fahrzeuge in ihrer Längs- und Querregelung zu beeinflussen (z.B. Automated Highway System).

Navigationssysteme hingegen setzen GPS (Global Positioning System) und digitale Landkarten zur Navigation ein. Ziel ist es, dem Fahrer eine Hilfestellung bei der Orientierung in unbekanntem Gebieten zu ermöglichen. Sie geben Richtungsempfehlungen meist in visueller Form auf einem Display oder mittels Sprachausgabe aus (z.B. CARIN, Navigationssystem für Fahrzeuge der Firma VDO).

Andere Entwicklungsbestrebungen sollen mit ähnlicher Technik ein adaptives Antriebsmanagement bzw. eine Geschwindigkeitssteuerung zur Vermeidung von Unfällen aufgrund unterschätzter physikalischer Begrenzungen verwirklichen [Hamberger, 1995]. Straßendaten als Sensor zur Streckenvorausschau zu nutzen, wurde auch unter anderem zur Vermeidung von Unfällen durch Reduzierung der Workload des Fahrers mit Hilfe entsprechender Assistenzsysteme verwirklicht. In der Arbeit [Hamberger 1999] wurde dabei wesentlich der Ansatz verfolgt, Karten komplett selbst aufzubauen oder vorhandene digitale Karte mit dem Nachteil einer hohen Ungenauigkeit in Kauf zu nehmen.

1.4. Aufbau der Arbeit

Im Kapitel 2 werden die notwendigen Grundlagen für die Zuordnung von Modellen auf die aktuelle Position des Fahrzeuges diskutiert. Dabei werden unter anderem sowohl heute verfügbare Sensoren zur absoluten Ortsbestimmung als auch entsprechende Abbildungsverfahren auf die digitale Karte (Map-Matching) diskutiert. Anschließend erfolgt die Darstellung der Möglichkeiten heutiger Positionierungsverfahren.

In Kapitel 3 werden die Inhalte heutiger digitaler Karten und deren Erweiterungsmöglichkeiten beschrieben. Eine Abbildung von Inhalten auf Generationen soll eine Roadmap für digitale Karten in der Zukunft darstellen. Durch geeignete Erweiterungen werden Verfahren vorgestellt, die zeigen, wie in heute verfügbaren digitalen Karten zusätzliche Attribute integriert und somit getestet werden können.

Im Kapitel 4 sind Verfahren beschrieben, die das automatische Verbessern bzw. Erweitern von den gespeicherten Informationen ermöglichen. Neue Daten, die z.B. beim Überfahren von Strecken gemessen und so in die Datenbank integriert werden, stehen dann beim nächsten Befahren zur Verfügung. Die Daten aus den verschiedenen Kartengenerationen bzw. den Lernverfahren werden schließlich im Kapitel 5 auf die möglichen Anwendungen abgebildet. Die Entwicklung einer Anwendung pro Kartengeneration soll die Wirksamkeit der gewählten Ansätze nachweisen, um im Kapitel 6 durch Testfahrbewertung den Nutzen der Anwendung zu ermitteln.

2. FAHRZEUGPOSITIONIERUNG

Um Modelle einem Ort zuzuordnen, muss die Position des Fahrzeuges eindeutig in der Welt bestimmt werden. Umfassende Lösungen bieten hier satellitengestützte Positionsverfahren wie GPS (Global Positioning System). Damit lässt sich ein Fahrzeug mit Hilfe der entsprechenden Empfänger überall auf der Welt eindeutig orten. Die Zuordnung von Modellen zu einer aktuellen Position erfolgt durch Abbildungsverfahren (Map-Matching). Ist der Ort und die Richtung der aktuellen Fahrzeugbewegung bekannt, wird diese auf die Modellwelt (z.B. eine digitale Navigationskarte) abgebildet. Durch Simulation der aktuellen Fortbewegung in dieser Modellwelt können so die ortsbezogenen Modelle den Fahrerassistenzsystemen zur Interpretation und Verarbeitung zur Verfügung gestellt werden.

2.1. Positionsbestimmung

Im wesentlichen werden drei verschiedene Verfahren für die Positionsbestimmung eingesetzt: Peilverfahren, Laufzeitmessung und die Laufzeitdifferenzmessung.

1.) Peilverfahren arbeiten mit sog. gerichteten und ungerichteten Funkfeuern. Die ungerichteten Funkfeuer sind Rundfunksender, die aufgrund ihrer Senderkennung eindeutig identifizierbar sind. Sind zwei dieser Funkfeuer sichtbar, kann bei bekannten Senderstandorten die Position bestimmt werden. Das gerichtete Funkfeuer sendet zwei Signale aus. Während das erste gleichmäßig in alle Richtungen verschickt wird, wird bei dem zweiten (mit gleicher Grundfrequenz) die Phase proportional zur geographischen Richtung verschoben, in die es ausgestrahlt wird. Der Empfänger kann die Richtung gegen Magnetisch Nord aus der Phasenverschiebung rekonstruieren. Die Genauigkeit des Verfahrens wird mit etwa 1-1,5 Grad angegeben.

2.) Laufzeitmessung sind z.B. Radarmessungen. Hier wird die Zeit bestimmt, die ein Impuls vom Sender zum Objekt und zurück benötigt. Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit und bekanntem Winkel der Antenne gegen Magnetisch Nord kann die Position sogar dreidimensional gemessen werden. Mit der Weiterentwicklung Dopplerradar werden heute Genauigkeiten von 200 m bis 500 m bei einer maximalen Entfernung von 300 km erreicht.

3.) Bei Laufzeitdifferenzmessungen wird der Zeitunterschied ermittelt, den ein Signal von einem bekannten Ort zu einem Messpunkt benötigt und daraus die Entfernung zum Referenzpunkt berechnet. Sind mehrere Messungen zu verschiedenen Punkten bekannt, kann daraus eine eindeutige Position bestimmt werden. Beispiele für die Laufzeitdifferenzmessung sind unter anderem das vom amerikanischen Militär entwickelte Global Positioning System (GPS) und das vom russischen Militär entwickelte Global Orbiting Navigation Satellite System (Glonass). Hierbei werden die Entfernungen anhand der benötigten Laufzeiten des ausgestrahlten Signals von bekannten Referenzpunkten (Satelliten) gemessen.

2.2. GPS - ein Überblick

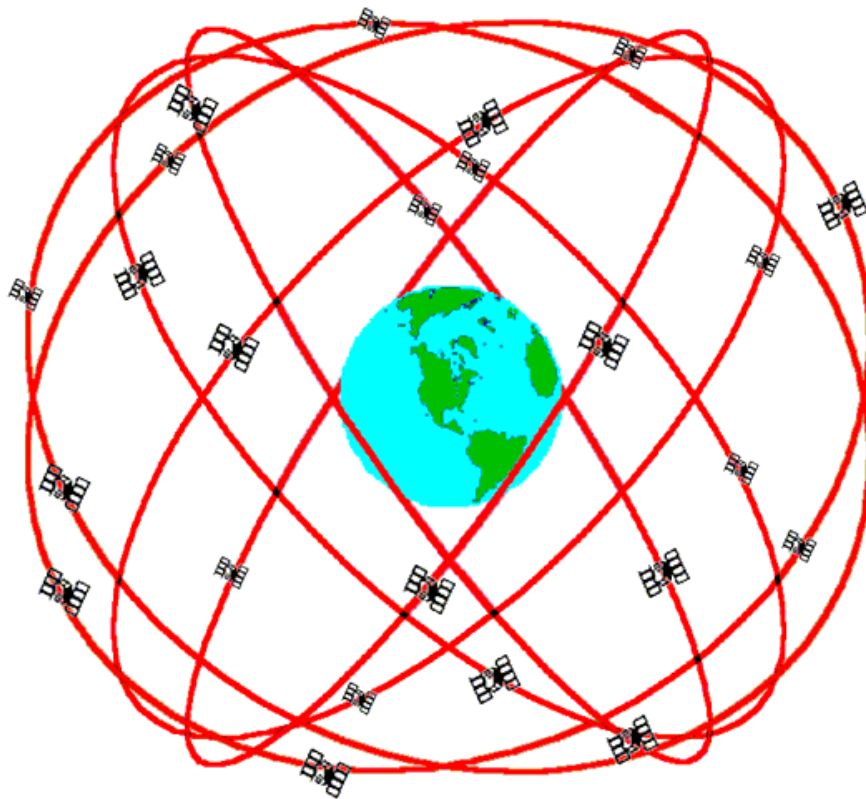


Abbildung 2-1: GPS-Satellitenkonstellation

GPS dient zur Positionsmessung: Neben diversen Möglichkeiten, die Position eines Objekts relativ zu einer Referenz zu bestimmen, bietet GPS bzw. verwandte Systeme (z.B. Glonass) eine Positionsbestimmung im WGS84-Koordinatensystem. Diese weltweit eindeutige Position kann durch Vergleich mit digitalen Karten gut ausgewertet werden. GPS-Signale können zudem an jedem Ort bei jedem Wetter auf der ganzen Welt empfangen werden. Einzige Voraussetzung ist die freie Sicht zum jeweiligen GPS-Satelliten. Das GPS-System garantiert, dass sich immer zwischen sechs und 12 Satelliten – freies Sichtfeld vorausgesetzt – im Sichtfeld des Sensors befinden. Hierfür umkreisen 24 Satelliten auf sechs 55 Grad verschobenen orbitalen Laufbahnen ständig die Erde. Pro Laufbahn gibt es jeweils vier Satelliten. Die Umlaufzeit eines Satelliten beträgt ca. 12 h in einer Höhe von 20200 km.

GPS-Satelliten senden auf zwei Frequenzen ($L1 = 1575.42$ MHz, $L2 = 1227.60$ MHz) jeweils ihre Identifikation, Status, Entfernungsdaten, Zeitdaten und Korrekturen ihrer Ephemeriedaten zum Sensor des Nutzers. Auf der zweiten Frequenz ($L2$) werden verschlüsselte Daten (P-Code) versandt, die nur dem amerikanischen Militär zugänglich sind. Auf der ersten Frequenz ($L1$) sind die gesendeten Daten für jedermann ohne weitere Gebühren zur Positionsbestimmung zugänglich. Jedoch wurde die Genauigkeit aus politischen Gründen beabsichtigt vom Betreiber durch ein Verfälschungsverfahren (Selective Availability, kurz SA) herabgesetzt. SA veränderte sich zeitlich nur langsam und war stetig [Hoffmann-Wellenhof, Lichtenegger, Collins, 1992].

Für eine dreidimensionale Positionsbestimmung benötigt man mindestens vier Entfernungsmessungen zu verschiedenen Punkten [Hoffmann-Wellenhof, Lichtenegger, Collins, 1992]. Die Genauigkeit von GPS-Positionsmessungen liegt bei ca. ± 100 m. Folgende Abbildung 2-2 zeigt die Verteilung einer GPS-Messung im Standard Positioning Service (SPS) über einen Zeitraum von ca. 30 min.

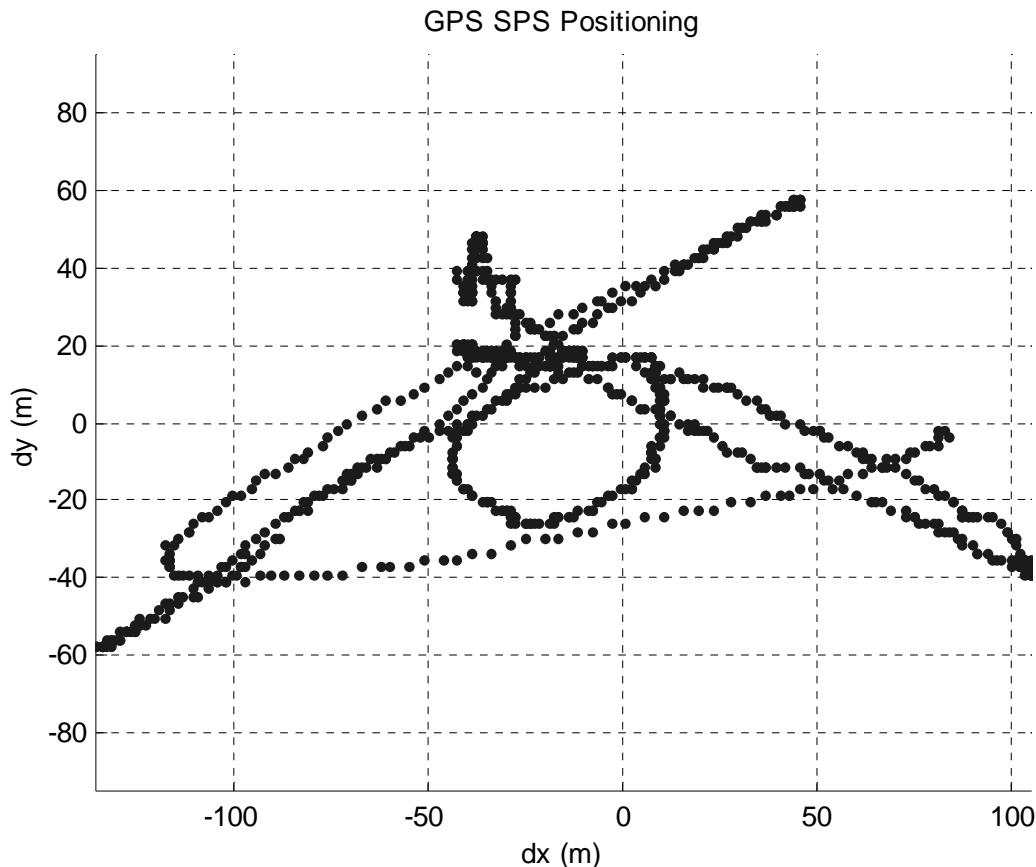


Abbildung 2-2: GPS-SPS-Messung

Der Positionsfehler setzt sich dabei aus verschiedenen Quellen zusammen:

Die Satellitenuhren müssen für eine exakte Laufzeitmessungen synchron mit den Empfängeruhren laufen. Da dies nur mit einer bedingten Genauigkeit möglich ist, ergibt sich hieraus ein Positionsfehler von ca. 1,5 m.

Orbit- bzw. Bahnfehler entstehen durch geringe Abweichungen der Satelliten von ihrer vorberechneten Bahn. Diese Fehler fallen mit einer Positionsungenauigkeit von ca. 2,5 m ins Gewicht.

Ionosphärische Effekte sind bedingt durch Laufzeitunterschiede beim Durchdringen des Signals durch das Medium. Der Fehler, der durch die Ionosphäre hervorgerufen wird, beträgt ca. 5,0 m. Die ionosphärischen Fehler sind frequenz- und ortsabhängig und können dadurch beim zusätzlichen Auswerten der militärischen Frequenz L2 korrigiert werden.

Troposphäre Effekte sind ebenfalls bedingt durch die Laufzeitunterschiede und werden mit ca. 0,5 m angesetzt. Sie sind frequenzunabhängig.

Das Empfängerrauschen trägt mit ca. 0,3 m zum Gesamtfehler bei.

Multipath-Effekte treten durch Reflexion der GPS-Signale an Gegenständen (z.B. an Gebäuden) und der damit verlängerten Laufzeit des Signals auf und tragen durchschnittlich ca. 0,6 m zum Gesamtfehler bei.

Selective Availability (SA) ist die Verfälschung des GPS-Signals für die zivile Nutzung durch das amerikanische Militär. Mit Abweichungen von ca. 30,0 m beeinflusst sie den Gesamtfehler am schwersten. Dieser Fehler kann u.a. mit militärischen Empfängern kompensiert werden.

Daraus ergibt sich ein Standardfehler (UERE) eines zivilen Empfängers von insgesamt 50,0 m bei einem DOP (Dilution of Precision) von 1.0.

Der Gesamtfehler der Positionsbestimmung für die aktuelle Messung auf einem Signifikanzniveau von 95 % errechnet sich aus der Multiplikation des Standardfehlers UERE mit dem entsprechendem DOP-Wert. Die DOP-Werte entsprechen hierbei dem aus der Satellitenkonstellation errechneten Genauigkeitswert. Eine Satellitenkonstellation, in der nur Satelliten aus einer Himmelsrichtung ausgewertet wurden, wird typischerweise einen deutlich höheren DOP-Wert aufweisen als eine, bei der die Satelliten über den Himmel gleichmäßig verteilt sind. Je höher die Anzahl an sichtbaren Satelliten, desto niedriger ist in der Regel der DOP-Wert, da die Satelliten bei höherer Anzahl aufgrund ihrer Laufbahnen besser verteilt sind.

2.2.1. Koordinatensysteme

Das Bezugssystem für GPS-Positionen ist das sog. WGS-84 Ellipsoid. Fast jedes Land verwendet bei der Landesvermessung ein eigenes Koordinatensystem, das sich auf ein lokales Ellipsoid bezieht, um die Genauigkeit der Darstellung zu optimieren. In Deutschland wird hierfür die Gauß-Krüger-Abbildung verwendet. Durch entsprechende Transformationsvorschriften kann jedoch jede Position durch geeignete Referenzpunkte in eine andere überführt werden. Da Navigationskarten heute ohnehin in WGS-84 Koordinaten, also dem GPS-Koordinatensystem angelegt sind, hat die entsprechende Umwandlung keine weitere Bedeutung für diese Arbeit. Um jedoch Fahrzeugbewegungen zu beschreiben, bietet sich eher ein kartesisches anstatt eines elliptischen Koordinatensystems an (siehe auch Abbildung 2-3). Die Umwandlung bzw. eine Vereinfachung soll im folgenden kurz beschrieben werden.

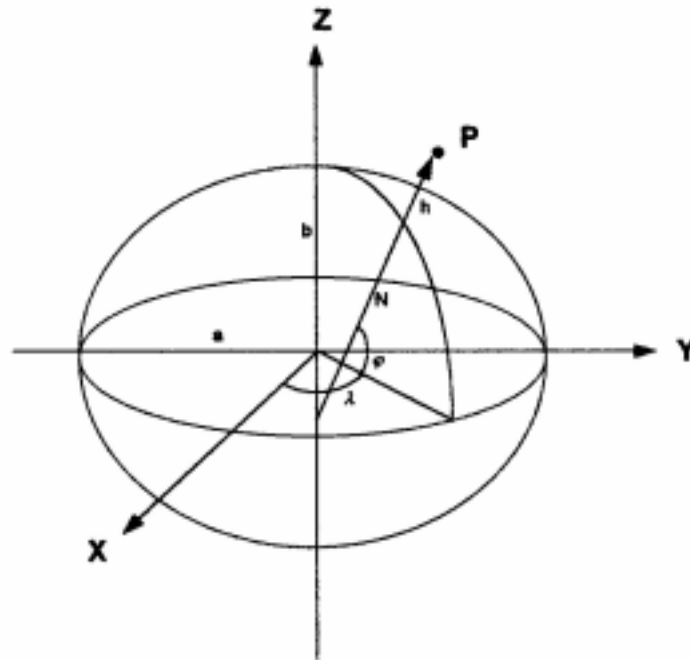


Abbildung 2-3: Koordinatensystem

Um eine Position von Längen- und Breitengrad in eine kartesische Darstellung zu wandeln, sind folgenden Umrechnungen notwendig:

$$(2-1) \quad x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + h) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\lambda) \\ (N + h) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\lambda) \\ ((1 - e^2) \cdot N + h) \cdot \sin(\varphi) \end{bmatrix}$$

mit $\varphi = \text{Breitengrad}$
 $\lambda = \text{Längengrad}$

wobei N der Normalkrümmungsradius ist und aus dem WGS 84 zugrunde liegenden Parametern nach

$$(2-2) \quad N = \frac{a^2}{b \cdot \sqrt{1 + e^2 \cdot \cos^2(\varphi)}}$$

mit der ersten numerischen Extremität

$$(2-3) \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

und der zweiten numerischen Extremität

$$(2-4) \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$$

berechnet wird. a und b entsprechen dabei den Größen der Halbachsen des WGS-84-Ellipsoids.

Dem WGS-84 liegt ein geozentrisches Niveauellipsoid mit den Parametern a und b zugrunde.

$$(2-5) \quad \begin{aligned} a &= 6.378137 \cdot 10^6 \text{ m} \\ b &= 6.356752 \cdot 10^6 \text{ m} \end{aligned}$$

Um Rechenzeit und Aufwand zu sparen, wird im folgenden eine vereinfachte Entfernungsberechnung eingeführt. Dies ist hier möglich, da sämtliche Berechnungen in einer kleinen Umgebung durchgeführt werden und somit der Abstand zwischen zwei benachbarten Punkten gering ($< 2 \text{ km}$) bleibt.

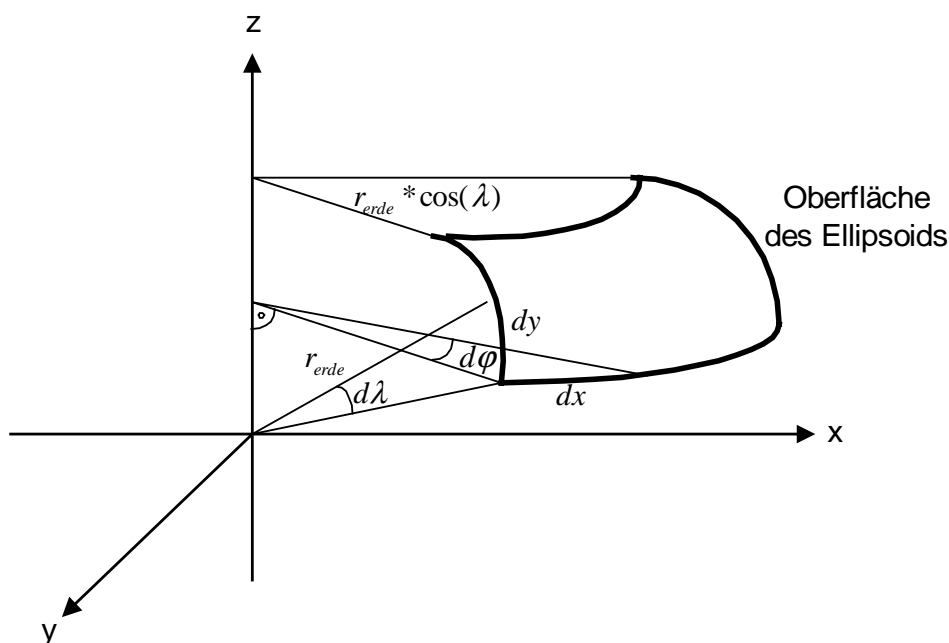


Abbildung 2-4: Oberfläche des Ellipsoids

Die Entfernungen dx und dy , die durch die Winkel $d\lambda$ und $d\varphi$ zwischen zwei Punkten erzeugt werden (siehe Abbildung 2-4), können wie folgt berechnet werden:

$$(2-6) \quad d = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

$$\text{mit (2-7)} \quad \begin{aligned} dx &= r_{\text{Erde}} \cdot d\lambda \\ dy &= r_{\text{Erde}} \cdot d\varphi \cdot \cos(\lambda_1) \end{aligned}$$

$$\text{und (2-8)} \quad \begin{aligned} d\lambda &= \lambda_1 - \lambda_2 \\ d\varphi &= \varphi_1 - \varphi_2 \end{aligned}$$

Dabei wird angenommen, dass sich der Erdradius zwischen den Punkten nicht ändert. Folgende Fehlerabschätzung (siehe Abbildung 2-5) zeigt, wie sich der Fehler mit der Entfernung zwischen den Punkten vergrößert.

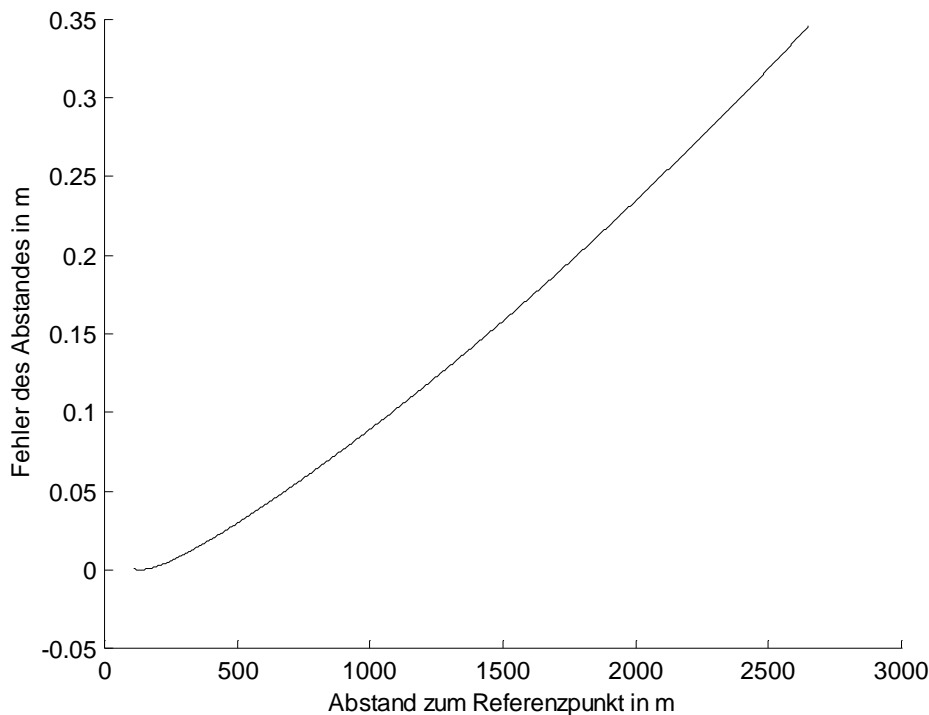


Abbildung 2-5: Fehlerabschätzung bei vereinfachter Entfernungsberechnung

Weitere wichtige Koordinatensysteme sind das ETRS 89 (Europäisches Terrestrisches Referenz System) und das ITRS (Internationales Terrestrisches Referenz System). Die Zahl 89 bedeutet, dass das ETRS 89 im Jahre 1989 an das ITRS angeglichen wurde. Diese Jahreszahl ist deshalb so wichtig, da sich Kontinente im Laufe der Jahre verschieben und somit eine damals vermessene Position mit der heutigen in einem weltweit eindeutigen Koordinatensystem differieren würde. Besonders wichtig wird dieser Zusammenhang, wenn das Genauigkeitsniveau einer Messung im cm-Bereich liegen soll. Weiter kann im WGS-84-Koordinatensystem keine cm-genaue absolute Position angegeben werden, da keine entsprechenden Vermarkungspunkte bekannt sind. Dies stellt jedoch kein Problem dar, da GPS-Messungen ohnehin nur im m-Genauigkeitsbereich liegen. Bei einer Messung mit Differential GPS hingegen bezieht sich die Genauigkeit immer nur auf den Referenzpunkt. D.h. die Genauigkeit absolut gesehen setzt sich aus der Genauigkeit des vermessenen Punktes, auf dem die Referenzstation steht, und der Genauigkeit der Messung selbst zusammen.

2.2.2. Differential GPS

Die mit Standard GPS (Standard Positioning Service, kurz SPS) erreichbaren Positionsgenauigkeiten liegen ca. im Bereich von ± 100 m (Signifikanzniveau 95 %). Militärische Nutzer können die Genauigkeit durch Kenntnis der Verfälschung und der zweiten Frequenz auf ca. ± 10 m (Signifikanzniveau 95 %) steigern. Um die Genauigkeit auch im zivilen Bereich zu steigern, bietet sich das Verfahren Differential GPS (DGPS) an. Bei dem Konzept von DGPS werden zwei GPS-Empfänger benutzt: ein mobiler und ein statischer. Der statische Empfänger wird an einem exakt vermessenen Punkt aufgestellt und kann so den Messfehler der einzelnen GPS-Messungen (Pseudorange, kurz PR) bestimmen. Gleichzeitig ermittelt die mobile Station die entsprechenden Satellitenentfernungen, die zur Positionsbestimmung

herangezogen werden sollen. Über einen Datenlink werden die Korrekturen an die mobile Station übermittelt, die dann ihre Pseudoranges korrigieren (Pseudo Range Correction, kurz PRC) und so die Positioniergenauigkeit deutlich steigern. Folgende Abbildung 2-6 stellt das Verfahren dar.

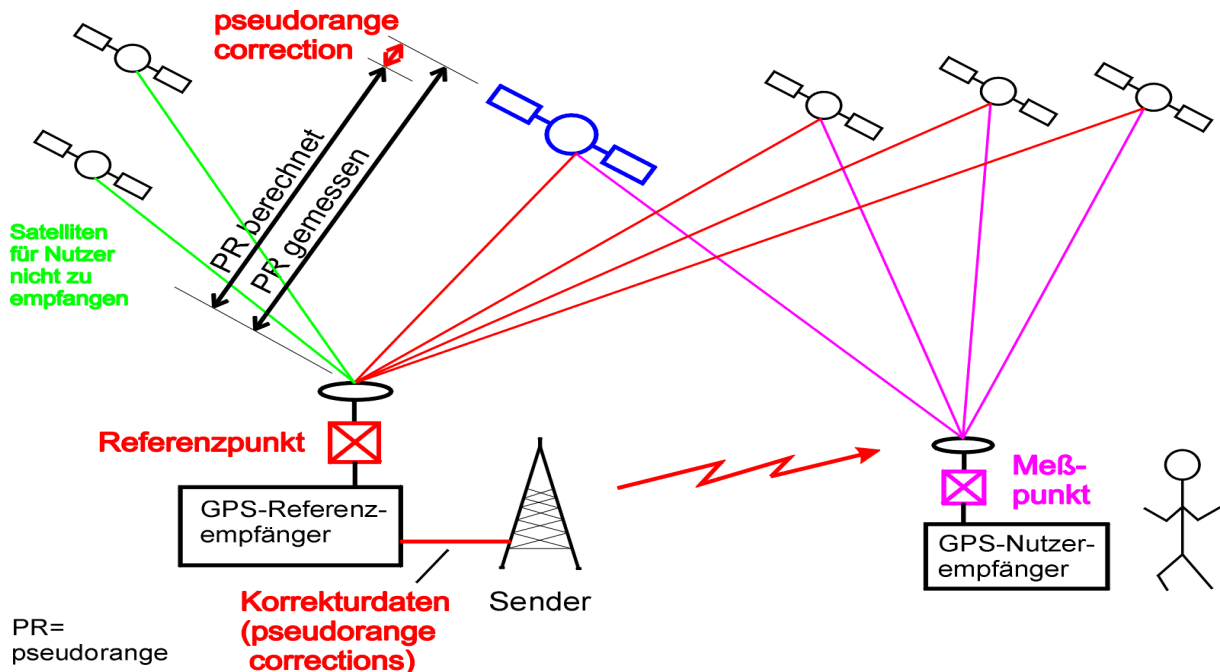


Abbildung 2-6: Prinzip von Differential GPS

Der GPS-Empfänger benötigt im Prinzip für jede Positionsberechnung einen Korrekturdatensatz, da die PRC streng genommen auf den berechneten Zeitpunkt begrenzt ist. Um nicht für jede Messung einen kompletten Korrekturdatensatz übermitteln zu müssen, wurde eine zweite Korrekturgröße, die Range Rate Correction (kurz RRC), eingeführt. Sie gibt Aufschluss über die zeitliche Veränderung der PRC. Somit können auch kurze Ausfälle (< 10 s) des Referenzsignales überbrückt werden.

DGPS ist ein gängiges Verfahren zur Korrektur von GPS-Messungen und liefert darüber hinaus höhere Genauigkeiten als heute mit militärischen Empfängern erzielbar wären. Somit ist dieses Verfahren auch noch von Bedeutung, nachdem die so oft zitierte Abschaltung von SA erfolgte. Genauigkeiten im Bereich von DGPS sind für heutige Fahrerassistenzsysteme unerlässlich, wie sich in späteren Kapiteln dieser Arbeit noch zeigen wird.

Folgende Abbildung 2-7 zeigt eine Beispielmessung für den Genauigkeitsbereich von DGPS. Die Messung erfolgte über einen Zeitraum von ca. 30 min an einem festen Punkt.

Durch DGPS sind Genauigkeiten zwischen 1-10 m zu erreichen. Die Genauigkeit von DGPS hängt dabei im wesentlichen von der Entfernung zur Referenzstation (Baseline) ab. Die Einflüsse von SA können mit DGPS vollständig kompensiert werden. Zusätzlich werden troposphärische und ionosphärische Fehler korrigiert. DGPS dient also nicht nur zur Kompensation von SA. Mit größerer Entfernung zur Referenzstation werden jedoch aufgrund der unterschiedlichen Laufzeiten der Signale durch die Sphären die Einflüsse der sphärischen Effekte deutlicher.

2.2.3. Carrier Phase Differential GPS

Carrier Phase Differential GPS (CDGPS) ist eine Erweiterung von DGPS. Zusätzlich zu den PRC wird jedoch die Phasenlage der Trägerphasen der jeweiligen Messung bestimmt und an die mobile Station übertragen. Hierbei wird auch die Phasenlage der militärischen Frequenz L2 ausgewertet, ohne jedoch die Information auf dieser Frequenz weiter zu verarbeiten. Dieses Verfahren ist ebenfalls zivilen Nutzern zugänglich, wobei die erreichbare Genauigkeit zwischen 1 m – 0,02 m liegt.

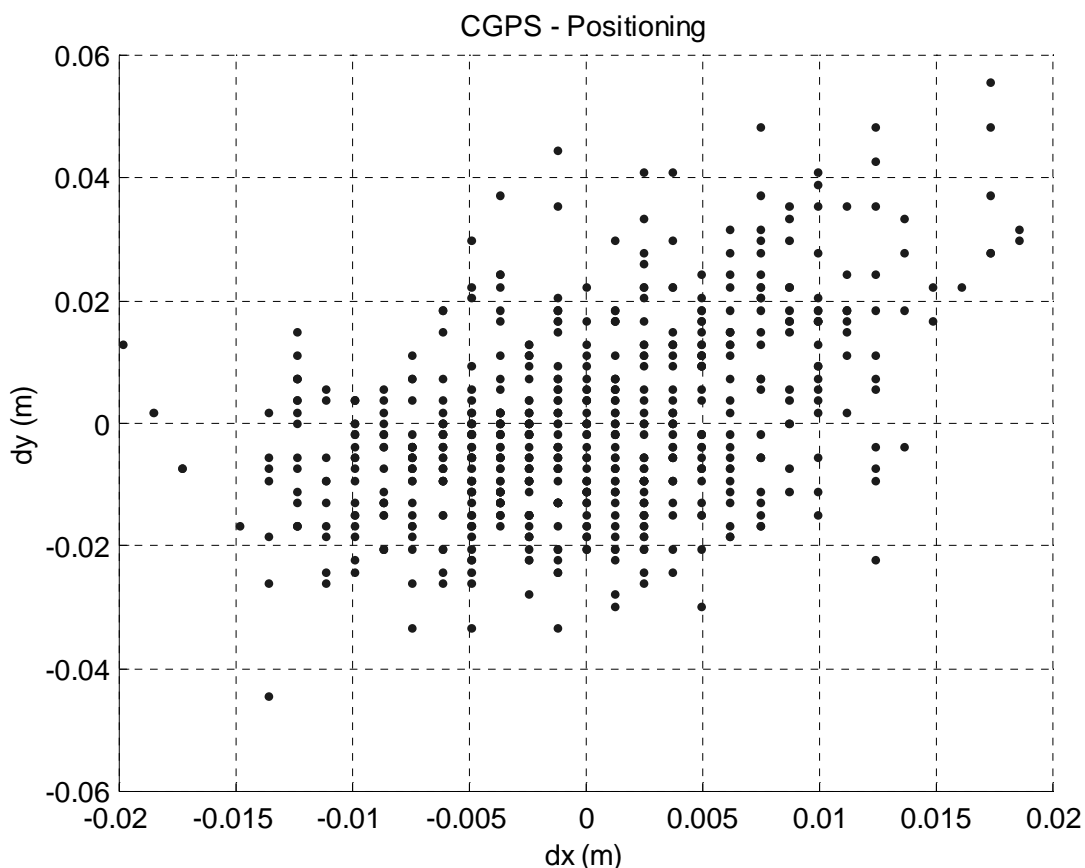


Abbildung 2-8: Beispiel einer Carrier Phase Differential GPS-Messung

Die Wellenlängen der Trägerphasen betragen bei der L1-Frequenz 19 cm und bei der L2-Frequenz 24 cm. Die Entfernung zum Satelliten kann jetzt in Anzahl der Wellenlängen (z.B. 124567967.330 Wellenlängen) mit einem anfangs unbekanntem, a-

ber ganzzahligen Offset angegeben werden. Ein statistisches Verfahren vergleicht jeweils Satellitenpaare der Referenzstation mit der mobilen Station und findet den gesuchten ganzzahligen Offset. Jetzt kann eine Positionsmessung im 1 bis 2 cm-Bereich erfolgen (siehe Abbildung 2-8).

Um eine eindeutige oder wahrscheinliche Lösung zu erhalten, sind heute Messungen von ca. ein bis zwei Minuten bei guter Satellitensicht erforderlich. Danach kann die gefundene Lösung weiter verwendet werden und jede Messung in diesem Genauigkeitsbereich erfolgen. Reißt der Datenstrom von der Referenzstation ab oder werden die Satelliten kurzzeitig von einem Gebäude, einer Brücke o.ä. verdeckt, muß eine neue Lösung errechnet werden. Abhilfe schafft hier die Versorgung der Algorithmen in den Sensorrechnern mit zusätzlichen Informationen wie Geschwindigkeit und/oder Gierrate und/oder Kartendaten, so dass die Positionsberechnung auch ohne Satellitensicht kurzzeitig fortgesetzt werden kann. Solche Systeme sind jedoch noch Forschungsgegenstand.

CDGPS stellt auch zusätzliche Anforderungen an die Referenzstationen:

- Die Entfernung zur Referenzstation muß kleiner sein als 10 km.
- Zusätzlich müssen die Phasenkorrekturen übertragen werden.
- Die Referenzstationen müssen vernetzt sein, um kontinuierliche Daten an den Übergängen zwischen den 10 km-Segmenten zu liefern.

Während DGPS bereits heute flächendeckend verfügbar ist, befindet sich ein Netz für CPDGPS erst im Aufbau. Zum Testen wurde deshalb eine eigene Referenzstation auf dem Testgelände bei BMW aufgebaut und einige Testmessungen durchgeführt. Die Online-Verbindung wird über ein Funkmodem mit einer Übertragungsrate von 9600 Baud hergestellt. Für die Referenzstation wurde eine gemittelte, aber feste Position festgelegt. Diese Position ist nicht zwingend auf einen cm genau vermessen, die relativen Messungen mit der beweglichen Station sind jedoch cm-genau zum Referenzpunkt. Abbildung 2-9 zeigt die aufgebaute Referenzstation.



Abbildung 2-9: Bild der Referenzstation

2.2.4. Referenzsysteme im Vergleich

Referenzsysteme sind für die Positionsbestimmung nahezu genauso wichtig wie das GPS-System selbst. Wünschenswert wäre ein weltweit einheitliches, überall verfügbares Referenzsystem. Da die abgestrahlten Signale jedoch nur im begrenzten Bereich ihre Gültigkeit haben, haben sich verschiedene Systeme entwickelt.

In dieser Arbeit wurden im wesentlichen nur Referenzsysteme für den deutschen Raum untersucht. Eine kurze Übersicht (siehe Tabelle 2-2) soll jedoch Aufschluss über weitere flächendeckende Verfahren geben:

Tabelle 2-2: Referenzsysteme im Vergleich

Dienst	Übertragung	DGPS	CPDGS	Bemerkung
ALF	Langwelle	X		Guter Überlandempfang
EPS	UKW, DAB	X		Guter Stadtempfang
HEPS	2m, Handy, DAB		x	DAB-Empfang sehr gut
Omnistar	Satellit (geostationär)	x		Satellitensichtverbindung notwendig
US-Coast-Guard	Funk	x		
WAAS	Satellit	X		Keine zusätzlichen Empfänger notwendig

Im Großraumbereich München wurden folgende Systeme getestet:

EPS über UKW

ALF über Langwelle

HEPS über DAB (Digital Audio Broadcast)

EPS wird über UKW ausgestrahlt und ist somit mit jedem RASANT-tauglichen UKW-Radio zu empfangen. Die Daten werden hierbei von den Radiosendestation über einen für Daten reservierten Bereich übertragen. Während der UKW-Empfang im Stadtbereich stets sehr hohe Qualität aufweist, zeigten sich im Überlandbetrieb relativ viele Ausfälle. Auch wenn die Musik aus dem Radio immer noch klar zu hören war, sank die Datenqualität im Überlandbereich deutlich (Daten sind eben fehleranfälliger als Musik). Einige Bitfehler, erzeugt durch eine leichte Störung des Nutzsignals, machen unter Umständen die komplette Botschaft unbrauchbar, während sich bei analogen Daten lediglich der Ton, der aus dem Radio schallt, unmerklich verändert. Die Genauigkeit der mit EPS berechneten Positionslösungen lagen im Bereich von 1 bis 3 m.

ALF, das über Langwelle übertragen wird, zeigte sich genau umgekehrt zu EPS im Überlandbereich als sehr zuverlässig, während in der Stadt aufgrund des Vorliegens vieler elektrischer Felder ständig Ausfälle zu verzeichnen waren. Die Genauigkeit der mit ALF errechneten Positionslösungen liegt im Bereich von 3 bis 5 m. Diese Verschlechterung gegenüber EPS liegt hauptsächlich an der wesentlich größeren Entfernung zur Referenzstation in Mainflingen bei Frankfurt. Günstig bei Langwelle ist

auch die Tatsache, dass der Einbauort versteckt unterhalb des Fahrzeuges liegen kann und somit nicht das Design des Fahrzeuges beeinträchtigt

HEPS über DAB hat nicht nur den Vorteil der hohen Datenqualität in Überland und Stadtbereich, sondern übermittelt auch Korrekturdatensätze zur Berechnung einer Phasenpositionslösung im cm-Bereich. Im folgenden soll nochmals ein Überblick über die Genauigkeiten der verschiedenen GPS-Korrektur-Verfahren gegeben werden.

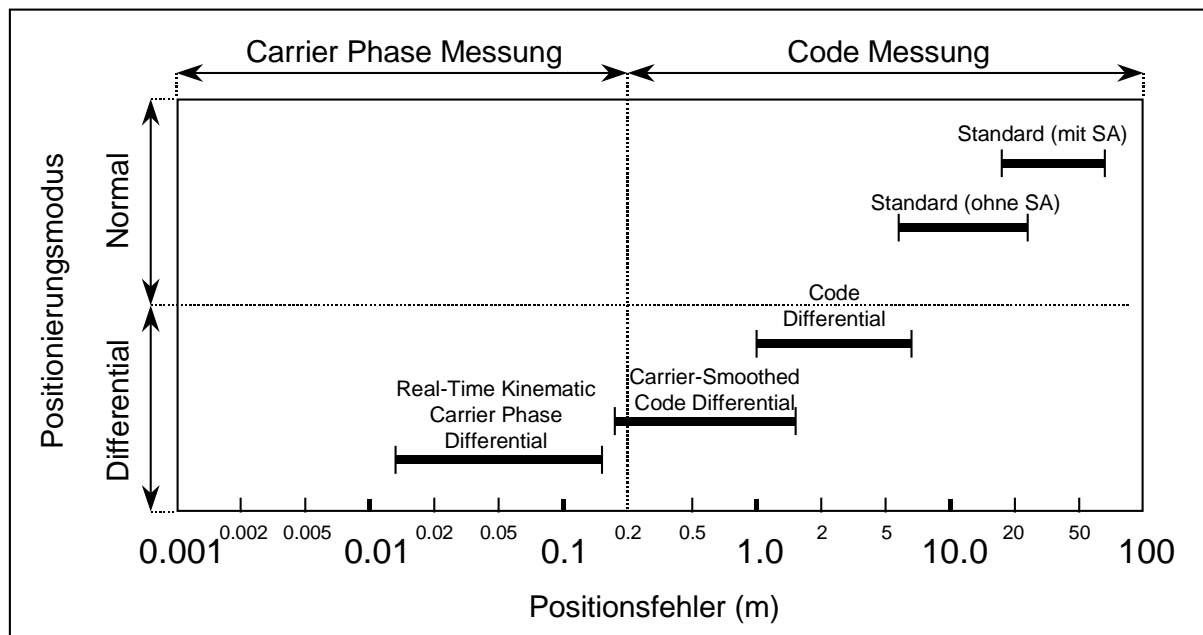


Abbildung 2-10: Genauigkeiten im Vergleich

Anhand dieser Darstellung (siehe Abbildung 2-10) kann das entsprechende Verfahren für die jeweils geforderte Genauigkeit abgelesen werden. Die in einem späteren Kapitel vorgestellten Anwendungen nutzen das gesamte Spektrum aus.

2.3. Koppelnavigation

Typische GPS-Receiver liefern Positionsupdates mit einer Rate von 1 Hz bei guter Satellitensicht und keinen Ausfällen. Bei Fahrzeuggeschwindigkeiten im Bereich von 50 m/s bedeutet dies, dass sich das Fahrzeug zwischen zwei Messungen um 50 m fortbewegt. Anwendungen im Bereich der Fahrerassistenzsysteme benötigen häufiger die Fahrzeugposition bzw. Informationen über die relative Fortbewegung des Fahrzeuges zwischen zwei Positionsupdates. Auch sollte das Gesamtsystem bei GPS-Ausfällen nicht unmittelbar einen Fehlerfall erzeugen.

Die Position des Fahrzeuges kann einfach anhand der Gierrate und der Fahrzeuggeschwindigkeit fortgeführt werden. Als Anfangsgrößen werden hierfür lediglich die Position und die Richtung der aktuellen Bewegung benötigt (siehe auch Abbildung 2-11).

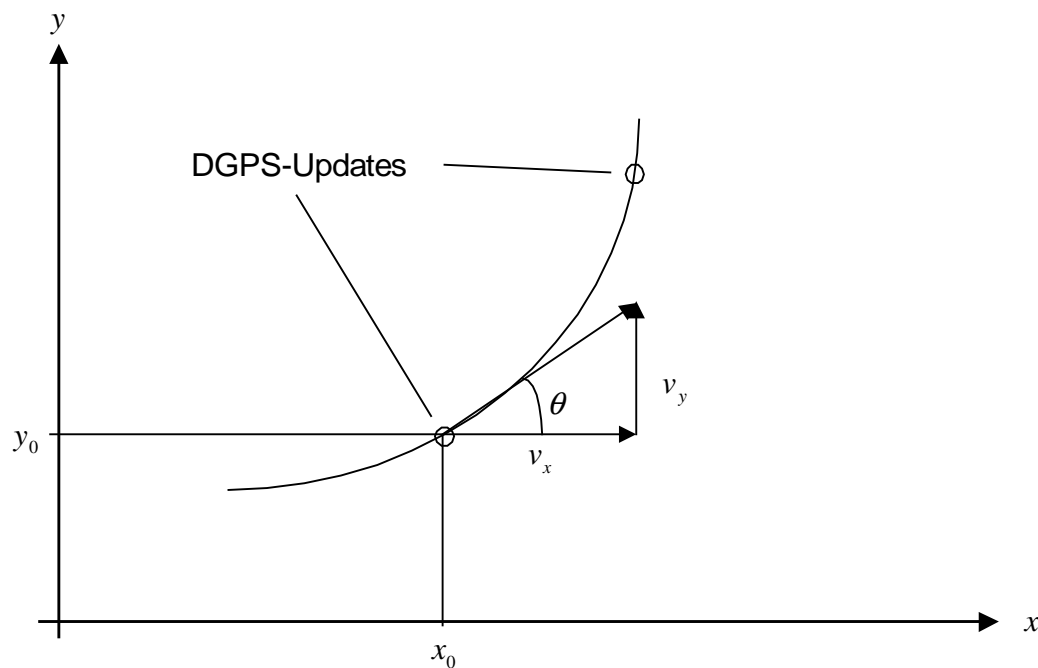


Abbildung 2-11: Positionsfortschreibung

Berechnung von Weg und Winkel mit Hilfe der Fahrzeugsignale Geschwindigkeit und Gierrate:

$$(2-9) \quad \begin{aligned} s &= s_0 + v \cdot dt \\ \theta &= \theta_0 + \omega \cdot dt \end{aligned}$$

Und der daraus resultierende Ort:

$$(2-10) \quad \begin{aligned} y &= y_0 + s \cdot \sin(\theta) \\ x &= x_0 + s \cdot \cos(\theta) \end{aligned}$$

Die Fehler in den einzelnen Messungen werden bei diesem Verfahren nicht berücksichtigt. Die Position wird mit den Fahrzeugsignalen nur bis zur nächsten Messung fortgeführt, die nächste GPS-Messung ersetzt alle vorangegangenen Messungen. Die fortlaufende Positionsbestimmung ist nur im optimalen Fall stetig.

Um diese Fahrzeuggrößen nicht nur für die Fortschreibung zu verwenden, sondern auch die gesamte fortlaufende Positionsbestimmung zu verbessern, bietet sich das systematische Verfahren der Kalmanfilterung an.

2.3.1. Kalman-Bucy-Filter zur Positionsfortschreibung

Das Zeitverhalten eines dynamischen Systems lässt sich aus dem mathematischen Modell berechnen. Sind nicht alle Zustände des Systems von außen messbar, versucht man, die fehlenden durch Messung der Ausgangsgrößen zu rekonstruieren. Da die dabei verwendeten Messungen mit Fehlern behaftet sind, erreicht man immer nur sogenannte Schätzwerte. Möglichst gute Schätzwerte kann man erreichen, indem man Vorwissen über die Messfehler (z.B. Standardabweichung) mit in die Rechnung einbezieht. Man spricht dann von stochastischer Filterung. Diese lineare Filteraufgabe ist von Kalman und Bucy umfassend gelöst worden. Auf die Herleitung vom allgemeinen nichtlinearen zeitdiskreten Kalman-Bucy-Filter soll an dieser Stelle verzichtet werden. Hierzu sei z.B. auf [Bramer, Stiffling, 1990] verwiesen.

Die Formeln zur Berechnung werden direkt angegeben. Zum Überblick wird hier die Struktur eines Kalman-Bucy-Filter dargestellt (siehe Abbildung 2-12).

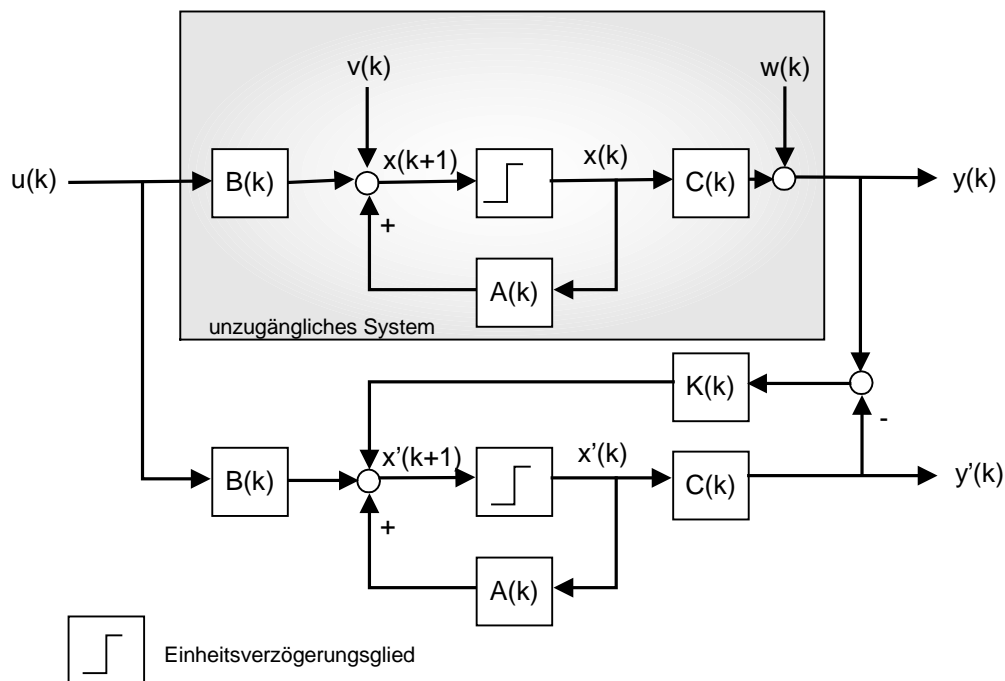


Abbildung 2-12: Realisierung eines Kalmanfilters

Gegeben ist folgendes diskretes dynamisches System:

$$(2-11) \quad \begin{aligned} \underline{x}(k+1) &= A(k) \cdot \underline{x}(k) + B(k) \cdot \underline{u}(k) + D(k) \cdot \underline{v}(k) \\ \underline{y}(k) &= C(k) \cdot \underline{x}(k) + \underline{w}(k) \end{aligned}$$

mit \underline{x} als Zustandsvektor, \underline{u} als Steuervektor, \underline{v} als Störungsvektor, \underline{y} als Messvektor und \underline{w} als Rauschen der Messungen. Die Lösungsgleichungen für die Filterung \underline{x}_f bzw. Einschrittprädiktion \underline{x}_p lauten dann:

$$\begin{aligned}\underline{x}_f(k) &= \underline{x}_p(k) + K(k) \cdot \{y(k) - C(k) \cdot \underline{x}_p(k)\} \\ \underline{x}_p(k+1) &= A(k) \cdot \underline{x}(k) + B(k) \cdot \underline{u}(k)\end{aligned}$$

$$(2-12) \quad \begin{aligned}K(k) &= P_p(k) \cdot C(k)^T \cdot \{C(k) \cdot P_p(k) \cdot C(k)^T + R(k)\}^{-1} \\ P_p(k+1) &= A(k) \cdot P_f(k) \cdot A(k)^T + Q \\ P_f(k) &= P_p(k) - K(k) \cdot C(k) \cdot P_p(k)\end{aligned}$$

mit den Matrizen K als Verstärkungsmatrix, P_p als Prädiktionsmatrix und P_f als Filtermatrix. Q stellt die Systemfehlermatrix dar, R die Messfehlermatrix. Der Zustandsvektor \underline{x} des Systems lautet:

$$(2-13) \quad \underline{x}(k+1) = \begin{pmatrix} \omega \\ v \\ x_3(k) + v \cdot dt \cdot \sin(x_5(k+1)) \\ x_4(k) + v \cdot dt \cdot \cos(x_5(k+1)) \\ x_5(k) + \omega \cdot dt \\ v \cdot dt \end{pmatrix}$$

x_1 beschreibt die Giergeschwindigkeit des Fahrzeuges, x_2 die Ist-Geschwindigkeit. x_3 und x_4 beschreiben die Position des Fahrzeuges in kartesischen Koordinaten bezogen auf einen festen Referenzpunkt (siehe Gleichung 2-10), um numerische Probleme zu vermeiden. Die Beschreibung einer Position durch Längen- und Breitengrade im Genauigkeitsbereich einiger cm benötigt mindestens 7 Nachkommastellen. Der Referenzpunkt wird dabei bei jedem Messupdate des Filters einer GPS-Messung neu festgelegt. x_5 beschreibt die absolute Richtung des Fahrzeuges gegen Nord. Der Wert wird dabei von außen zwischen -180 und $+180$ Grad gehalten. x_6 stellt den pro Zeitschritt zurückgelegten Weg dar. Da der Zustandsvektor ein nicht lineares System beschreibt, muss die Jacobi-Matrix berechnet werden (Extended Kalman Filter):

$$(2-14) \quad \frac{dA}{d\underline{x}} \cdot \frac{d\underline{x}}{dt} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & v \cdot dt \cdot \cos(x_{f5}) \cdot \sin(x_{f5}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -v \cdot dt \cdot \sin(x_{f5}) \cdot \cos(x_{f5}) \\ dt & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & dt & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Die Systemfehlermatrix hat sich mit folgenden Größen als geeignet erwiesen:

$$(2-15) \quad Q = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_err^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_err^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Folgender Messvektor stellt die verwendeten Messungen dar:

$$(2-16) \quad y = (\omega \quad v \quad x \quad y \quad \theta)^T$$

Dabei beschreibt y_1 die gemessene Gierrgeschwindigkeit und y_2 die aus den Rad-drehzahlen berechnete Ist-Geschwindigkeit des Fahrzeuges. y_3 und y_4 stellen die GPS-Messung bezogen auf den gültigen Referenzpunkt dar. y_5 beschreibt den abso-luten Winkel gegen Nord aus einer Messung. Dieser kann hierbei den Winkel aus der digitalen Karte oder von einem Kompass darstellen, wird aber nicht zwingender-maßen benötigt. Die Messungen fallen zu unterschiedlichen Zeiten an. Während die GPS-Messung typischerweise im Sekundentakt erneuert wird, können die Gierrate und die Geschwindigkeit meist häufiger gemessen werden. Der Updatetakt ist auf 100 ms eingestellt, kann aber ohne weiteres verändert werden. Die Messungen aus der digitalen Karte können je nach Verfügbarkeit eingebracht werden, während Messwerte aus einem Kompass auch mit der Systemrate erneuert werden können. Die Messfehlermatrix muss dabei der jeweilig gültigen Varianz der Messung ange-passt werden. Die Gierrate, die Geschwindigkeit und die Richtung aus dem Kompass haben eine gleichbleibende Varianz, die sich aus den verwendeten Sensoren und den Umgebungsbedingungen ergibt. Die GPS-Messungen und die Richtungsmes-sungen aus der Karte verändern die Varianz jedoch bei jeder Messung. Der Fehler aus GPS wird dabei im wesentlichen über die Verfügbarkeit von DGPS und den DOP Werten berechnet.

Daraus ergibt sich folgende Messfehlermatrix

$$(2-17) \quad R = \begin{bmatrix} \varepsilon_{yaw} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{velocity} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{gps} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{gps} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{map} \end{bmatrix}$$

Der Startwert für die P-Matrix wird mit 1.0 festgelegt. In folgender Abbildung 2-13 wird der Vergleich von Messungen mit und ohne Filterung dargestellt. Die durchge-zogene dicke Linie beschreibt dabei das gefilterte Ergebnis. Die dünne Linie stellt die GPS-Messungen mit normaler Positionsfortschreibung dar (siehe auch Abbildung 2-11). Neben dem Vorteil einer im Systemtakt aktualisierten Messung gleicht das Filter auch Rauschen in den GPS-Messwerten aus und bietet so einen nahezu stetigen Messverlauf.

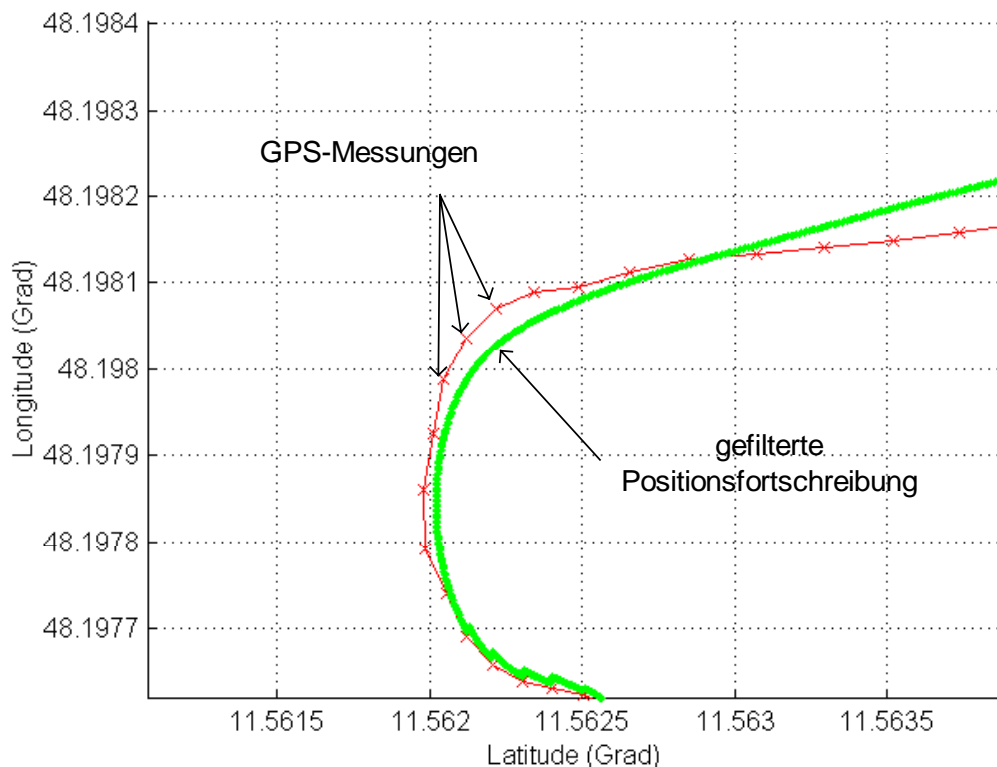


Abbildung 2-13: Vergleich von gefilterter und ungefilterter Messung

2.4. Map-Matching

Die Zuordnung der Messungen auf eine entsprechende Referenz (digitale Karte) erfolgt mit Hilfe einer Abbildungsvorschrift (Map-Matching). Zu berücksichtigen sind dabei unter anderem die Richtung des Fahrzeuges, der Abstand zur einer Messung zur Straßenlinie der Karte sowie Alternativmöglichkeiten (Kreuzung, Parallelen usw.).

Diverse bisherige Verfahren des Map-Matching waren darauf bedacht, im Rahmen der Positioniergenauigkeit von Standard GPS eine Straße zu finden und dem Fahrer Informationen zur Routenwahl zu liefern. Die Positioniergenauigkeiten liegen je nach Umgebungsbedingungen zwischen 5 m und 50 m. Um die hohe Genauigkeit der neuen Sensorik nutzen zu können, wird ein skalierbares Map-Matching notwendig, d.h. eine Anpassung an die jeweilige Genauigkeitsstufe der Messung bzw. der Karte.

Heutige Navigationssysteme verwenden beim Map-Matching nur teilweise die GPS-Position zum Fortschreiben einer gefundenen Übereinstimmung in der Karte. Meist wird die GPS-Position nur bei der initialen Suche verwendet und der Match dann mit Hilfe der Geschwindigkeit und evtl. unter Verwendung eines Kompasses an der gefundenen Straße entlang geführt. Die Form der Historie der Messungen wird mit der Form von einem Straßenstück in der Karte verglichen und so die richtige Position in der Karte gefunden. Bei Standard GPS war die digitale Karte genauer als die GPS-Messungen selbst und somit ein willkommener Sensorersatz. Durch die konsequente Steigerung der Positionsgenauigkeit sollte die digitale Karte nur noch in bestimmten Fällen (z.B. beim Sensorausfall oder für Zustände, in denen die digitale Karte genauere Informationen enthält als durch eine Messung erzielbar wären) als Ersatz gewählt werden.

2.4.1. Lotabbildung

Um ein hoch skalierbares Map-Matching zur Verfügung zu haben, wurde hier ein einfacher, aber für die Aufgabe wirkungsvoller Ansatz gewählt: Nachdem eine initiale Suche ein Straßenstück identifiziert hat, wird im wesentlichen das Map-Matching durch Fällen eines Lotes auf die Straße durchgeführt. Der Match wird zusätzlich anhand der Fahrtrichtung und der Lotlänge (Abstand zwischen Messung und Straße) bewertet.

In der initialen Suche wird ähnlich wie in bisherigen Navigationssystemen eine Historie von Messungen mit einem in der Gegend befindlichen Straßenstück verglichen.

Folgende Abbildung 2-14 soll den Ansatz veranschaulichen:

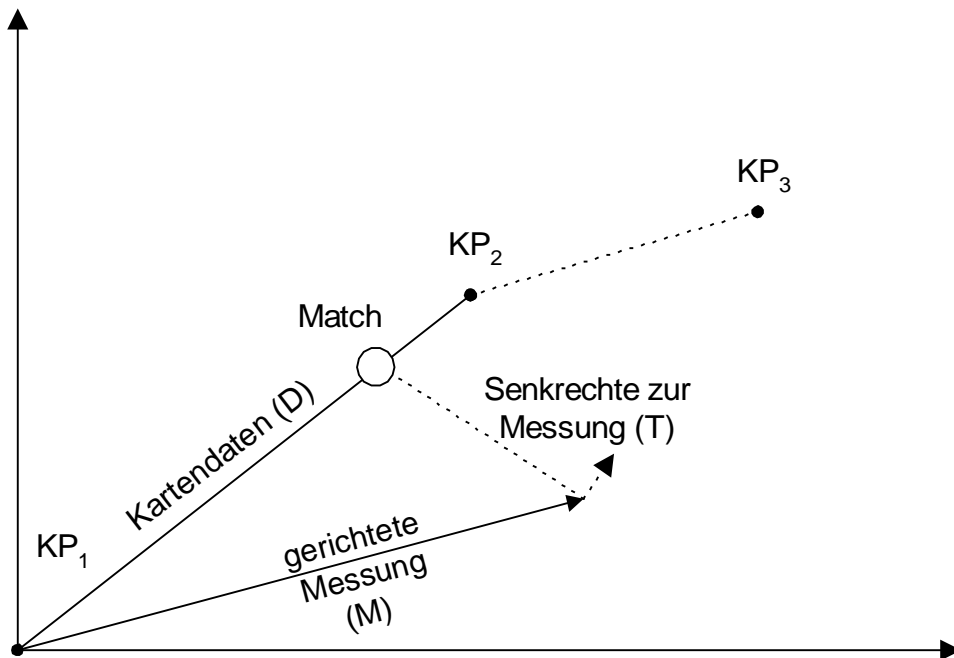


Abbildung 2-14: Prinzip von Map-Matching

Der erste Kartenpunkt (KP1) wird durch Umrechnung in den Ursprung gelegt. Alle weiteren Kartenpunkte (KP2-KPn) und die Messung werden bezüglich des ersten Kartenpunktes in das Koordinatensystem eingetragen. Der Vektor zwischen Kartenpunkt 1 und Kartenpunkt 2 wird mit D bezeichnet.

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{ref}} &= \lambda_1 \\ \varphi_{\text{ref}} &= \varphi_1 \end{aligned}$$

(2-18)

$$\begin{aligned} \underline{D} &= \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\lambda_2 - \lambda_{\text{ref}}) \cdot r_{\text{Erde}} \\ (\varphi_2 - \varphi_{\text{ref}}) \cdot r_{\text{Erde}} \end{pmatrix} \\ \underline{M} &= \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (m_\lambda - \lambda_{\text{ref}}) \cdot r_{\text{Erde}} \\ (m_\varphi - \varphi_{\text{ref}}) \cdot r_{\text{Erde}} \cdot \cos(\lambda_{\text{ref}}) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

mit $\lambda = \text{Längengrad}$ und $\varphi = \text{Breitengrad}$.

Die Richtung der Messung wird aus der Historie der Messungen bestimmt. Die Richtung ist dabei ein Ausgang des Kalmanfilters und entspricht der Richtung des Fahrzeuges. Der dabei senkrecht auf die Messung stehende Einheitsvektor kann leicht berechnet werden:

$$(2-19) \quad \underline{T} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta + \frac{\pi}{2}) \\ \sin(\theta + \frac{\pi}{2}) \end{pmatrix}$$

Folgende Vektorgleichung beschreibt die Situation aus Abbildung 2-14:

$$(2-20) \quad k_1 \cdot \underline{D} + k_2 \cdot \underline{T} = \underline{M}$$

Daraus folgt nach einigen Umformungen

$$(2-21) \quad k_1 = \frac{(m_x \cdot t_y) - (m_y \cdot t_x)}{(d_x \cdot t_y) - (d_y \cdot t_x)}$$

$$k_2 = \frac{m_y - k_1 \cdot d_y}{t_y}$$

wobei k_1 ein Maß für die Entfernung des Matches vom Ursprung (d_1) und k_2 ein Maß für die Entfernung des Matches von der Messung (d_2) beschreibt. Fällt das Lot auf die Straße zwischen Punkt 1 und Punkt 2 (also $0 \leq k_1 \leq 1$), so erhält man für die Abstände:

$$(2-22) \quad d_1 = \sqrt{(k_1 \cdot d_x)^2 + (k_1 \cdot d_y)^2}$$

$$d_2 = \sqrt{(k_2 \cdot t_x)^2 + (k_2 \cdot t_y)^2}$$

Liegt das berechnete k_1 nicht im Bereich zwischen 0 und 1, muss die Situation durch geeignete Sonderfälle betrachtet werden.

d_1 gibt somit jederzeit Auskunft über die Entfernung vom ersten bzw. nächsten Kartenpunkt, während d_2 zur Qualitätsbestimmung des Matches herangezogen werden kann.

2.4.2. Qualitätsbestimmung

Die Berechnung der Qualität der Abbildung auf die Referenz wird direkt aus dem Match-Algorithmus gewonnen. Die Lotlänge (d_2) und die Richtungsdivergenz wird bewertet. Skaliert wird die Bewertung mit dem wahrscheinlichen Kartenfehler. Die Lotlänge entspricht bei einem Messfehler von 0 exakt dem Kartenfehler. Der Kartenfehler wird aus dem Qualitätswert der digitalen Karten errechnet. Mit Hilfe von Übergangsfunktionen wird dabei die Wahrscheinlichkeit P_{match} berechnet.

$$\begin{aligned}
 d\theta &= \theta_{\text{messung}} - \theta_{\text{karte}} \\
 (2-23) \quad p(\theta) &= f_1^0(d\theta, 5^\circ, 25^\circ) \\
 p(d_2) &= f_1^0(d_2, \varepsilon_{\text{messung}}, \varepsilon_{\text{karte}}) \\
 p_{\text{match}} &= p(\theta) \cdot 0.5 + p(d_2) \cdot 0.5
 \end{aligned}$$

wobei $\varepsilon_{\text{karte}}$ dem Kartenfehler und $\varepsilon_{\text{messung}}$ dem Messfehler entspricht. Die Parameter für die Winkelbewertung sind empirisch gefunden. $\varepsilon_{\text{karte}}$ ist dabei ein empirisch gefundener Wert für die verwendete digitale Navigationskarte, der sich aber durch Lernvorgänge verändern kann. $\varepsilon_{\text{messung}}$ berechnet sich im wesentlichen aus der Satellitenkonstellation (HDOP). Ein typischer Wert für DGPS liegt dabei im Bereich von 3 m bis 6 m. Die berechneten Wahrscheinlichkeiten werden derzeit mit je 0.5 gleich bewertet. Die Funktion f_1^0 ist eine einfache Zugehörigkeitsfunktion (siehe Abbildung 2-15).

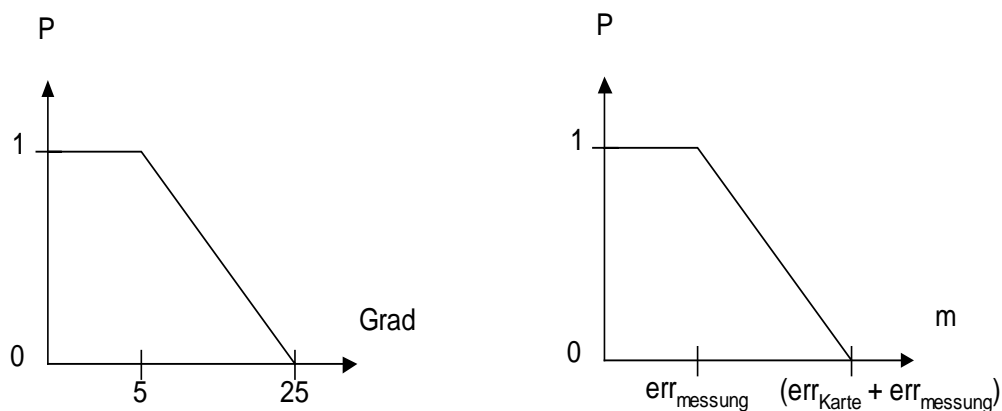


Abbildung 2-15: Zugehörigkeitsfunktionen

Die Qualität wird anschließend Tiefpass-gefiltert. Dabei ist das Filter relativ schnell (ca. 1 sec.), wenn sich die Qualität verschlechtert, bei einer Verbesserung der Qualität hingegen vergleichsweise langsam (ca. 5 sec.). Die Begründung hierfür liegt in der hohen Sicherheitsrelevanz beim Eingriff in die Dynamik eines Fahrzeuges.

2.4.3. Mehrfachzuordnungen

Bei Mehrfachzuordnungen werden sämtliche Alternativen an Kreuzungen verglichen. Bewegt sich das Fahrzeug auf eine Kreuzung zu, beginnt der Algorithmus, in alle Richtungen zu suchen. Weicht das Ergebnis von der aktuellen Hauptroute ab, kann so sehr schnell die neue Richtung identifiziert werden. Die Zuordnungen werden dabei wieder anhand ihrer Richtung und der Lotlänge verglichen und die Zuordnung mit dem geringsten Fehler im Vergleich zum aktuellen Fahrzeugzustand wird als neue geeignete Alternative festgelegt. In Abbildung 2-16 wird das Matching für eine Standardsituation dargestellt.

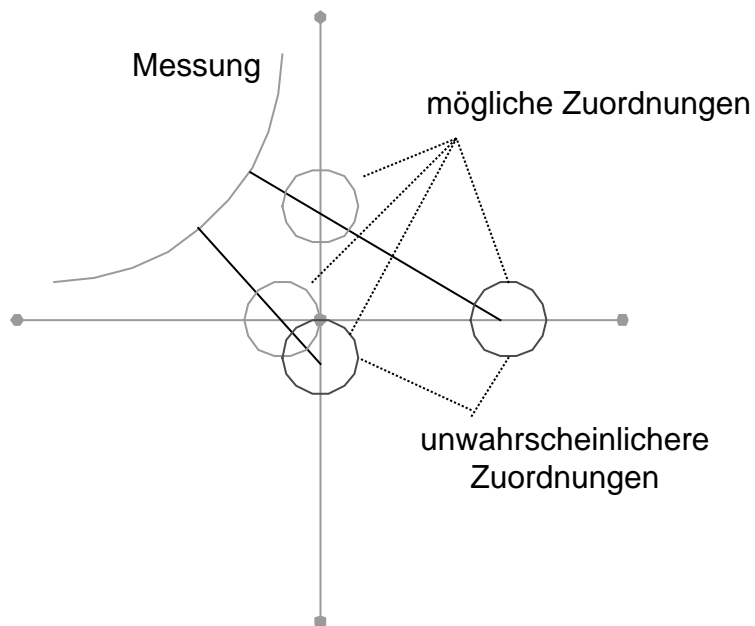


Abbildung 2-16: Mehrfachzuordnungen

Die hellgrauen Kreise zeigen dabei die Matches mit der höchsten Wahrscheinlichkeit, die schwarzen die unwahrscheinlichen. Die durchgezogene halbkreisförmige Linie (Messung) stellt die Historie der Fahrzeugbewegung dar. Zwei exemplarische Matches sind durch die geraden schwarzen Linien dargestellt.

3. DIGITALE KARTEN

Nachdem über die Fahrzeugpositionierung der aktuelle Ort des Fahrzeuges exakt bestimmt werden kann und mittels eines Map-Matching-Verfahrens eine Abbildung auf eine Modellwelt möglich ist, wird nun die Modellwelt näher beschrieben. Sie beinhaltet die gesuchten ortsspezifischen Modelle, die die vorausschauende Konditionierung von Fahrerassistenzsystem erst möglich macht. Als erster Ansatz sollen digitale Landkarten aus Navigationssystemen als Modellwelt zum Einsatz kommen.

3.1. Überblick

Digitale Navigationskarten (kurz DNK) enthalten im wesentlichen die Informationen aus Landkarten in Papierform. Meist wurden sie durch „Abzeichnen“ mit Digitalisierungslupen oder durch einen Scan aus Papierkarten erstellt. Um die Informationen einer digitalen Karte jedoch computergestützt auswerten zu können, müssen die Informationen in logischer Form vorliegen. In einer aus einem Scan erstellten Karte sind Straßenzüge eine Ansammlung von nicht zusammenhängenden Punkten, die nur schwer ausgewertet werden können. In logischer Form werden diese Punkte zusammengefasst und als Vektoren gespeichert. Eine aus einem *Scan* erstellte, aber nicht weiterverarbeitete Karte im Pixelformat kann für diese Aufgabe also nicht verwendet werden. Digitale Karten werden heute zu den verschiedensten Zwecken eingesetzt: Neben der Navigationsaufgabe und dem Suchen bzw. Finden von Orten kommen sie z.B. auch zu industriellen Zwecken (z.B. im Flottenmanagement) zur Anwendung. All diese Aufgaben haben im wesentlichen das Ziel, Fahrzeug, Objekt usw. einem Ort oder einer Straße zuzuordnen. Meist wird dann visuell eine weitere Aktion entschieden. So wird z.B. der Koordinator einer LKW-Flotte einen LKW in der Nähe eines neuen Zieles auswählen.

Die Auswahl an Navigationskarten im Vektorformat mit relativ hoher Genauigkeit beschränkt sich im wesentlichen auf zwei Anbieter: die Firmen Tele Atlas und Navigation Technologies (NavTech). NavTech bietet für Forschungs- und Entwicklungszwecke eine Softwareschnittstelle (Shared Data Access Library, kurz SDAL) zu ihrer Datenbank an. Tele Atlas arbeitet mit entsprechenden Zulieferern zusammen.

3.2. Standardisierung

DNK werden in der Regel im GDF (Geographical Data Format) beschrieben. GDF ist ein allgemeines Kartenformat, in dem sämtliche Attribute exakt durch eine gemeinsame Sprache definiert werden können. Dieses Format dient jedoch mehr zur allgemeinen Beschreibung als zur tatsächlichen Speicherung von Daten. In Anwendungen im Fahrzeug, in denen Zeit und Speicherplatz nicht unbegrenzt vorhanden sind, kommen meist komprimierte nutzer- oder herstellerepezifische Formate zum Einsatz. Diese enthalten auch nur diejenigen Daten, die für die jeweilige Anwendung notwendig sind. Für die herstellerepezifischen Formate werden in der Regel auch entsprechende Softwarebibliotheken für den Zugriff auf die Daten angeboten. Aus Sicht der Hersteller von Anwendungen wäre jedoch ein gemeinsames komprimiertes Format wünschenswert. Die Anwendungen könnten mit der jeweils verfügbaren bzw. gerade aktuelleren Karte gespeist werden. Derzeit werden in EU-Projekten die Anforderungen an DNK erarbeitet (IN-ARTE, NextMAP). Die entsprechenden Daten, die aus

den Anforderungen resultieren, können dann wieder im GDF Format beschrieben und von Kartenherstellern gesammelt werden.

3.3. Genauigkeit, Verfügbarkeit, Beispiel

DNK sind nahezu für ganz Europa und die USA flächendeckend verfügbar. Durch die ständige Erweiterung und Aufnahme neuer Straßen kann man bei DNK von einem hohen Detaillierungsgrad sprechen. In Deutschland sind nahezu alle Straßen im Stadt- und Überlandbereich digitalisiert.

Die Genauigkeit der Karte wird mit einer maximalen Abweichung von 3 m von der aufgezeichneten Mittellinie einer Straße angegeben. Aus dieser Forderung wird auch der Digitalisierungsalgorithmus abgeleitet. Weicht die gedachte Fortführung einer Linie zwischen zwei Punkten der DNK um mehr als 3 m von der Mittellinie ab, wird ein neuer Punkt in die Karte eingetragen. Als Basis für die Digitalisierung werden im wesentlichen Papierlandkarten der Landesvermessungsämter verwendet: im Stadtbereich im Maßstab 1:5000 und im Überlandbereich im Maßstab 1:25000, d.h. im Überlandbereich entspricht 1 mm auf der Landkarte 25 m in der Realität.

Der Digitalisierungsprozeß wird von Menschen manuell mit sogenannten Digitalisierungslupen erledigt. Um die geforderte Genauigkeit von 3 m zu erreichen, muss vom Digitalisierer ungefähr 1/10 mm aufgelöst werden können. Hieraus lässt sich ableiten, dass die geforderte Genauigkeit zumindest im Überlandbereich nicht immer gewährleistet werden kann. Die folgende Abbildung 3-1 zeigt dies.

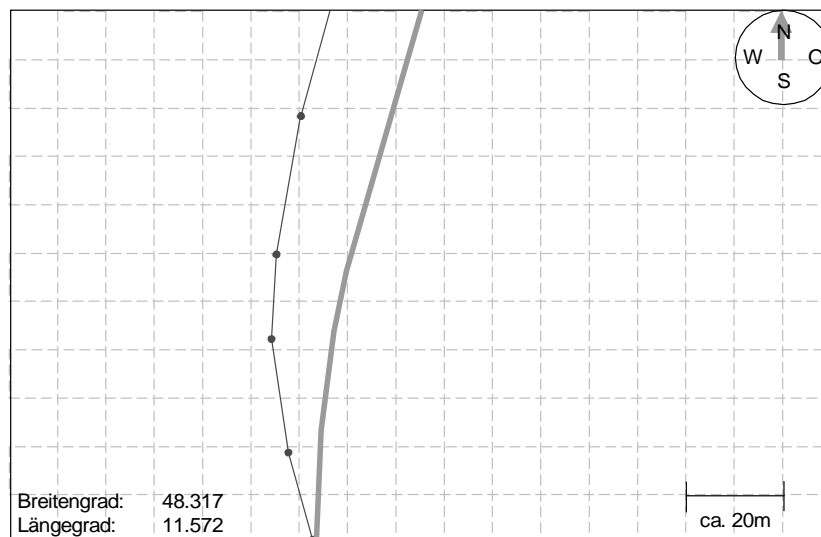


Abbildung 3-1: Genauigkeit digitaler Navigationskarten

In der Abbildung 3-1 entspricht ein Kästchen ca. 10 m. Die dünne Linie mit Zwischenpunkten zeigt die Daten aus der digitalen Karte, die dicke durchgezogene Linie die Messung. Die Messung erfolgte mit DGPS und einer eigens für diesen Zweck aufgestellten Referenzstation. D.h. die Genauigkeit der Messung liegt unterhalb eines Meters. Selbst wenn man der Messung einen Fehler von 5 m unterstellt, zeigt die Karte immer noch Fehler von bis zu 15 m.

Die Winkelgenauigkeit, d.h. die Genauigkeit der Richtung der Straße, lässt sich aus der Punktgenauigkeit ableiten.

Folgende Graphen (siehe Abbildung 3-2) zeigen drei Kurven für die Winkelgenauigkeit in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen den Punkten für einen maximalen Punktfehler (Querabweichung der Punkte) von $d = 1$ m (oberste), $d = 3$ m (mittlere) und $d = 25$ m (unterste). Die Graphen lassen eine gute Abschätzung des maximal möglichen Fehlers bei einer vorliegenden Situation zu.

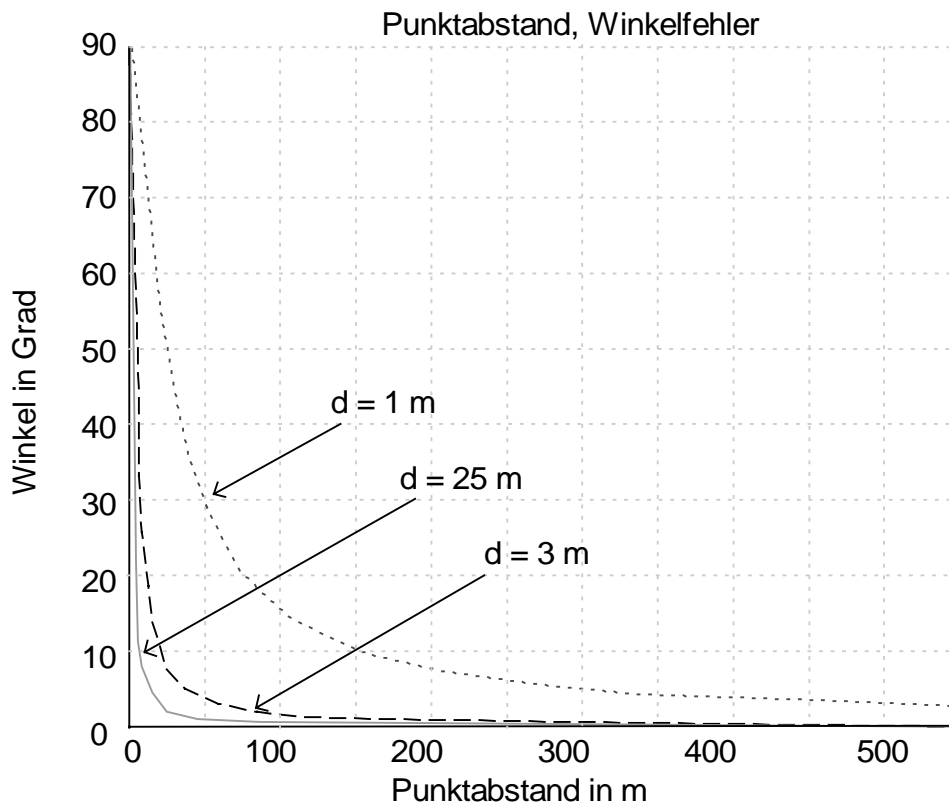


Abbildung 3-2: Winkelgenauigkeit bei unterschiedlichen Punktabständen

Gleichzeitig ist die Winkelgenauigkeit (Gesamtrichtung) über größere Teilstücke (über mehrere Punkte) sehr genau. Der kleinste Fehler über längere Strecken würde sehr große Fehler in der digitalen Karte erzeugen und sie somit unbrauchbar machen. Diese maximalen Fehler treten auch nur im ungünstigsten Fall auf. Oft sind jedoch trotz eines hohen absoluten Positionsfehlers der Punkte in der DNK die Winkel genauer, da Punkte in örtlicher Nähe oft auch ähnliche absolute Fehler aufweisen. D.h. der relative Fehler der Punkte ist meist niedriger. Trotzdem muss dieser mögliche Fehler berücksichtigt werden.

3.4. Beschreibung der digitalen Navigationskarte

3.4.1. Aufbau der digitalen Navigationskarte

Als Kernelement der Karte dient das *Segment* bzw. *Feature*. Ein *Segment* bzw. *Feature* hat Eigenschaften (z.B. die Straßenklasse) und besteht aus mindestens zwei Punkten (Anfangs- und Endpunkte, auch *Nodes*). Ein *Segment* bzw. *Feature* beschreibt also ein beliebig langes Straßenstück. Die Punkte zwischen Anfangs- und Endpunkt werden als geometriebeschreibende Punkte bezeichnet (*Shape Points*). Diese Punkte besitzen als Attribute nur ihre geographische Lage in Längen- und Breitengrad und einen sogenannten *Z-Level*, der die relative Höhenlage zu einer kreuzenden Straße beschreibt (z.B. Brücke). Die folgende Abbildung 3-3 gibt einen Überblick über die Zusammenhänge bzw. Verknüpfungen in der DNK:

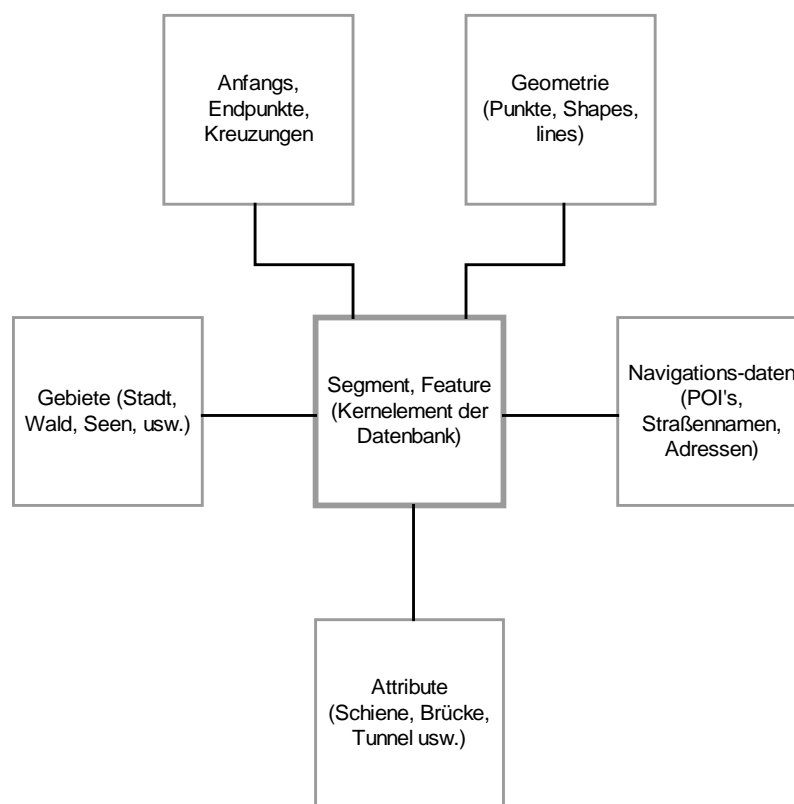


Abbildung 3-3: Aufbau von digitalen Navigationskarten

Die für Fahrerassistenzsysteme interessanten Informationen sind im wesentlichen in den *Segment*- bzw. *Feature*-Eigenschaften abgelegt, der Geometrie und den Anfangs- bzw. Endpunkten. Gebiete, Attribute und Navigationsdaten beinhalten zumeist notwendige Informationen zum Navigieren bzw. Anzeigen der Karte. Im folgenden werden die Inhalte kurz beschrieben:

Navigationsdaten: *POI's (Points Of Interest)* beschreiben für den Reisenden interessante Örtlichkeiten wie Tankstellen oder Sehenswürdigkeiten. *POI's* beinhalten zusätzlich Informationen über Öffnungszeiten. Straßennamen, Postleitzahlen, Adressen usw. werden zur für den Fahrer verständlichen Beschreibung eines Ortes hier in

der Karte verwaltet. Daten von Schildern heutiger Karten beziehen sich nur auf richtungsweisende Hinweisschilder (z.B. „Autobahnkreuz Nord rechts“).

Gebiete beschreiben Polygonzüge, die sich in einem Gebiet um das Segment befinden. Von den Polygonzügen werden Landschaftsmerkmale wie z.B. Stadtgrenzen oder Seen eingeschlossen.

Attribute zeigen Besonderheiten von Straßenstücken bzw. Gebieten an. Z.B. wird eine kreuzende Eisenbahnlinie angezeigt. Tunnel bzw. Brücken werden erst ab einer signifikanten Größe angezeigt. In der Regel sind Tunnel bzw. Brücken nur dann in der Karte enthalten, wenn die Länge 100 m überschreitet. Weitere Attribute sind z.B. Fluss, Park, Wald, Flughafen usw.

Kreuzungen, Anfangs- und Endpunkte (Nodes) geben detaillierte Informationen zu Abbiegevorgängen (z.B. benötigte Zeit zum Überfahren usw.). Hier werden auch Informationen über Zusammenhänge von Straßenstücken (z.B. Autobahnkreuz) verwaltet. Komplizierte Kreuzungssituationen können hier in übergeordneten Strukturen beschrieben werden.

Geometrie-Eigenschaften beschreiben die genaue örtliche Lage und Form eines Straßenstückes. Die Daten sind in einer Punktfolge mit den Eigenschaften Längen- bzw. Breitengrad und Z-Level gespeichert. Der Z-Level beschreibt dabei keine absolute Höheninformation, sondern gibt nur Auskunft über die relative Lage der Straße zu einer kreuzenden (über bzw. unter der kreuzenden).

Segment bzw. Feature beschreibt das Kernelement der DNK. Es identifiziert sich durch eine eindeutige Nummerierung (ID) in der DNK. Alle weiteren Informationen beziehen sich auf diese ID. Es enthält auch zusätzliche Eigenschaften wie Straßentyp, Reisezeiten, Straßeneigenschaften usw.

3.4.2. Wichtige Eigenschaften von Straßenstücken

Das Straßenstück (*Segment* bzw. *Feature*) selbst beinhaltet Informationen zum Straßentyp, der Fahrtrichtung und den Anfangs- und Endpunkten. Über die Attribute Level, Spuranzahl und Straßentyp kann eine Klassifizierung von Straßen erfolgen.

Das Attribut Level beschreibt die höchste Schicht der Karte, in der dieses Segment vorkommt. Es stellt somit eine Relevanzpriorisierung für die Routenplanung dar. Ein Segment mit Level 1 kann z.B. nur eine Fernverkehrsstraße bzw. eine Hauptverbindungsstraße durch einen Ort sein.

Das Attribut Spuranzahl beschreibt die Anzahl der Spuren in drei Klassifizierungen: eine Spur, zwei oder drei Spuren, vier oder mehr Spuren jeweils für jede Richtung.

Das Attribut Straßentyp beschreibt den Typ der Straße in 8 Klassen. Daraus lassen sich Durchschnittsreisegeschwindigkeit für das Straßenstück ableiten. Folgende Kategorien werden den Straßenklassen 8 - 1 zugeordnet: 0 – 30 km/h, 30 – 50 km/h, 50 – 70 km/h, 70 – 90 km/h, 90 – 110 km/h, 110 – 130 km/h, 130 – 300 km/h

Das Attribut Kosten beschreibt die Zeit in Sekunden, die ein durchschnittlicher Fahrer bei durchschnittlichem Verkehr voraussichtlich benötigt, um das Segment zu überfahren. Die Kosten stehen in direktem Zusammenhang mit der Durchschnittsgeschwindigkeit und bieten somit keine unabhängige Information der Karte. Kreuzungskosten beschreiben hingegen die Zeit, die benötigt wird, eine Kreuzung in eine bestimmte Richtung zu überqueren. Sie geben somit Auskunft über die schnellste

Überquerungsmöglichkeit (bzw. der Hauptstraße, Hauptweg) und können später gut verwendet werden, um eine wahrscheinlichste Hauptrichtung an einer Kreuzung zu finden.

Diese ersten drei Attribute in Zusammenhang lassen relativ wahrscheinliche Aussagen über die Maximalgeschwindigkeiten zu. Über die Maximalgeschwindigkeiten lassen sich allgemeine Aussagen über den Straßentyp verfeinern und somit z.B. eine dem Straßentyp angepasste Kurvengeschwindigkeit entwerfen.

Ein Straßenstück mit einer relativ hohen Durchschnittsgeschwindigkeit hat voraussichtlich auch einen hohen Level. Fällt der Level jedoch niedriger aus als erwartet, muss die Maximalgeschwindigkeit reduziert werden. Folgende Tabelle 3-1 soll über die erwartete Zuordnung Aufschluss geben. Tritt die Erwartung nicht ein, wird die angenommene Durchschnittsgeschwindigkeit um maximal eine Klasse erhöht bzw. gesenkt.

Tabelle 3-1: Straßenklassen

Geschwindigkeit (km/h)	Gesetzliche Geschwindigkeit (km/h)	Karten Geschwindigkeit (km/h)	Straßentyp	Level	Spuren
160	-	130-300	1	4	2
140	-	110-130	2	3	1
110	100	90-110	3	3	1
100	100	70-90	4	2	1
80	100	50-70	5	1	1
55	50	30-50	6	1	1
35	30	5-30	7	1	1
20	3	0-5	8	1	1

Die Tabelle beruht auf Erfahrungswerten, die bei diversen Testfahrten gesammelt wurden. Sie hat keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit, gibt jedoch einen guten ersten Überblick.

3.4.3. Zugriff auf die digitalen Navigationskarten

Die Softwarebibliothek SDAL (Shared Data Access Library) ermöglicht Zugriffe auf ein komprimiertes Format der NavTech Datenbank mit allen Attributen. Ebenfalls bietet Tele Atlas Lösungen zum Zugriff auf die eigene Karte über einen Drittanbieter (TelContar) an. In dieser Arbeit wurde die entsprechende Softwarebibliotheken zum Lesen in der DNK des jeweiligen Herstellers verwendet. Die Verwendung von handelsüblichen Navigationssystemen als Grundlage war nicht möglich. Navigationssysteme arbeiten – je nach Ausführung – oft nur mit einem Teil der digitalen Karte und können dem Nutzer so nicht das volle Spektrum der Datenbank zur Verfügung stellen, das für Fahrerassistenzsysteme notwendig wird. Heutige Navigationssysteme

bieten in der Regel auch (z.B. BMW's Carin) keine Schnittstelle zum Auslesen von Streckendaten an. Zudem soll das hier entwickelte System auch unabhängig von der Routenplanung funktionieren. Eine Kombination dieses und des ohnehin vorhandenen Navigationssystems im Auto muß aber letztendlich auf jeden Fall wieder angestrebt werden. Die geplante Route wäre auch eine interessante zusätzlich Information über den wahrscheinlichen Abbiegevorgang an der vorausliegenden Kreuzung.

3.5. Anforderungen an Karten

In der vorliegenden Arbeit sind Anforderungen an zukünftige digitale Navigationskarten entstanden. Dabei wurden diese Anforderungen über den gesamten Zyklus der Arbeit angepasst und sind somit als Endergebnis zu verstehen. Neue Daten in die DNK aufzunehmen ist für die Datenbankhersteller ein sehr teurer und aufwendiger Prozess. Die Hersteller versuchen natürlich, die DNK nach Möglichkeit einheitlich für alle Länder zu gestalten. D.h. das Datenformat, das als Platzhalter für neue Attribute angepasst werden muss, kann nicht ständig verändert werden. Da aus Kostengründen nicht alle Anforderungen, insbesondere die für die Querregelung, heute in die DNK aufgenommen werden können, wurden diese in Generationen aufgeteilt. Die erste Generation beschreibt Inhalte und Anwendungen für heutige digitale Karten als Bestandsaufnahme. In der zweiten Generation sollen im wesentlichen die Anforderungen für Systeme zur Längsregelung und daraus abgeleitete Anwendungen beschrieben werden. Die dritte Generation beschreibt schließlich die Anforderungen von Querregelungssystemen auf Basis digitaler Karten. Abschließend werden die Ergebnisse mit Genauigkeitsangaben in Tabelle 3-5 zusammengefasst.

Heutige DNK werden in dieser Arbeit als Karten der 1. Generation bezeichnet. Die Inhalte sind in Tabelle 3-2 zusammengefasst.

Tabelle 3-2: Inhalte der 1. Kartengeneration

Daten	1.Generation (heutige Navigationskarten)
Geometrie	Punktgenauigkeit +/- 15m
Attribute	Nur bei sehr großen Tunnels, Brücken (>200m)
Straßen-eigenschaften	8 Straßentypen
Verkehrsregelungen	Nur Richtungsschilder
Sonstiges	Keine Information

3.5.1. Karten der 2.Generation (Längsregelungssysteme)

Bei Karten für Längsregelungssysteme sollte vor allem die Längsgenauigkeit der DNK eine hohe Qualität aufweisen. Längsgenauigkeit bedeutet in diesem Zusammenhang die Punktgenauigkeit bzw. der Fehler in Richtung der digitalisierten Straße. Ein Querversatz (Punktgenauigkeit bzw. Fehler senkrecht zur digitalisierten Straße) würde sich im wesentlichen nur auf die Qualitätsbewertung des Matches auswirken. Die errechneten Brems- und Beschleunigungswege wären aber immer noch korrekt. Lediglich bei der Rekonstruktion von Radien aus einzelnen Punkten fällt vor allem

der Querfehler ins Gewicht. Eine neue Generation von Karten muss neben der verbesserten Geometrieinformation auch mehr Informationen über verkehrsrelevante Umgebungen geben (siehe Tabelle 3-3). Hier sind vor allem die Verkehrsschilder eine sehr wichtige und informative Quelle.

Tabelle 3-3: Inhalte der 2. Kartengeneration

Daten	2.Generation
Geometrie	Punktgenauigkeit +/- 1m, Höhe, Steigung, Radius
Attribute	Exakte Umgebungsinformation zu Ereignissen wie Waldstraße, Brücke, Tunnel, Haltesichtweiten
Straßen-eigenschaften	Straßentypen nach Bauvorschriften kategorisiert, Anzahl der Spuren, Breite der Spuren, Seitenstreifen, Unterscheidung nach Orts- bzw. Überlandstraße
Verkehrsregelungen	sämtliche Vorschrift- und Gefahr-Verkehrsschilder
Sonstiges	Qualitätsinformation Online-Updatefähigkeit der Datenbank

Hauptziel ist die erhöhte Auflösung der Geometrie. Mit der Steigerung der Punktgenauigkeit kann das Fahrzeug eindeutig der Straße zugeordnet werden und somit Fehlpositionierungen schnell erkannt werden. Die Erweiterung der Attribute für die einzelnen Punkte zeigt nicht nur eine zusätzliche Genauigkeitssteigerung in der Geometrie, sondern erweitert die Karte auch für zusätzliche Anwendungen. Gerade die dritte Dimension (Steigung) eröffnet ein weites zusätzliches Spektrum an Anwendungen (Verbrauchsoptimierung, Schaltvorgänge, Sichtweitenberechnung etc.). Alle weiteren Attribute dienen ebenfalls einer Erweiterung der Anwendungen:

Über Verkehrsschilder können z.B. geschwindigkeitslimitierende Attribute gewonnen werden. Umgebungsinformationen bieten zusätzliche wertvolle Informationen über die Skalierung der Systeme: Bei niedrigen Temperaturen und Regen würde eine Kurve auf einer Brücke z.B. deutlich langsamer gefahren werden als bei günstigeren Konditionen. Das Attribut Tunnel gibt z.B. auch Informationen über Sichtweite usw.

3.5.2. Karten der 3. Generation (Querregelungssysteme)

Karten für Querregelungssysteme benötigen eine sehr hohe Genauigkeit. Neben der hohen geometrischen Genauigkeit müssen verkehrsrelevante Umgebungseigenschaften ebenfalls exakt beschrieben sein. Aufgrund der hohen erwarteten Datenmenge an Einzelpunkten sollte die Geometrie als Funktion beschrieben werden. Lenkeingriffe sind weiter äußerst sicherheitsrelevant. Eine Abweichung von der Solltrajektorie muss sehr früh erkannt werden, um eine weiche Regelung gewährleisten zu können. Totzeiten aufgrund von Hysteresen, die eine schlechtere Genauigkeit ausgleichen sollen, sind hier nicht tolerierbar. Bei Lenkeingriffen sollten auch die Umgebungsparameter sehr gut bekannt sein: Ein größeres Hindernis am Straßenrand z.B. würde einen durchschnittlichen Fahrer dazu veranlassen, eher links zu fah-

ren. Die Regelung sollte hier nicht mit einer Maximalkraft dagegenhalten und den Fahrer so in eine potentielle Gefahrensituation bringen, anstatt ihn zu unterstützen.

Die exakte Position von weiteren Umgebungsparametern kann zur vorausschauenden Konditionierung der Bildverarbeitung dienen und somit auch zum Erkennen von Änderungen eingesetzt werden. Tabelle 3-5 fasst die Anforderungen dieser Generation zusammen.

Tabelle 3-4: Inhalte der 3. Kartengeneration

Daten	3.Generation
Geometrie	Punktgenauigkeit +/- 0.01 m, Höhe, Steigung, Radius Speicherung der Geometrieinformation als Funktion Pro Fahrstreifenmarkierung eine Funktion
Attribute	Exakte Umgebungsinformation zu Ereignissen wie Waldstraße, Brücke, Tunnel, Haltesichtweiten Licht- bzw. Beleuchtungsverhältnisse Typische Temperatureigenschaften in diesen Gebieten
Straßeneigenschaften	Straßentypen nach Bauvorschriften kategorisiert, Anzahl der Spuren, Breite der Spuren, Seitenstreifen, Unterscheidung nach Orts- bzw. Überlandstraße, Reibwertinformationen Bürgersteige, Fahrradwege Besonderheiten wie Ausfahrtsuren usw. müssen gesondert markiert werden
Verkehrsregelungen	sämtliche Verkehrsschilder mit exakter Lage bzw. Aufstellort, Beleuchtung
Sonstiges	Qualitätsinformation, Altersinformation Online-Updatefähigkeit der Datenbank

Bei einer hohen Genauigkeit steigt die Datenmenge sehr schnell. Eine Möglichkeit zur Speicherung könnten Splineparameter sein, aus denen auch sehr schnell Geometrieigenschaften wie z.B. der Radius gewonnen werden können.

Kreuzungssituationen und Ausfahrtsuren müssten ebenfalls cm-genau berücksichtigt werden. Hier ist eine Digitalisierung, die nur die Mittellinie beschreibt, nicht mehr zielführend. Vielmehr wird eine spurweise Digitalisierung nötig.

3.5.3. Genauigkeit der Attribute

Tabelle 3-5 zeigt die Generationen der Karten im Überblick und beschreibt diese mit den geforderten Genauigkeiten. Die Genauigkeiten beziehen sich dabei jeweils auf die Information selbst. Bei einem Verkehrsschild beschreibt die Genauigkeit den Standort des Schildes während bei einer Breitenangabe der Wert selbst gemeint ist.

Tabelle 3-5: Genauigkeiten der Kartengenerationen im Vergleich

Daten	1.Generation	2.Generation	3.Generation
Geometrie	X	X	X
Längen und Breitengrad (Position in m)	+/- 15m	+/- 3m	+/- 0.01m
Höhe (Genauigkeit in m)	-	+/- 10m	+/- 1m
Steigung (Genauigkeit in %)	-	3 %	1%
Radius (Genauigkeit in %)	-	10%	1%
Seitenneigung	-	X	X
Kurvenbeschreibung (Winkel, Radius)	-	X	X
Geometriefunktionen	-	-	X
Digitalisierung der Fahrstreifen	-	-	X
Attribute	X	X	X
Brücken, Tunnels (wenn größer als)	> 200m	> 10m	> 1m
Waldgebiete (wenn größer als)	+/- 100m	> 100m	>10m
Haltesichtweite (Genauigkeit in m)	-	+/- 20m	+/- 5m
Gefahrenstelle (Position in m)	-	+/- 20m	+/- 5m
Bahnübergang (Position in m)	X	+/- 20m	+/- 1m
Geschwindigkeitsbremsen (Position in m)	-	+/- 10m	+/- 1m
Straßeneigenschaften	-	X	X
Spuranzahl	3 Klassen	exakt	exakt
Spurbreiten (Genauigkeit in m)	-	+/- 0.25m	+/- 0.01m
Seitenstreifenbreite (Genauigkeit in m)	-	+/- 0.25m	+/- 0.01m
Straßentyp in Klassen	8	RAS-L	RAS-L
Beleuchtung (wenn größer als)	-	> 100m	> 10m
Reibwertinformation	-	-	X
Trennung der Verkehrsrichtungen	X	X	X
Ausfahrtspuren (wenn größer als)	-	> 10m	> 1m
Zusatzspuren (z.B.Radwege)	-	-	X
Verkehrsregelungen (Schilder usw.)	-	X	X
Gefahrenschilder (Position in m)	-	+/- 10m	+/- 1m
Richtzeichen (Position in m)	-	-	+/- 1m
Vorschriftzeichen (Position in m)	-	+/- 10m	+/- 1m
Elektronische Schilder (Position in m)	-	-	+/- 1m
Ampeln (Position in m)	-	+/- 10m	+/- 1m
Richtungsschilder (Position in m)	X	+/- 20m	+/- 1m
Sonstige Regelungen (Parken usw.)	-	-	+/- 1m
Sonstiges	-	X	X
Qualitätsinformation	-	X	X
Altersinformation	-	-	X
Online-Schreibfähigkeit	-	X	X

3.6. Relational DataBase Management System

Digitale Navigationskarten werden in der Regel in einem komprimierten Binärformat geliefert. Es gibt derzeit keine Schreib- bzw. Änderungsmöglichkeit für den Nutzer. Um weitere Attribute in die Karten zu schreiben bzw. vorhandenen Attribute zu ändern, wird eine zusätzliche Datenbank notwendig. Die RDBMS (Relational Database Management System) beschreibt eine angehängte Datenbank, die diese zusätzlichen Eigenschaften leistet. Sie wird an geeigneter Stelle an die digitale Navigationskarte angekoppelt. Mit Hilfe der eindeutigen ID von *Segmenten* bzw. *Features* - dem Herzstück der DNK – kann eine eindeutige Relation zwischen der DNK und dieser zusätzlichen Datenbank geschaffen werden (siehe auch Abbildung 3-4).

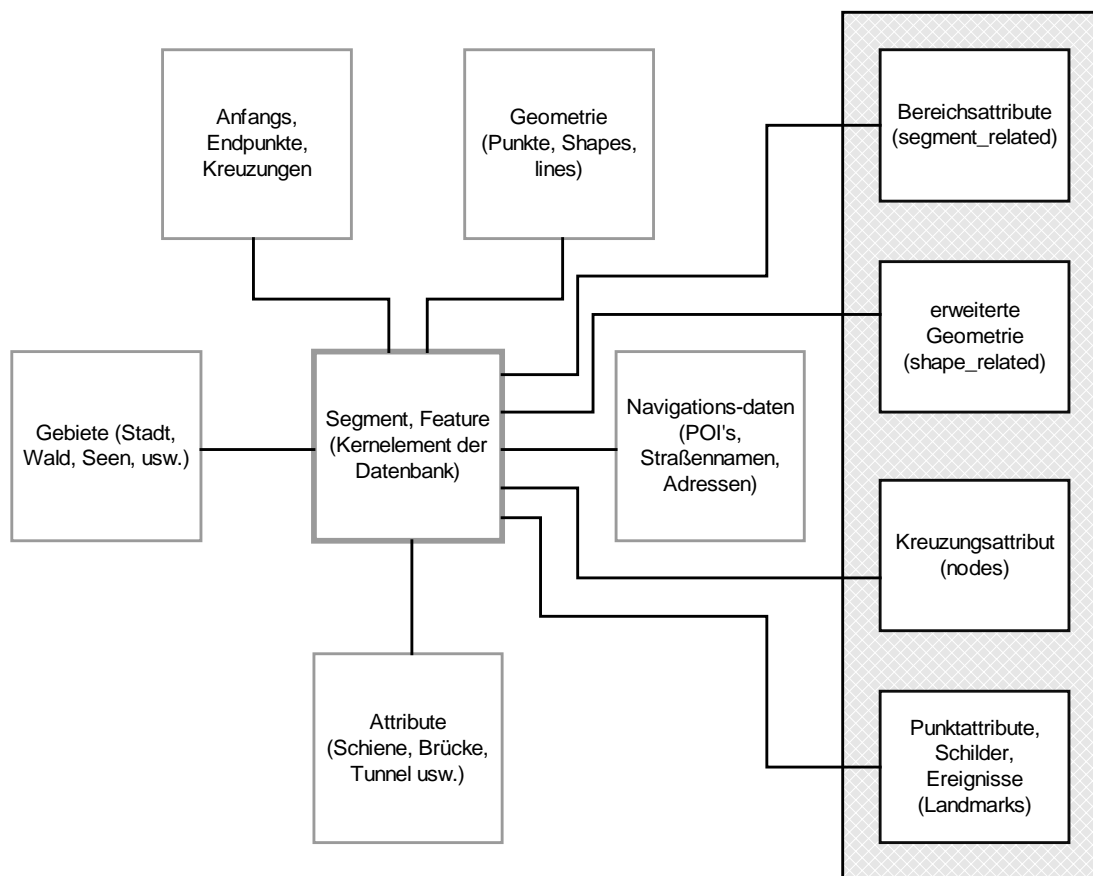


Abbildung 3-4: Anknüpfung der zusätzlichen Datenbank

Die zusätzliche Datenbank ersetzt teilweise die Inhalte der DNK und erweitert diese um die geforderten Attribute. Neben einer Genauigkeitssteigerung können verschiedene Attribute bzw. Eigenschaften nicht nur an Segmenten verankert werden, sondern jetzt auch an beliebigen Punkten auf der Straße. Die angehängte Datenbank ist schreib- und änderungsfähig.

Der globale Rahmen der Datenbank bleibt gleich. D.h. der Zusammenhang, welches Straßenstück das folgende ist oder welche Straßenstücke an einer Kreuzung angrenzen, wird nach wie vor in der DNK beschrieben. Durch diese Vereinfachung spart man zum einen einige aufwendige Verknüpfungstabellen für Segmente und

gewährleistet zum anderen einen nahezu nahtlosen Übergang zwischen den erweiterten Daten und der DNK.

Ein automatisches Erlernen (siehe auch Kapitel 4) z.B. von Daten beim Überfahren einer Strecke ist wesentlich einfacher, wenn man bereits den globalen Zusammenhang der Daten kennt und dann nur noch *Segment-* bzw. *Feature-*Daten ersetzt bzw. verändert. Dies ist ein erheblicher Vorteil, da sonst ein komplettes Datenbankmanagement im Auto erfolgen müßte. Andererseits können neue, noch nicht digitalisierte Strecken nicht ohne weiteres in die Datenbank aufgenommen werden. Ebenfalls werden Kreuzungssituationen immer nur so gut beschrieben, wie sie ursprünglich in der DNK erfasst waren. So kann man z.B. aus einer normalen Kreuzung keinen Kreisverkehr erlernen, sondern die Straße bekommt allenfalls eine „Beule“ an der Stelle des Kreisverkehrs. Befährt man dann aber die Strecke von der komplementären Richtung kommend, wird sich die Straße beim Erlernen wieder in die andere Richtung „ausbeulen“.

In dieser Arbeit wurde der Ansatz gewählt, die Daten lediglich zu ersetzen und das Datenbankmanagement der DNK zu überlassen. Die Nachteile für die Längsregelung sind relativ gering. Ob eine Straße nach links oder nach rechts „ausgebeult“ ist, macht für den Radius und damit für die Geschwindigkeit keinen Unterschied. Lediglich beim Überfahren würde ein Fehler erkannt und die Funktion des Systems für diese Zeit aussetzen. Ohnehin ist das Be- oder Überfahren von Kreuzungen weitaus komplexer und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. So sollte zur Diskussion gestellt werden, ob der Fahrer beim Überfahren einer Kreuzung schon allein aus sicherheitsrelevanten Aspekten die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen muss. Ebenfalls kann man die Richtung, die der Fahrer an einer Kreuzung einschlagen wird, nicht mit Sicherheit voraussagen. Hierauf wird an späterer Stelle im Kapitel 5. Anwendungen noch konkreter eingegangen.

Somit verbleibt der Nachteil, dass noch nicht digitalisierte Strecken nicht erlernt werden können (siehe auch Kapitel 4). Da jedoch die Flächendeckung heutiger DNK's bereits einen sehr hohen Detaillierungsgrad erreicht hat und davon auszugehen ist, dass in Kürze sämtliche Straßen digitalisiert sein werden, würde sich der Aufwand für ein komplett eigenes Datenbankmanagement hier nicht rechtfertigen. Für Querregelungssysteme reicht diese Beschreibung dann jedoch nicht mehr aus. Allerdings werden hier auch weitere Forderungen von der Struktur der DNK nicht mehr erfüllt, so dass z.B. die Segmentgrenzen in der DNK verschoben werden müssten. Für erste Testzwecke arbeitet diese Anwendung dann auf einem Rundkurs. Das Datenbankmanagement wird somit umgangen, da es nur eine Straße gibt (siehe auch Kapitel 5. Anwendungen).

3.6.1. Aufbau der RDBMS

Ähnlich wie in den DNK's wird in der RDBMS (Relational Database Management System) jeweils auf die eindeutige ID des Kernelementes der DNK referenziert (siehe auch Abbildung 3-5). Durch entsprechende Filteroperationen werden die jeweils notwendigen Daten aus der RDBMS herausgesucht und den Anwendungen zur Verfügung gestellt.

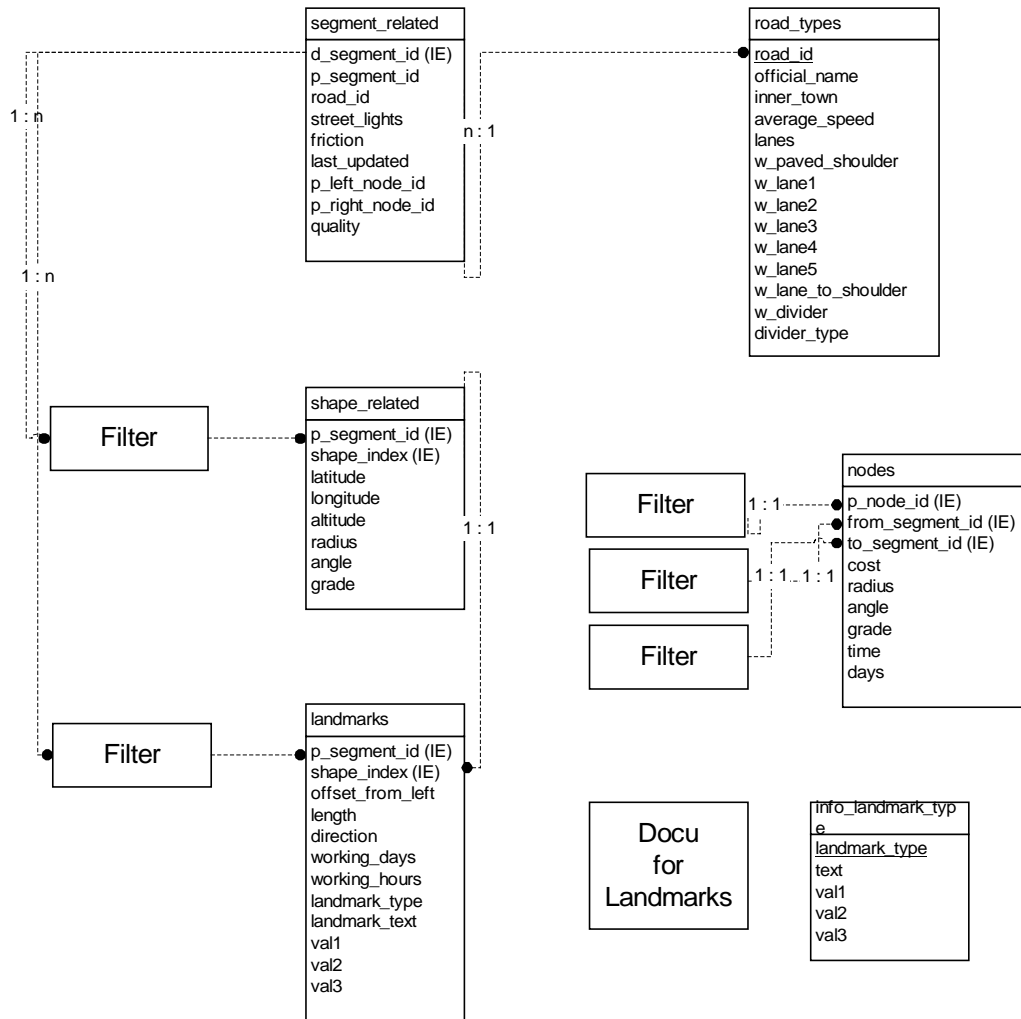


Abbildung 3-5: Zusätzliche Datenbank

3.6.2. Beschreibung der Daten und Relationen

Straßenstückbezogene Daten (*segment_related*)

p_segment_id beschreibt eine eindeutige Referenz zu den Daten der digitalen Navigationskarte. Über diesen Wert wird die Verknüpfung zwischen den Datenbanken gebildet.

Die *road_id* verweist auf den entsprechenden *road_type* der Straßentypen. Dabei wird davon ausgegangen, dass bereits in der digitalen Navigationskarte ein neues Segment beim Wechsel des Straßentyps beginnt. Nach bisherigen Erfahrungen ist dies weitgehend gewährleistet.

street_lights ist ein Attribut zur Beschreibung, ob die Straße beleuchtet ist.

friction ist derzeit als Platzhalter für später einzufügende Daten für die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche vorgesehen.

last_updated ist das Datum der letzten Änderung / Validierung der Segment-Daten und soll gemeinsam mit der Qualität Aussagen über die Verlässlichkeit der gespeicherten Daten geben.

p_left_node_id und *p_right_node_id* beschreiben die jeweiligen Anschlusspunkte am linken bzw. rechten Ende des Segmentes.

quality beschreibt die Qualität der Daten, die zu diesem Segment gehören. So kann z.B. nicht die eine Hälfte der zugehörigen *Shape Points* eine hohe Qualität besitzen, während die andere Hälfte eine niedrige Qualität aufweist.

Straßentypen (*road types*)

Die *road_types* sind im wesentlichen an die Straßenbauvorschrift RAS-L angepaßt. Dabei sind Straßen nach Bauvorschriften möglich, aber auch frei definierbare im Rahmen der gegebenen Attribute. Die Beschreibung beinhaltet die Anzahl der Spuren, die Breite der einzelnen Spuren, die Breite des Randstreifens, Aussagen über Leitplanken bzw. Mittelstreifen, Orts- oder Überlandstraße sowie eine Entwurfsgeschwindigkeit.

Punktbezogene Daten (*shape related*)

Die Segment-Id sorgt für die Zuordnung der Shape-Daten zu den Segmenten. Der *shape_index* beschreibt die Reihenfolge. Neben dem Längen- und Breitengrad wird zusätzlich die Höhe des Punktes über dem Meeresspiegel, der Radius an diesem Punkt, die Steigung an diesem Punkt und der Knickwinkel an diesem Punkt beschrieben.

Umgebungsereignisse (*landmarks*)

Unter Umgebungsereignisse werden alle Gegenstände, Schilder, statische Ereignisse etc. rund um die Straße zusammengefasst. Tabelle 3-8 gibt Auskunft über derzeit erfasste Umgebungsereignisse und die zugehörigen Parameter.

Verkehrsschilder werden z.B. mit einer ID versehen und die entsprechenden Parameter in den „val-Werten“ (siehe auch Tabelle 3-8) gespeichert. Ein Auswertungskonstrukt kann dann in der Software die entsprechenden Parameter wieder filtern und den logischen Werten zuordnen. Neben Schildern werden z.B. schlechte Haltesichtweiten, Wälder, Brücken / Tunnels, Kuppen und Ampeln bzw. elektrische Verkehrsregelanlagen erfasst.

Start- und Endpunkte (*Nodes*)

In der *Nodes* Tabelle werden die Kosten / Bewertungen für Abbiegevorgänge beschrieben. In dem Feld *cost* wird dabei eine Wahrscheinlichkeit für den entsprechenden Abbiegevorgang angegeben. Zusätzlich werden hier speziell für diese eine Richtung und diesen Abbiegevorgang Daten wie Radius, Winkel und Steigung eingetragen. Über die Felder *time* und *days* lässt sich die Bewertung noch zusätzlich wochentag- und zeitabhängig steuern. Hier können dann Daten aus früheren Fahrten verzeichnet werden und somit beim nächsten Befahren der Abbiegevorgang schon vorher gesehen werden.

Tabelle 3-6: Beschreibung der Attribute

Index-	Text	Freier Wert 1	Freier Wert 2	Freier Wert 3
10	Wald			
20	Bahnübergang			
30	Geschwindigkeits-bumper	Kategorie (fast, slow,...)		
40	Kuppe	approx.		
50	Brücke			
60	Haltesichtweite			
70	Kurve	Flags (CR, CL)	Radius [m]	Winkel [rad]
80	Tunnel			
90	Straßenbeleuchtung			
100	Gefahrschilder		grade [%]	
200	Vorschriftzeichen	Geschwindigkeit [km/h]	Breite, Höhe [m], Gewicht [t]	
300	Richtzeichen	speed [km/h]		
600	Sonderschilder			
700	Zusatzschilder			
1000	Ampeln	3-Phasen / Blinkend		
1010	Elektronische Schilder			
2000	Straßentypen			
3000	Sonstiges			

Filteroperationen / Abarbeitung der Anforderungen

Die globale Suche erfolgt erst in der DNK. Wurde ein geeignetes Segment gefunden, werden (falls vorhanden) die Daten aus der DNK mit Daten aus der RDBMS ersetzt bzw. erweitert. Dies gelingt, indem in der RDBMS eine Filteroperation über die eindeutige ID des Kernelementes erfolgt. Ist die Operation erfolgreich, liegen Daten in der RDBMS vor.

3.6.3. Versuchsgebiet

Für das Versuchsgebiet wurde eine Mischung verschiedener Straßen (hell markierte Strecken in Abbildung 3-6) ausgewählt. So sind Autobahn, verschiedene Landstraßen mit Ortsdurchfahrten und Stadtgebiet im Versuchsgebiet enthalten. Die Länge des Versuchsgebietes beträgt ca. 300 km Straße. Bei der Auswahl wurden die Kriterien von verschiedenen Systemen zusammengetragen, um ein möglichst großes Anwendungsspektrum abzudecken.

Das Versuchsgebiet wird einmal manuell mit den gegebenen Anforderungen digitalisiert und einmal durch die im nächsten Kapitel (Kapitel 4. Lernen) beschriebenen Lernalgorithmen verbessert. Ein anschließender Vergleich soll die Wirksamkeit der Algorithmen zum automatischen Erlernen der Geometriedaten zeigen.



Abbildung 3-6: Versuchsgebiet

3.6.4. API, Schnittstelle zur Applikation

Die Applikation für die Datenbank (siehe auch Abbildung 3-7) beinhaltet keinerlei Assistenzfunktion, sondern dient lediglich der Erzeugung eines virtuellen „Fahr-schlauches“ (FS), der sämtliche Informationen zur vorausliegenden Straße in sortierter Form beinhaltet. Die Verwaltung obliegt der Applikation. Anwendungen greifen nur lesend auf den FS zu und führen mit den Daten sämtliche Berechnungen für die spezielle Anwendung durch. Die Applikation führt eine Positionierung auf den Daten der digitalen Karte aus. Wird ein Punkt überfahren, erfolgt eine Aktualisierung des FS, der als Ringpuffer organisiert ist. Die Anwendung kennt dabei nur die Länge des Ringpuffers und die Position des ersten Punktes (also des zuletzt überfahrenen) im Ringpuffer.

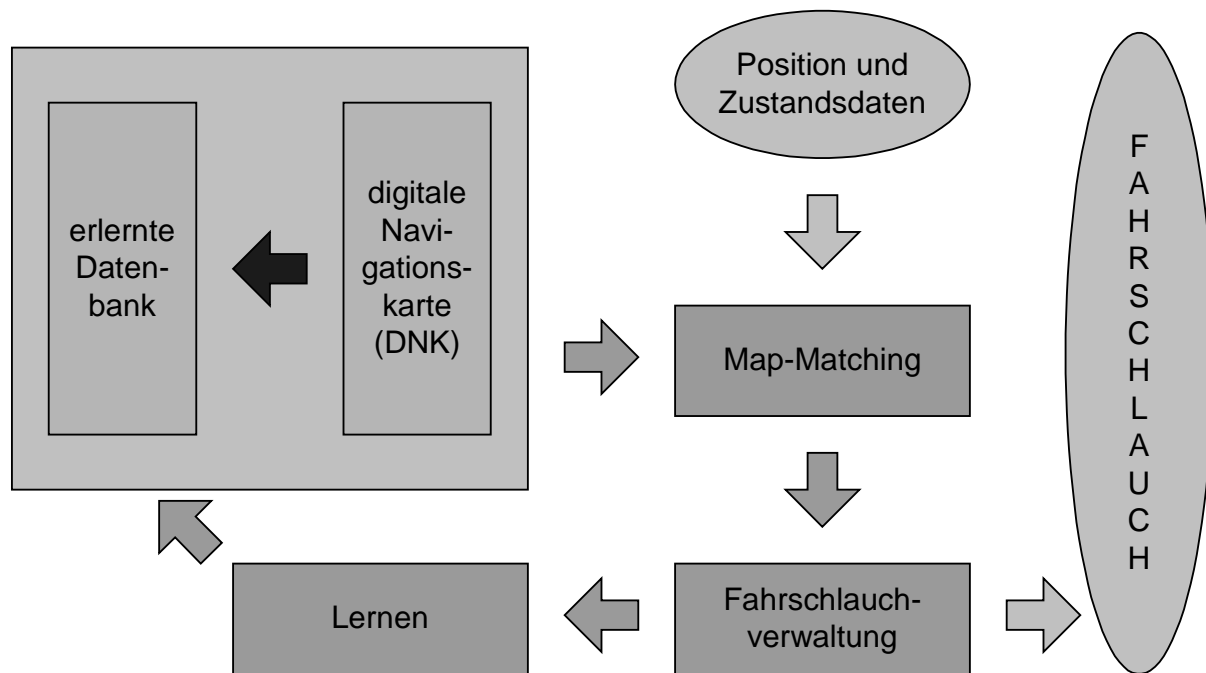


Abbildung 3-7: Datenbank-API

Gleichzeitig werden im FS mögliche Verzweigungen, also Kreuzungen bzw. Abzweigungen, markiert und verwaltet und jeweils der erste abzweigende Punkt mit abgelegt. Er enthält sämtliche aus der digitalen Karte verfügbare Informationen abgebildet auf eine Punktbasis, d.h. die Aufteilung in Segmente und Punkte wird im FS aufgehoben und die Datenstruktur „flach“ abgebildet. So muß der Nutzer immer nur auf eine Stelle im Ringpuffer zugreifen, um sämtliche für den Punkt relevante Informationen zu erhalten.

Die Vorausschau (virtuelle Länge des FS in die Zukunft) ist mit einer festen Punktlänge definiert. Somit ist die Länge in Metern variabel, aber auch selbstregulierend. Befinden sich viele Punkte auf einer kurzen Strecke im FS, liegt eine sehr kurvige Straße vor dem Fahrzeug. Das Fahrzeug kann die Strecke auch nur langsam durchfahren und benötigt somit keine unnötige lange Vorausschau. Ist die Vorausschau hingegen sehr lang (in Metern), ist die vorausliegende Straße auch wenig gekrümmt, und das Fahrzeug kann die Strecke schnell durchfahren. Somit ist mit einer festen Punktlänge die Länge der Vorausschau (in Metern) selbstregulierend. Dieses Verfahren leitet sich direkt aus dem Digitalisierungsalgorithmus ab. Demnach werden bei sehr starken Krümmungen mehr Punkte gesetzt als bei weniger gekrümmten, leichten Kurven.

Neben der Vorausschau in die Zukunft wird ebenfalls die Vergangenheit verwaltet, d.h. ein Fahrschlauch für bereits überfahrene Punkte geführt. Hier können speziell Lernalgorithmen beliebig in der Vergangenheit Daten vergleichen und neue Punkte für die Datenbank erzeugen bzw. bestehende korrigieren. Auf die Algorithmik zum Erzeugen bzw. Korrigieren von Daten wird im nächsten Kapitel 4. Lernen genauer eingegangen.

Der zeitliche Ablauf stellt sich dabei wie folgt dar: Eine initiale Suche findet sämtliche in der Nähe liegende Segmente der digitalen Navigationskarte. Die Segmentpunkte (*Shapes*) werden jeweils anhand ihrer Entfernung und ihrer Richtungen mit der gerichteten Messung verglichen. Nach gefundener Übereinstimmung lädt die Api das

entsprechende Segment in den Fahrschlauch. Ab hier startet die Zuordnung von Messungen zur digitalisierten Linie (Map-Matching). Es werden nur noch kleine Bereiche rund um den letzten „Match“ gesucht und verglichen. Entscheidet der Map-Matching-Prozess, dass ein Punkt überfahren wurde, wird die Fahrschlauchverwaltung aktiv. Der überfahrene Punkt wird aus dem FS entfernt und ein neuer Punkt gelesen. Unter Umständen muss ein neues Segment bzw. neue Punkte nachgeladen werden. In aller Regel muss beim Nachladen von Segmenten eine Richtungsentscheidung weit vor dem Fahrzeug gefällt werden (z.B. Kreuzung). In der Vorschau wird die wahrscheinlichste Richtung (Hauptstraße) als Default gewählt. Liegen Daten aus früheren Fahrten vor, kann die Entscheidung aufgrund von diesen zeitlich früheren Abbiegevorgängen unterstützt werden (siehe auch 4. Lernen).

Der Ablauf der Funktionen in der Applikation lässt sich am folgenden Ablaufdiagramm (siehe Abbildung 3-8) nochmals veranschaulichen:

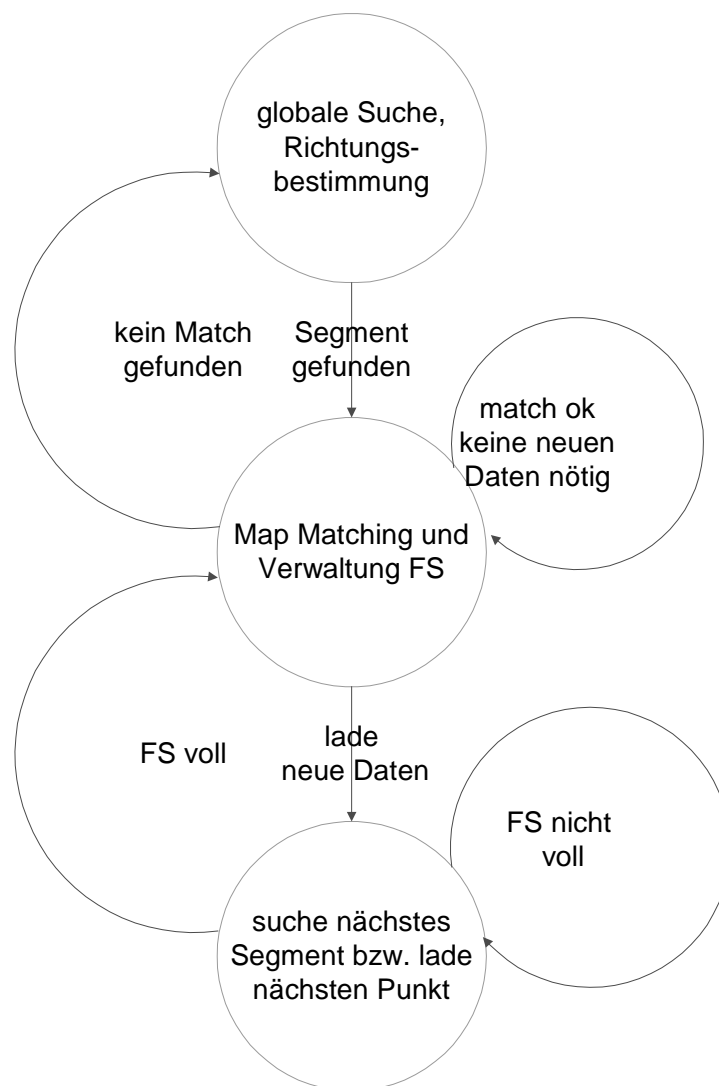


Abbildung 3-8: Ablaufdiagramm der Api

3.6.5. Bestimmung der Vorausschau

An Kreuzungssituationen muss die Applikation eine Entscheidung über den weiteren Weg fällen. Die Kernstrategie liegt darin, der Hauptstraße zu folgen, insofern keine weiteren Informationen bekannt sind. Dies wird anhand von Reisezeiten über Kreuzungen der digitalen Navigationskarte bestimmt. Diese Zeiten, die für die jeweiligen Richtungen in der Karte gespeichert sind, geben den Weg des geringsten „Widerstandes“ beim Überfahren einer Kreuzung an. Ursprünglich waren diese eigentlich zur Reisezeitberechnung in Navigationssystemen bestimmt, eignen sich aber auch, den initial wahrscheinlichsten Weg zu finden. An der Kreuzung angekommen entscheidet der Map-Matching-Algorithmus anhand der Richtung des Fahrzeuges, welche Abzweigung tatsächlich gewählt wurde. Frühere Signale wie das Setzen des Blinkers durch den Fahrer oder ein Bremsenriff des Fahrers bzw. eine geplante Route können zusätzlich zur vorausschauenden Beurteilung herangezogen werden. Gleichzeitig werden – falls vorhanden – die *Node Costs* aus der RDBMS ausgewertet. Diese können je nach Strategie der eintragenden Richtung unter Umständen eine wahrscheinlichere Vorausschau bieten. Bei den RDBMS-Daten wird zusätzlich die Zeit und der Tag ausgewertet. Auf die Entstehung der *Node Cost* in der RDBMS wird im Kapitel 4 noch einmal näher eingegangen. Die *Node Cost* in der RDBMS wird vorrangig behandelt. D.h. zeigen die Daten der DNK nach rechts, die RDBMS nach links, wird die Vorausschau nach links weiterführen.

Das Verfahren, der Hauptstraße zu folgen, bewährt sich auch insofern, da es sich bei der Hauptstraße in den meisten Fällen auch um die Abzweigung handelt, die mit der höchsten Geschwindigkeit befahren werden kann. D.h. eine unangemessene Bremsung, die für den Fahrer nicht unbedingt nachvollziehbar wäre, erfolgt in Kreuzungssituationen nur sehr selten. Will der Fahrer jedoch abbiegen und kennt die Funktionen, dass das Fahrzeug ohne weitere Signale des Fahrers geradeaus (der Hauptstraße entlang) fährt, weiß er, dass er jetzt die nötigen Aktionen für den Abbiegevorgang selbst übernehmen muss. Unmittelbar nach dem Abbiegevorgang hat die Software diesen erkannt und kann die Assistenzfunktion sofort wieder aufnehmen. Wie bereits zuvor erwähnt kann mit Mitteln der Datenbank alleine ein Abbiegevorgang nur im Idealfall bewältigt werden. Somit ist auch hier wieder die Frage zu stellen, ob und wie Abbiegevorgänge unterstützt werden sollten.

3.6.6. Vorverarbeitung der Geometriedaten

In der Vorverarbeitung der Daten werden einzelne Punkte der Karten zu Kurven zusammengefasst, um so weitere Geometrieparameter wie Kurvenradius und Kurvengesamtswinkel zu erzeugen. Dies erfolgt mit Hilfe einer Reihe berechneter Parameter und den Qualitätsbewertungen der Daten als Bewertung der Einzelkriterien. Als wichtigstes Kriterium gilt der Knickwinkel (siehe Abbildung 3-9) an einem Punkt.

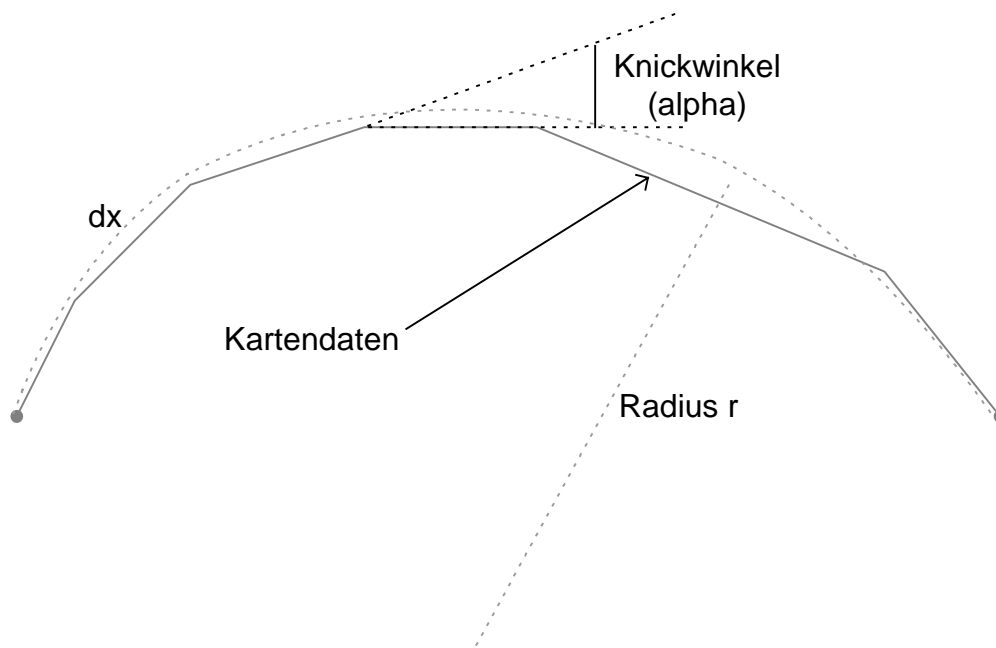


Abbildung 3-9: Knickwinkel zwischen 3 Kartenpunkten

Sind die Knickwinkel an zwei aufeinanderfolgenden Punkte nicht vorzeichengleich, können sie nicht zu einer gemeinsamen Kurve gehören. Auch die Unterscheidung zwischen Kurven, S-Kurven und Ecken wird mit Hilfe des Knickwinkels getroffen.

Sind die Winkel vorzeichengleich, wird als nächstes die Größe des Knickwinkels zweier aufeinanderfolgender Winkel bewertet. Dann werden die berechneten Radien verglichen. Liegen bereits durch Lernen verbesserte Radien vor, bekommt der Radius ein wesentlich höheres Gewicht für das Zusammenfassen von Punkten. Der Umweg über die Berechnung von Radien erfolgt ohnehin nur, weil man keine besseren Informationen zur Verfügung hat. Schließlich geht als letztes der Abstand zum nächsten Punkt in die Berechnung ein.

Als wesentliche neue Informationen werden der Gesamtwinkel einer Kurve, also ein Richtungsänderungswinkel, bestimmt sowie die Kurvengesamtlänge und somit der Kurvenradius. Es werden weiter Offsets für Kurven bestimmt (da eine Kurve meist nicht am ersten *Shape Point* beginnt, der sie beschreibt, sondern früher).

Kurven werden hier mit konstanten Radien angenommen, was für Querregelungssysteme sicherlich keine ausreichende Beschreibung mehr darstellen würde, für Längsregelungssysteme, in denen der Radius jedoch im wesentlichen zur Geschwindigkeitsberechnung verwendet wird, jedoch ausreichend ist.

Das Zusammenfassen von Einzelpunkten wird in einem Mehrschrittverfahren anhand der beschriebenen Kriterien durchgeführt. Als erstes erfolgt die Betrachtung der Knickwinkel α_x .

$$(3-1) \quad \alpha_x = a \cos\left(\frac{d_x}{\sqrt{d_x^2 + d_y^2}}\right)$$

mit (3-2)

$$d_x = \varphi_2 - \varphi_1 \cdot \cos(\lambda_1)$$

$$d_y = \lambda_2 - \lambda_1$$

Anhand des Vorzeichens wird jetzt die erste Entscheidung getroffen: Nur bei gleichen Vorzeichen werden weitere Berechnungen durchgeführt, ansonsten bricht der Algorithmus ab und geht zum nächsten Punkt. Als nächstes wird der Radius für den gerade betrachteten Punkt berechnet.

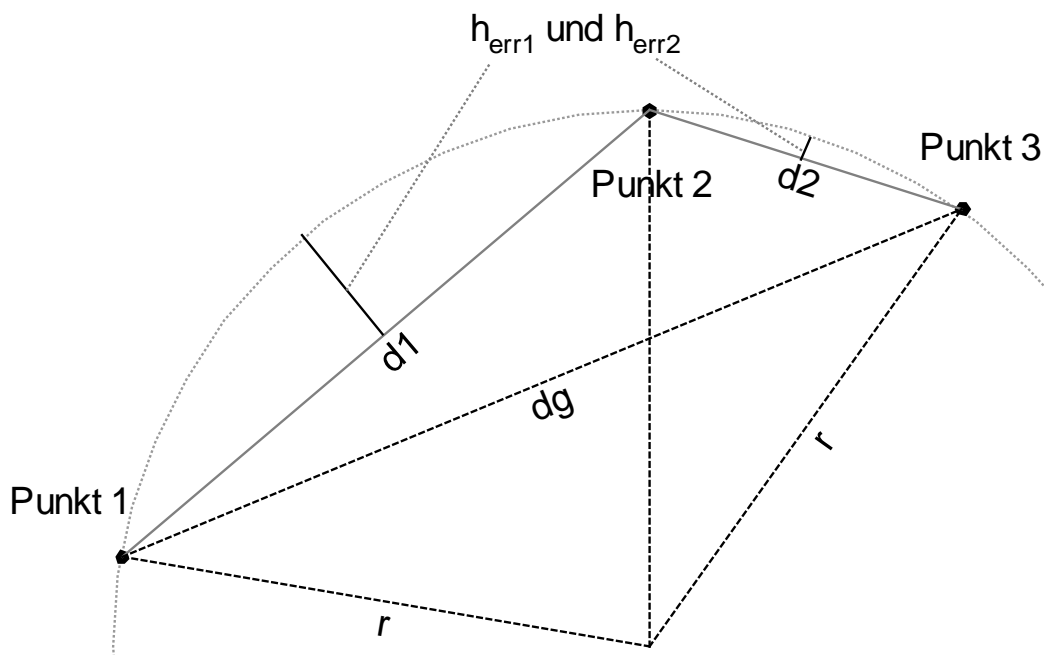


Abbildung 3-10: Geometrie für Vorverarbeitung

$$d_g = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2 \cdot d_1 d_2 \cdot \cos(\alpha)}$$

$$r = \frac{d_g}{2 \cdot \sin(\alpha)}$$

(3-3)

Der berechnete Radius r muss jetzt auf seine Richtigkeit geprüft werden. Natürlich ist der Radius mathematisch richtig, jedoch ist – wie im Beispiel (siehe Abbildung 3-10) gezeigt – der Fehler h_{err1} (also der Abstand der Straße zur berechneten Radiuslinie) sehr groß. Der berechnete Radius erscheint unwahrscheinlich, da der Digitalisierungsalgorithmus genau hier einen maximalen erlaubten Fehler festlegt. Der Fehler h_{err} berechnet sich zu

$$h_{err1} = r - \sqrt{r^2 - \frac{d_1^2}{4}}$$

$$h_{err2} = r - \sqrt{r^2 - \frac{d_2^2}{4}}$$

(3-4)

Ist h_{err1} bzw. h_{err2} größer als der erlaubte Digitalisierungsfehler, wurde der Radius zu groß angenommen. Der Radius wird auf Basis des Digitalisierungsfehlers neu berechnet:

$$(3-5) \quad r = \frac{\sqrt{2 \cdot la \cdot (1 + \cos(\alpha))}}{2 \cdot \sin(\alpha)}$$

$$\text{mit (3-6)} \quad la = \frac{h_{err_max}}{\sqrt{\frac{1 + \cos(\alpha)}{2 \cdot \sin^2(\alpha)} - \sqrt{\frac{2 + 2 \cdot \cos(\alpha) - \sin^2(\alpha)}{4 \cdot \sin^2(\alpha)}}}}$$

Dieser neue Radius kann jetzt für die weiteren Berechnungen verwendet werden. Ist der Kurvenradius aus der Datenbank aus z.B. einer früheren Messung bekannt, wird dieser vergleichsweise sehr genaue Radius für diesen Punkt angenommen. Aus dem Radius wird jetzt die Bogenlänge für diesen Punkt berechnet:

$$(3-7) \quad b = 2 \cdot r \cdot \alpha$$

Diese Bogenlänge gilt für den Bogen zwischen Punkt 1 und Punkt 3 (am Punkt 2). Nimmt man also an, dass jeder Punkt in der Datenbank sinnvoll (also nicht redundant) ist und somit eine Krümmung beschreibt, dehnt sich die Kurve über diesen Punkt um $b/2$ nach links und um $b/2$ nach rechts aus. Ist wiederum nun in diesem Abstand kein neuer Punkt zu finden, wird es unwahrscheinlicher, dass der nächste Punkt noch zur Kurve gehört. Die entsprechende Wahrscheinlichkeit wird mit einer Zugehörigkeitsfunktion berechnet. Das Verhältnis von b zum Abstand zum nächsten Punkt dx wird eingesetzt und $p(d)$ berechnet:

$$(3-8) \quad p(d) = f^0_1\left(\frac{0.5 \cdot b}{dx}, 0.6, 0.8\right)$$

Die Parameter für die Bewertung wurden dabei empirisch gefunden. Gleichermaßen wird eine Wahrscheinlichkeit für das Radiusverhältnis $p(r)$ zum Vorgänger und eine Wahrscheinlichkeit des Winkelverhältnisses $p(\alpha)$ zum Vorgänger berechnet:

$$(3-9) \quad p(\alpha) = f^0_1\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}, 0.6, 0.8\right)$$

$$p(r) = f^0_1\left(\frac{r_2}{r_1}, 0.6, 0.8\right)$$

Grundlage für dieses Verfahren ist die Annahme, dass eine Kurve aus einem weitgehend kontinuierlichen Radius und damit auch aus kontinuierlichen Knickwinkeln besteht.

Abhängig von der Datenqualität erfolgt eine zusätzlich Gewichtung (z.B. wird die $p(r)$ wesentlich höher bewertet, wenn ein Radius aus der Datenbank vorliegt) der berechneten Wahrscheinlichkeiten und die Berechnung einer Gesamtwahrscheinlichkeit p_{Kurve} , die bei der Entscheidung hilft, ob dieser Punkt zur Kurve gehört oder nicht.

$$(3-10) \quad p_{Kurve} = \sum \frac{k_i \cdot p_i}{\sum k_i}$$

Ist $p_{Kurve} > 0.5$, wird der neue Punkt als weiterer Kurvenpunkt akzeptiert, ansonsten abgelehnt. Bei Ablehnung beginnt eine neue Kurve bzw. Gerade (die im Prinzip auch als Kurve mit einem unendlichen Radius beschrieben wird). Bei Akzeptanz wird der nächste Punkt geprüft. Sind alle Punkte einer Kurve gefunden, können der Kurven-Gesamtradius, der Kurvenrichtungsänderungswinkel und die Offset- bzw. Start- und Endpunkte der Kurve berechnet werden.

Der Kurvenradius wird aus dem Gesamtänderungswinkel und der Bogenlänge berechnet:

$$(3-11) \quad \begin{aligned} \alpha_{kurve} &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \\ r_{temp_kurve} &= \frac{\sum_{i=1}^{n-1} dx_i}{\alpha_{kurve}} \end{aligned}$$

Auf Basis dieses Radius wird der Überhang der Kurve am Anfang und Ende der Kurve berechnet:

$$(3-12) \quad \begin{aligned} \varepsilon_{ende} &= \alpha_n \cdot r_{temp_kurve} \\ \varepsilon_{anfang} &= \alpha_1 \cdot r_{temp_kurve} \end{aligned}$$

Der tatsächlich Kurvenradius berechnet sich dann zu

$$(3-13) \quad r_{kurve} = \frac{\sum_i^{n-1} d_i + \varepsilon_{ende} + \varepsilon_{anfang}}{\alpha_{kurve}}$$

In der Realität beginnt eine Kurve in aller Regel nicht an einem Punkt in der digitalen Karte, sondern der Punkt wurde vom Digitalisierer gesetzt, weil eine Kurve begonnen hat und somit der Digitalisierungsfehler über die festgelegte Fehlerschranke gestiegen ist. Die errechneten Offsets werden am ersten bzw. letzten Kurvenpunkt im FS eingetragen und so den Anwendungen zur Verfügung gestellt.

Besteht die Kurve aus nur einem Punkt, erfolgt eine Prüfung, ob eine Ecke vorliegt. Der Punkt wird als Ecke identifiziert, wenn der Knickwinkel an diesem Punkt einen maximalen Kurvenwinkel übersteigt. Je nachdem, ob es sich um eine Links- oder Rechtskurve handelt, wird ein fester Offset eingetragen (bei Linkskurven typischerweise ein höherer Offset).

Wird ein Einzelpunkt, der keine Ecke war, von einem weiteren Einzelpunkt in entgegengesetzter Richtung gefolgt, liegt sehr wahrscheinlich eine S-Kurve (bzw. ein Straßenversatz) vor. Die Kurvenwinkel und Radien müssen dann zusätzlich korrigiert werden, da S-Kurven aufgrund des Digitalisierungsalgorithmus immer flacher erscheinen als in der Realität.

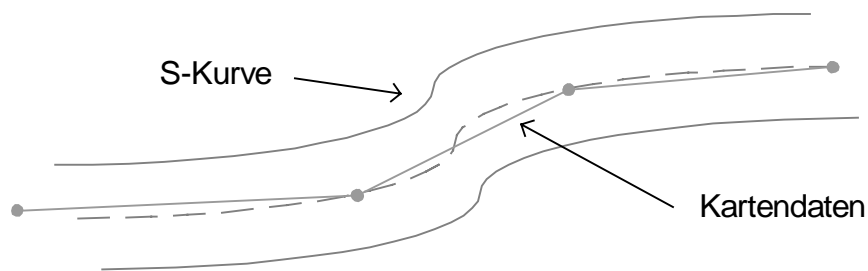


Abbildung 3-11: S-Kurvensituation

Wie in Abbildung 3-11 gezeigt kann ohne Verletzung des Digitalisierungsalgorithmus (gepunktete Linie) in einer Standardsituation ein maximaler Fehler im Rahmen der Regeln erzeugt werden. Da gerade S-Kurven bzw. ein Straßenversatz sehr geschwindigkeitsrelevant sind, ist eine Korrektur hier unbedingt nötig.

Die Einzelwinkel an den entsprechenden Knickpunkten werden nach folgender Rechnung erhöht:

$$\alpha_{s_kurve} = \tan\left(\frac{2 \cdot h_{err_max}}{4 \cdot dx}\right)$$

(3-14)

$$\alpha_1 = \alpha_1 + \alpha_1 \cdot \alpha_{s_kurve}$$

$$\alpha_2 = \alpha_2 + \alpha_2 \cdot \alpha_{s_kurve}$$

Mit den neu berechneten Winkel werden entsprechend die Radien angepasst.

4. LERNEN

In Kapitel 2 Fahrzeugpositionierung wurden die zur Positionierung eines Fahrzeuges in der Welt notwendigen Mittel beschrieben. Die entsprechenden Abbildungsverfahren (Map-Matching) bilden diese Position auf eine Modellwelt (digitale Karte) ab. Die digitalen Karten beschreiben jedoch heutzutage die geforderte Genauigkeit und Ausführlichkeit der Modelle nur ungenügend. Kartenhersteller werden zwar mit Sicherheit in Zukunft neue erweiterte Karten erstellen und pflegen, jedoch werden auch die Anforderungen steigen. So wird es nicht mehr genügen, alle 5 Jahre neue Kartengenerationen zu verbreiten, sondern vielmehr wird ein fließender Prozess notwendig. Digitale Karten müssen ständig erweiterbar und aktualisierbar sein, um die Modelle von der Umgebung der Wirklichkeit und den neuen Anforderungen anzupassen. Ein automatischer Prozess, der diese Karten ständig aktualisiert, wird notwendig. Die digitale Karte muss durch Lernen aktualisiert werden können.

4.1. Problembeschreibung

Eine digitale Navigationskarte mit ihren globalen Zusammenhängen von Straßen und entsprechenden Attributen dient als Basis. Die Qualität der Daten ist im allgemeinen gut beurteilbar, da das Quellmaterial, aus dem die DNK erstellt wurde, bekannt ist. Extreme Ausreißer in der DNK sind nicht bzw. nur im geringeren Umfang zu erwarten.

Die Eingangsdaten werden durch die Messungen beschrieben, die von verschiedenen Sensoren bzw. Systemen abstammen. Grundsätzlich werden zwei Kategorien unterschieden:

- Messung zur Ortsbestimmung
- Messungen von Attributen an einem bestimmten Ort

Der aktuelle Ort (Länge, Breite, Höhe) geht klar aus den GPS-Messungen hervor. Die Genauigkeit der Messung lässt sich gut durch die zusätzlichen Sensorwerte des GPS-Systems (z.B. HDOP) und der Koppelnavigation (siehe auch Fahrzeugpositionierung) bestimmen.

Die Attribute weiterer Messsysteme (z.B. Videobilderfassung, Reibwerte, Radius usw.) werden mit einer bestimmten Fehlervarianz bzw. berechneten Qualität des jeweiligen Messsystems geliefert.

Die Daten in der DNK sollen jetzt den aktuellen Gegebenheiten angepasst werden. D.h. die Lage von vorhandenen Punkten in der DNK soll genauer werden bzw. neue Punkte der DNK hinzugefügt werden. Gleichzeitig sollen vorhandene Attribute aktualisiert bzw. neue hinzugefügt werden.

Das Lernen von neuen Daten wird durch Schreibzugriffe während des Befahrens einer Strecke auf die DNK gelöst. Die DNK selbst bietet derzeit keine Schreibmöglichkeit. Durch die Erweiterung mit der zusätzlichen Datenbank (RDBMS) wird jedoch ein Schreiben möglich. Attribute können an vorhandenen Punkten verankert werden. Durch zusätzliche Qualitätsbewertung werden die Daten dabei mit eventuell vorhandenen Daten verglichen bzw. bei nicht vorhandenen Daten mit einer initialen vom jeweiligen Sensor gelieferten Qualität in die Datenbank eingetragen. Die Intelligenz des Lernvorganges liegt im Vergleichen der Qualitäten von vorhandenen mit neuen Da-

ten. Die Zuordnung von Attributen zu Orten wird durch den Map-Matching Prozess vollständig beschrieben.

Der Ort selbst wird durch Vergleich der vorhandenen geometriebeschreibenden Punkte mit den Messungen verbessert. Dieser Vorgang wird ebenfalls schon durch das Map-Matching bereitgestellt. Die Verschiebung eines Punktes kann anhand der Varianzen der Messung und der kumulierten Varianzen des Punktes bzw. Abschnitts in der Datenbank erfolgen.

Die Messungen sind in ihrer Varianz klar zu beurteilen, und Ausreißer werden mit einer hohen Wahrscheinlichkeit erkannt. Neue Daten müssen auch nicht unmittelbar verwendet werden: Zeigt sich ein unklares Ergebnis, kann man diese Daten verwerfen und beim nächsten Befahren der Strecke neue Daten aufzeichnen. Das Expertenwissen über die Fahrzeugbewegung selbst ist sehr hoch und damit klar beurteilbar. Bei dem hier verwendeten Ansatz handelt es sich um ein schematisches Verfahren, in dem zum einen Statistikanätze und zum anderen Vorwissen über die Qualität der Signale zum Einsatz kommen soll.

Das Erlernen von Kartendaten kann offline am Arbeitsplatz oder online im Fahrzeug erfolgen. Offline heißt dabei, dass Messungen nur aufgezeichnet, später nachbearbeitet werden und dann aus den gewonnenen neuen Informationen eine neue überarbeitete Karte für die nächste Fahrt erzeugt wird. Bei Online-Verfahren werden die Daten unmittelbar in die im Fahrzeug befindliche digitale Karte eingearbeitet und sind somit unmittelbar für das nächste Befahren bzw. für die entgegengesetzte Richtung verfügbar.

4.2. Geometrie

Beim Erlernen der Geometrie werden beim ersten Befahren bereits die größten Erfolge erzielt. Es können Daten aufgezeichnet werden, die bisher noch nicht in der Karte gespeichert waren: der Radius und die Höhe. Anhand des Radius können einzelne Punkte gut zu Kurven zusammengefasst werden und unmittelbar grobe Digitalisierungsfehler erkannt werden. Mit der Radiusinformation alleine ist die größte Geometrieverbesserung zu erzielen, da er eine zusätzliche von Punkten unabhängige Geometriebeschreibung einer Strecke darstellt. Der Radius ergibt sich aus der Geschwindigkeit und der Gierrate und berechnet sich zu:

$$(4-1) \quad r = \frac{v}{\omega}$$

Nach Veränderung der Geometrie (Kapitel 4.2.1.) bzw. dem Einbringen neuer Punkte (Kapitel 4.2.2.) müssen die Segmente bzw. Punktdaten den Segmenten in der DNK wieder zugeordnet (Kapitel 4.2.3.) werden. Die Daten werden anschließend noch mal geprüft und dann in die RDBMS zurückgeschrieben.

Im folgenden Bild (Abbildung 4-1) ist eine Situation dargestellt, in der durch Lernen die Daten deutlich verbessert werden konnten.

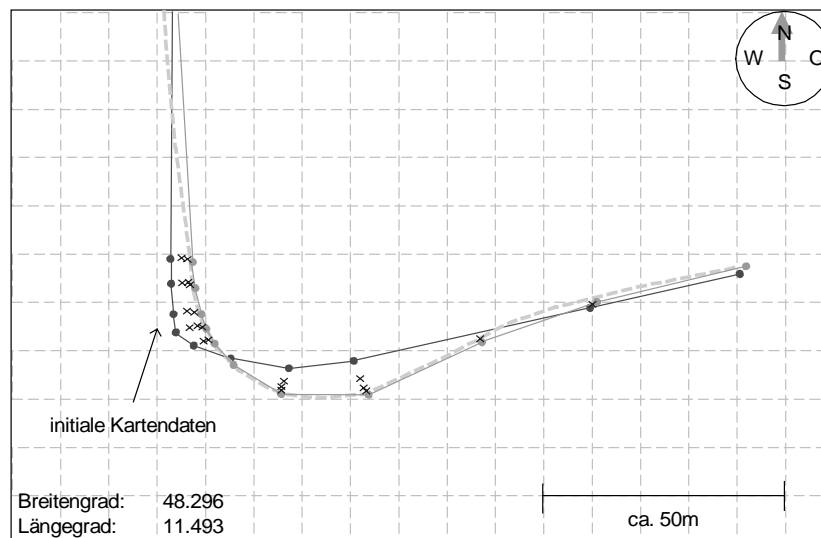


Abbildung 4-1: Vergleich zwischen gelernten und Originaldaten

Die hellgraue gestrichelte Linie zeigt dabei eine genaue Messung und stellt somit die Referenz dar. Die schwarze Linie mit runden Zwischenpunkten zeigt die initialen Kartendaten aus der DNK. Die mit Kreuzen markierten Einzelpunkte stellen den Ablauf des Lernvorganges dar, während die mittelgraue Linie mit runden Zwischenpunkten schließlich die neuen Kartendaten nach 5-maligem Befahren zeigt. Die mittelgraue Linie ist dabei beinahe Deckungsgleich mit der Referenzmessung. Die Referenzlinie wurde dabei mit einer eigens für diesen Zweck aufgestellten Referenzstation und Post Processing Methoden korrigiert und aufgezeichnet. Die Genauigkeit der Messung bezogen auf die Referenzstation liegt bei ca. 0.5m (relative Genauigkeit). Unterstellt man eine weitere Ungenauigkeit von ca. 1m der Referenzstation, liegt die absolute Genauigkeit bei ca. 1.5m.

4.2.1. Verändern vorhandener Geometrie

Zur Berechnung der neuen Geometrie werden die bereits vorgefilterten Daten (Geschwindigkeit v und Gierrate w) aus dem Dynamikmodell des Fahrzeuges verwendet [Venhovens, Naab, 1998].

Die Punkte können jetzt in der DNK anhand der bisherigen Fehlervarianz bzw. initialen Qualität der DNK und der Fehlervarianz der Messung verschoben werden. Der Radius dient als Kontrollmittel, um in der Karte keine ungewollten Ecken zu erzeugen. Die Messdaten werden durch das im Kapitel 2. Fahrzeugpositionierung beschriebene Map-Matching Verfahren den Daten aus der DNK zugeordnet. Dabei wird der Abstand zwischen Messung und digitaler Karte ständig überprüft.

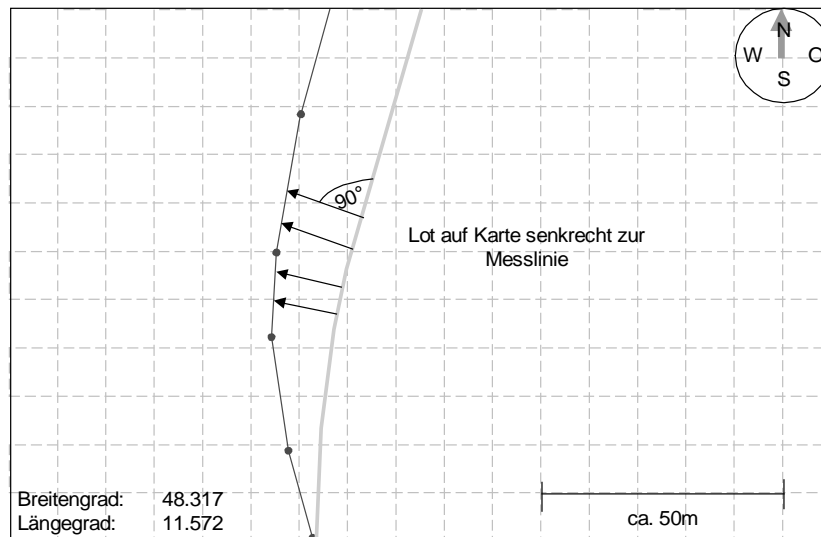


Abbildung 4-2: Lot von Messung auf Karte

Im Bild (Abbildung 4-2) zeigt die graue Linie die Messung, die schwarze die Kartenlinie. Der Matching-Prozess berechnet in jedem Zeitschritt die Entfernung zwischen Kartendaten und Messung (schwarze Lotpfeile). Fällt der Match auf einen Kartenpunkt, kann dieser verändert und attribuiert werden. Das Maß für die Verschiebung eines Kartenpunktes wird durch Vergleich der Fehlervarianz des Kartenpunktes und der Messung gewonnen.

$$(4-2) \quad v = 1 - \frac{\mathcal{E}_{\text{Messung}}}{\mathcal{E}_{\text{Karte}}}$$

$\mathcal{E}_{\text{Messung}}$ wird aus dem HDOP – Wert der GPS-Messung berechnet. $\mathcal{E}_{\text{Karte}}$ wird initial zu ca. 15 m für die DNK gesetzt. Dieser Wert entspricht weitgehend der Realität und hat sich als geeignet erwiesen. Jeder Lernvorgang verändert die Kartenqualität in Abhängigkeit von der errechneten Varianz. Die Varianz v wird zusätzlich Tiefpassgefiltert, um ein plötzliches Umschalten von schlechter zu guter Qualität und somit einer eventuellen Eckenbildung vorzubeugen.

Der neue Punkt wird dabei entlang des Lotes zwischen dem Kartenpunkt und der Messung –senkrecht zur Messung– um die Varianz verschoben. Mit Hilfe folgender Berechnungen wird der neue Punkt bestimmt (siehe auch Kapitel 2).

$$(4-3) \quad \lambda_{\text{learn}} = \frac{\lambda_{\text{match}} + k_2 \cdot v \cdot t_y}{r_{\text{Erde}}} + \lambda_{\text{ref}}$$

$$\varphi_{\text{learn}} = \frac{\varphi_{\text{match}} + k_2 \cdot v \cdot t_x}{r_{\text{Erde}} \cdot \cos(\lambda_{\text{ref}})} + \varphi_{\text{ref}}$$

Der Radius wird über eine Mittelung der nächsten Mess-Nachbarn geglättet. Bei jedem weiteren Befahren wird ähnlich wie bei der Ortslage mit Hilfe einer berechneten Varianz der Radius sukzessive verbessert. Die Varianz der Radiusmessung bleibt jedoch relativ konstant, da der Gierratengeber und die Raddrehzahlsensoren nicht sehr stark von Außeneinflüssen wie z.B. guter Satellitensicht abhängen.

Die Höheninformation stammt aus den GPS-Messungen und wird bei weiteren Befahrungen mit Hilfe einer vertikalen Varianz (VDOP) der GPS-Messung verbessert.

4.2.2. Erzeugung neuer Punkte

Zwischen den vorhandenen Kartenpunkten wird mit jeder Messung der Abstand von der Kartenlinie zur Messung berechnet. Überschreitet dieser Lotabstand einen Schwellwert, erfolgt die Eintragung eines neuen Punktes in die Karte. Bei Erzeugen eines neuen Punktes wird zusätzlich der Abstand zu den nächsten Nachbarn bewertet, um diesen nach Möglichkeit mittig anzuordnen.

Ebenfalls kann es vorkommen, dass unnötige Punkte in der Datenbank vorkommen bzw. nach dem Lernvorgang unnötig werden. Diese stellen im Prinzip kein Problem in Hinsicht auf Genauigkeit dar, sondern verbrauchen schlicht Speicherplatz. Sie können aber leicht gefunden werden: Es werden dabei drei Punkte betrachtet. Eine gedachte Linie vom 1. zum 3. Punkt gezogen und der Lotabstand des dazwischenliegenden Punktes von dieser Linie bewertet. Liegt dieser unterhalb eines Schwellwertes, kann der Punkt gelöscht werden. Der Radius wird wieder als Prüfkriterium herangezogen, um z.B. S-Kurvensituationen, die unter Umständen weitgehend abstandneutral sind, sich in den dazwischenliegenden Punkten aber deutlich im Radius unterscheiden, nicht unbeabsichtigt zu löschen.

Weitere Gründe für das Setzen eines neuen Punktes können Segmentenden bzw. -anfänge darstellen. Segmente enden bzw. beginnen immer dann, wenn sich ein Segmentattribut ändert, und an kreuzenden Straßen. Ähnliches gilt für Punktattribute, die nach Möglichkeit immer an schon vorhandenen Punkten eingetragen werden. Alternativ zum Setzen eines neuen Punktes für ein Attribut kann dieses an einem vorhandenen Punkt mit einem Offset verankert werden.

Beim Setzen von Punkten für ein Punktattribut wird der neue Punkt aus den Kartendaten berechnet und exakt auf die Kartenlinie zwischen den benachbarten Punkten gelegt. Dies soll einer unbeabsichtigten Verfälschung durch für die Geometriebeschreibung ohnehin unnötige Punkte vorbeugen.

4.2.3. Zuordnung der neuen Daten

Nach Erzeugung bzw. Korrektur aller Daten müssen diese den entsprechenden Segmenten zugeordnet werden. Eine automatische Zuordnung kann über den Matchingprozess erfolgen. Die dem Segment zugeordneten Messungen werden in die Karte als neue Punkte übertragen. Innerhalb eines Segmentes ist dies eindeutig möglich. An den Segmenträndern muss aber auf Konsistenz mit den Folgesegmenten geachtet werden. Die Richtigkeit der Daten wird vor dem Zurückschreiben in die Datenbank nochmals anhand verschiedener Kriterien überprüft.

Erstes Kriterium ist dabei die logische Abfolge von Punkten. D.h. die Punkte müssen kontinuierlich eine Richtung verfolgen (können sich also z.B. nicht um 180 Grad winden). Die Knickwinkel werden dabei an jedem Punkt überprüft. Über die Knickwinkel und die Punktabstände werden Radien berechnet, welche in bestimmten Intervallen mit den gemessenen Radien übereinstimmen müssen. Als letztes Kriterium müssen die Punktindizes kontinuierlich sein. Sind alle Kriterien erfüllt, wird das neue Segment in die Datenbank zurückgeschrieben.

Wird ein Segment wegen Inkonsistenzen verworfen oder befindet man sich am Anfang bzw. am Ende einer gelernten Strecke, entsteht eine Lücke zwischen gelernten und nicht gelernten Daten. Folgendes Bild (Abbildung 4-3) stellt diese Situation dar.

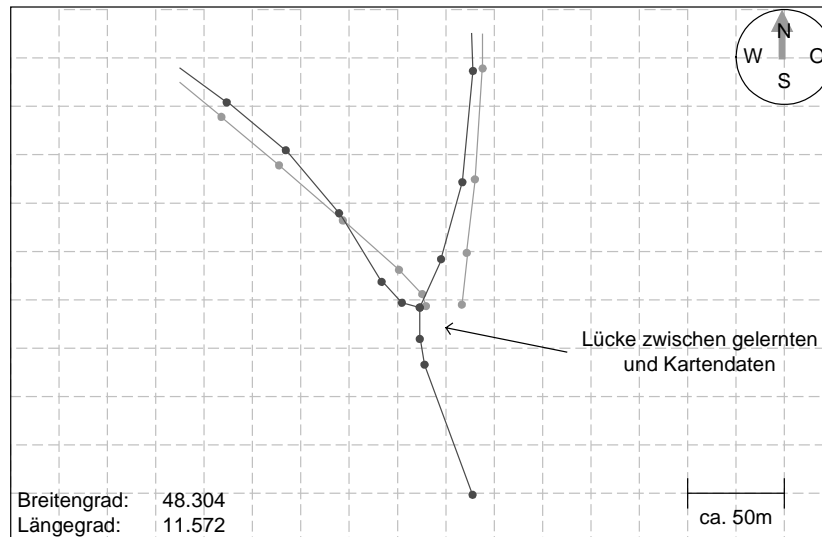


Abbildung 4-3: Lücke zwischen gelernten und Originaldaten

Würde ein Fahrzeug von der schwarzen Linie auf die mittelgraue, also die gelernten Daten, fahren, entsteht beim Überfahren in der dargestellten Situation ein 90 Grad Eck, das in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. Um die Stetigkeit der Daten zu gewährleisten, wird ein Übergangsbereich notwendig. Die Daten müssen „überblendet“ werden. Nur dann kann eine weitgehend stetige Funktion gewährleistet werden. Folgendes Bild (Abbildung 4-4) zeigt das „Einblenden“.

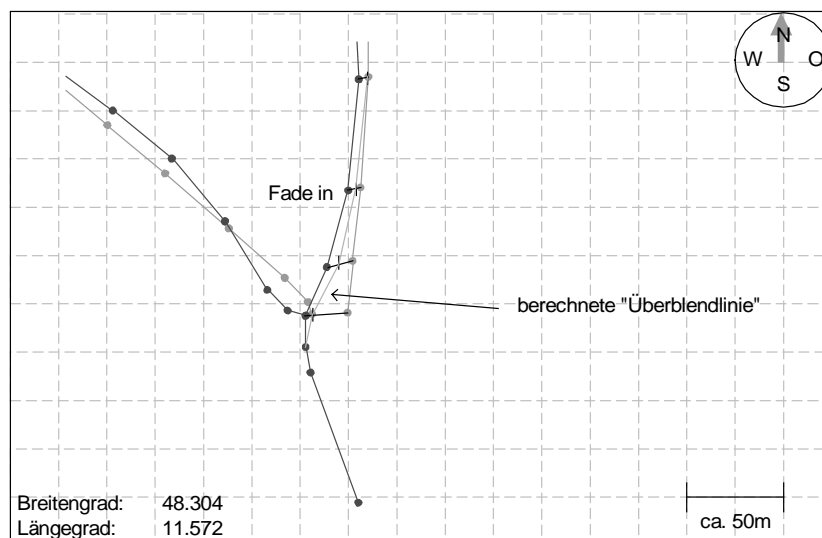


Abbildung 4-4: „Einblenden“ von Daten

Die Daten werden dabei über einen bestimmten Bereich überblendet (hellgraue Linie), in dem die Punkte auf die Zwischenlinie (schwarze Linie) zwischen gelernten und nicht gelernten Daten gesetzt werden. Dieser Prozess muss je nach Größe des Fehlers über unterschiedlich lange Bereiche durchgeführt werden.

An Kreuzungssituationen werden Segmente unter Umständen ebenfalls nicht vollständig überfahren, da in der bisherigen Karte die Kreuzung um einige Meter zur Wirklichkeit verschoben ist.

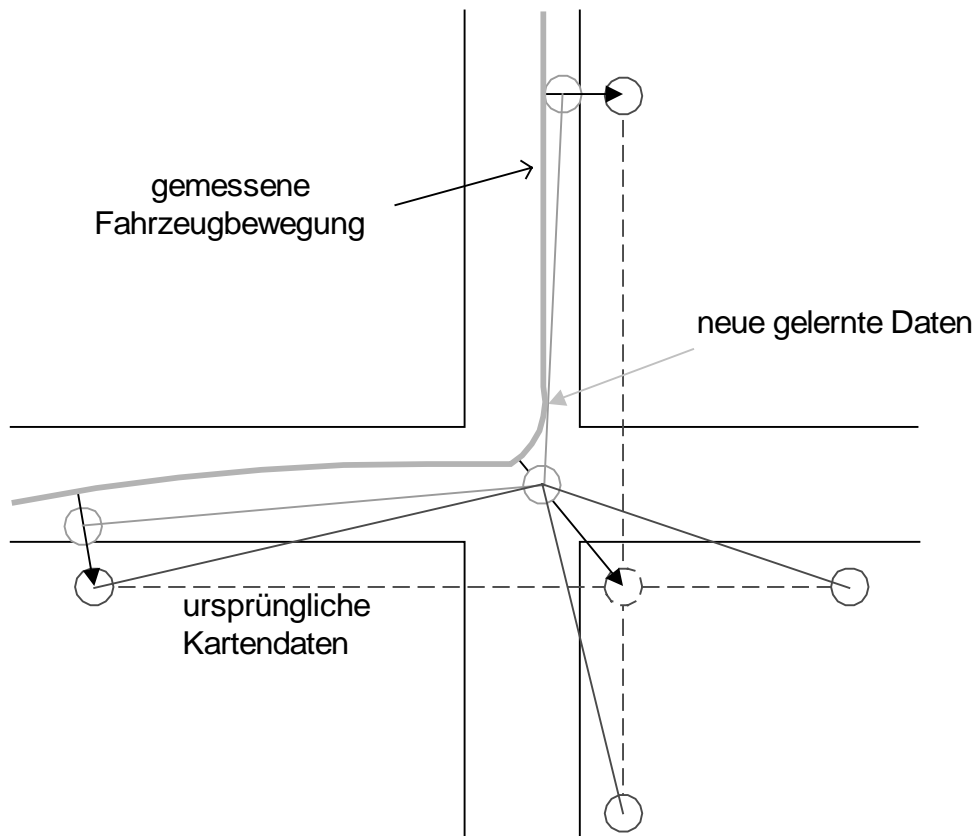


Abbildung 4-5: Kreuzungssituation mit verschobener Kreuzung

Da eine Kreuzung immer nur in einer Richtung überfahren werden kann, entstehen beim Verändern der Punkte im Kreuzungsbereich unter Umständen Inkonsistenzen für die restlichen Richtungen. D.h. beim Verändern von Kreuzungen müsste im Anschluss eine Anpassung sämtlicher angrenzender Punkte erfolgen (siehe auch Abbildung 4-5). Für die Anpassung wäre aber ein vollständiges Bild der Kreuzung notwendig. D.h. die Kreuzung müsste in sämtlichen Richtungen überfahren worden sein. Dies wird unter Umständen selbst nach mehrmaligem Befahren des Nutzers nie geschehen, da es im normalen Verkehr diverse Kreuzungen gibt, die von einem Fahrer immer nur in die selbe Richtung überfahren werden. In dieser Arbeit wird das Problem wie folgt gelöst:

Die Kreuzungspunkte werden mehrfach in der zusätzlichen Datenbank abgelegt. So gibt es jeweils einen Punkt für eine Richtung eines Segmentes auf der Kreuzung. Eine Kreuzung besitzt also nicht einen, sondern vier initial gleiche Anfangspunkte (bei vier abgehenden/kommenden Straßen vgl. auch Abbildung 4-6). Beim wieder-

holten Lesen wird immer nur der Kreuzungspunkt für den entsprechenden Abbiegevorgang gelesen.

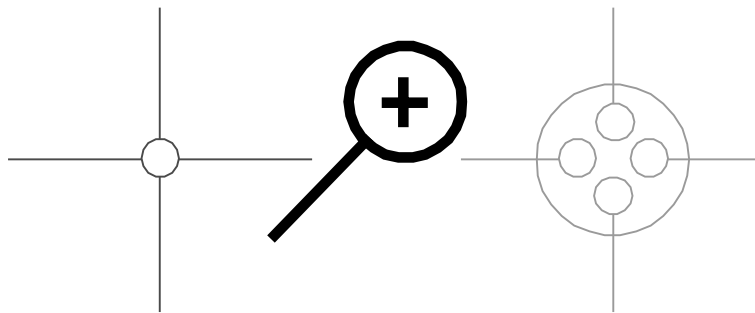


Abbildung 4-6: Mehrfachkreuzungspunkte

Oben dargestellte Kreuzungssituation würde somit nach dem Lernvorgang wie folgt aussehen.

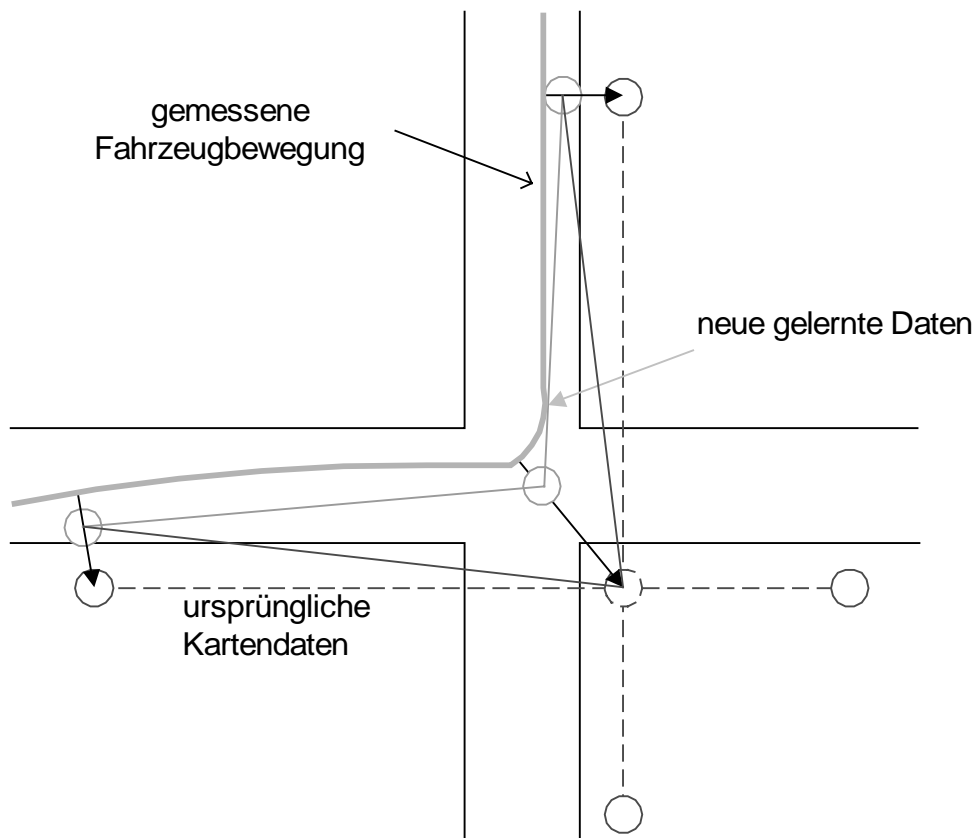


Abbildung 4-7: Kreuzung mit Mehrfachkreuzungspunkten

Es wird nur der Kreuzungspunkt für den Abbiegevorgang verändert (siehe Abbildung 4-7), der durch die dicke hellgraue Linie dargestellt wird. Die anderen drei Punkte bleiben gleich (gestrichelte Linie) und werden erst beim Befahren in der entsprechenden Richtung verändert.

Beim Lernen in Abbiegevorgängen müssen auch noch die Offsets berücksichtigt werden (siehe Abbildung 4-8), die der Fahrer beim Überfahren erzeugt. So wird nur beim Linksabbiegen bzw. Geradeausfahren der Mittelpunkt einer Kreuzung überfahren. Beim Rechtsabbiegen hingegen wird die Kreuzung geschnitten.

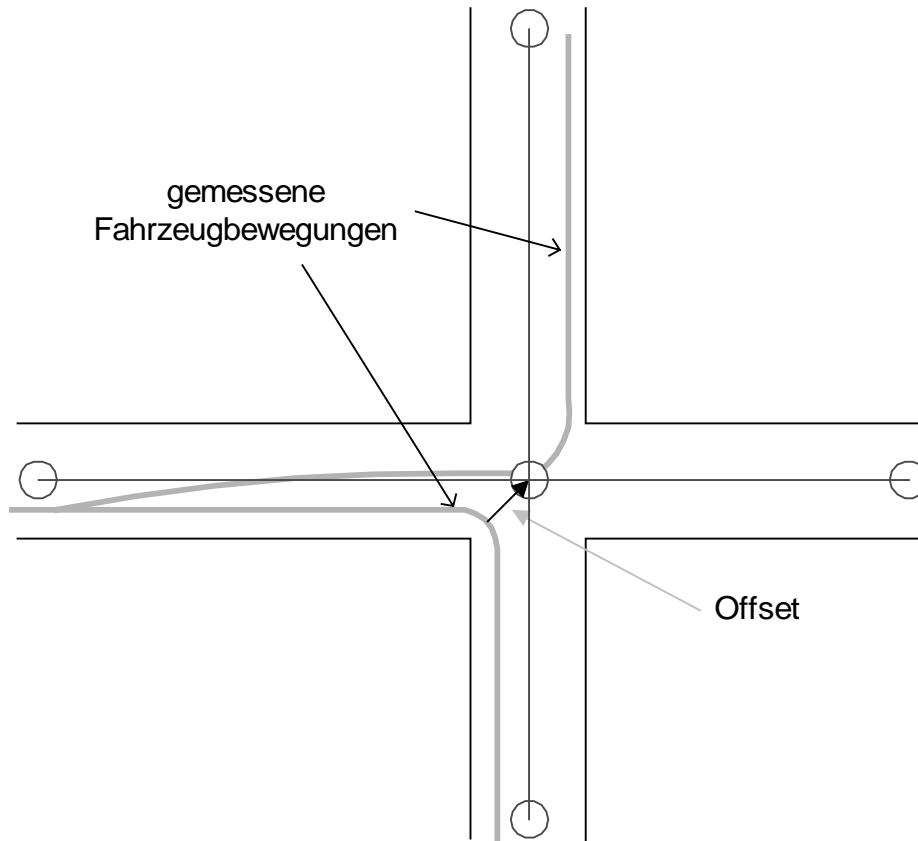


Abbildung 4-8: Offsets bei Abbiegevorgängen

Die Verschiebung wird geschätzt und der neue Punkt entsprechend korrigiert. Bei der Korrektur wird der Straßentyp mit berücksichtigt. Je öfter eine Kreuzung überfahren wird, desto besser ist das Abbild.

4.2.4. Erzeugung von Geometriedaten aus Messungen

Bei der reinen Aufzeichnung von Daten zur Kartenerstellung bzw. Verbesserung genügt es, Geschwindigkeit, Gierrate und GPS-Positionsdaten aufzuzeichnen. Diese Daten lassen Rückschlüsse über die Geometrie und ortsbezogene Geschwindigkeitsprofile zu. So kann sowohl die Geometrie der Straße als auch eventuelle Geschwindigkeitslimits erkannt werden.

Zusätzlich zu diesen Daten können Informationen aus beliebigen anderen Sensoren mit in das Protokoll aufgenommen werden. Zum Beispiel Daten aus der Videobildverarbeitung und entsprechende vorverarbeitete Informationen über Landmarks (wie Spurbreite, Schilder usw.). Aus einer Reibwertsensorik können Daten über den Zustand der Straße erfasst werden. Dies sind nur einige Beispiele neuer zusätzlicher Informationen für digitale Karten. Prinzipiell kann jeder neue Sensor in dieses Ver-

fahren integriert werden und so weitere Umgebungsinformationen für Straßen sammeln. Die Attribute können dann je nach ihrer örtlichen Änderungsgeschwindigkeit bzw. der geforderten Genauigkeit an Segmenten oder an einzelnen Punkten verankert werden. Segmentattribute gelten dabei jeweils für einen größeren Abschnitt, während an Punkten auch sich sehr schnell verändernde Attribute verankert werden.

Sämtliche Daten sollten bereits –soweit möglich und sinnvoll- vorverarbeitet sein, um die Datenmenge gering zu halten.

Folgende Daten wurden bisher in ein Testprotokoll aufgenommen:

- Gierrate
- Geschwindigkeit
- GPS-Positionen
- Spurbreite

Die Fahrzeugdaten wie Gierrate und Geschwindigkeit sind dabei aufgearbeitete Signale aus den Raddrehzahlsensoren, Lenkwinkel bzw. einem Drehratengeber, welche über ein entsprechendes Modell vorverarbeitet sind.

Die GPS-Positionsdaten müssen nicht unbedingt bei der Aufzeichnung schon korrigiert sein (SPS), sondern können im Post Processing auf DGPS-Genauigkeit gehoben werden. Eine Referenzstation zeichnet dabei zeitgleich die Referenzdaten auf, die später mit den Daten aus der Messung verglichen werden. Dies bringt zwar keinen Vorteil in Bezug auf die Datenmenge, spart aber zum einen einen weiteren Sensor und verhindert Empfangsprobleme durch Abschattungen o.ä.. Die Spurbreite wird vom Videosystem geliefert und dabei in einer entsprechenden Videobildverarbeitung errechnet [Dickmanns, 1998]. Die so aufgezeichneten Daten können als Eingangsdaten für ein Kartenerzeugungsmodul dienen.

Die Messungen bilden eine kontinuierliche Kette. Die Daten könnten bereits in dieser Rohdatenform als Karte verwendet werden. Um jedoch Speicherplatz zu sparen und Fehler ausfindig zu machen, müssen diese Daten überarbeitet werden.

Um aus der großen Anzahl von Einzelpunkten eine digitale Karte zu erzeugen, wurde folgender Algorithmus entwickelt, der einen Anfangspunkt mit den weiteren Folgepunkten verbindet. Bei jedem neuen Punkt werden sämtliche Abstände der dazwischenliegenden Einzelpunkte zur neu entstandenen Testlinie gemessen (siehe Abbildung 4-9).

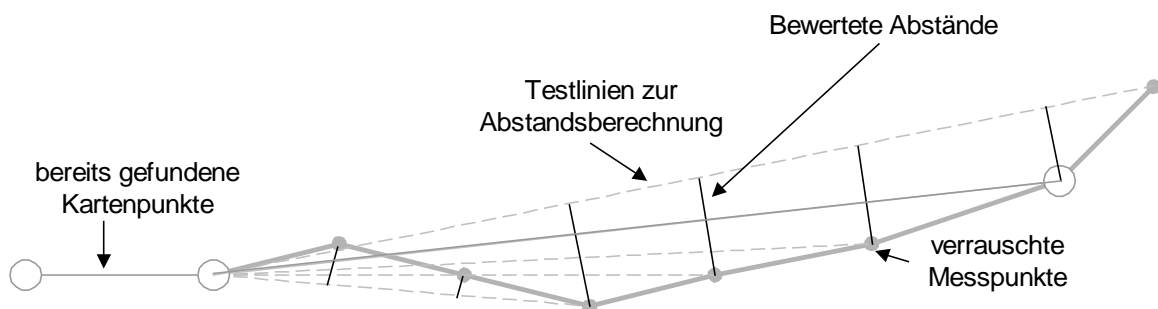


Abbildung 4-9: Algorithmus zur Geometrieberechnung

Die Abstände zu den Punkten dürfen dabei einen Schwellwert s nicht überschreiten. Ist dieses Kriterium nicht mehr erfüllt, wird zum letzten Punkt, an dem es noch erfüllt war, zurückgegangen und ein neuer Punkt (graue Kreise) gesetzt. Der Schwellwert s hängt stark von der Messgenauigkeit ab. Benutzt man z.B. CDGPS und hat sehr genaue Messungen im cm-Bereich, kann s deutlich kleiner gewählt werden als bei normalen DGPS-Messungen. Bei ungenaueren Messungen müssen auch weitere Kriterien zur Erzeugung eines neuen Geomtriepunktes eingeführt werden. Der Radius, der bisher noch nicht betrachtet wurde, kann hier verwendet werden. Gerade bei Genauigkeiten im Bereich von $\pm 5\text{m}$ (DGPS) kann eine S-Kurve bzw. ein Straßenversatz leicht von obigem Algorithmus verschluckt werden.

Nachdem die Radiusmessung selbst auch verrauscht ist, wird mit einem ähnlichen Algorithmus eine Radiusänderung erkannt und entsprechend ein neuer Punkt gesetzt.

Weiter wird ein Parameter eingeführt, der nach einer Maximaldistanz zwischen zwei Punkten einen neuen Punkt setzt. Dies wird notwendig, da Suchalgorithmen beim initialen Suchen oft nur Abstände zu Punkten berechnen. Würde sich auf einer 10 km langen exakt geraden Strecke dann nur ein Punkt am Anfang und am Ende befinden, würde der Algorithmus ca. 10 km benötigen, um initial die Straße zu finden, obwohl er sich direkt darauf befindet.

Die beschriebenen Algorithmen können sowohl online als auch offline verwendet werden. Bei der direkten Verarbeitung (online) werden die Daten jeweils für einen bestimmten Bereich gesammelt und dann gemeinsam verarbeitet. Die Bereichsgrenzen können am Wechsel von teilstückbezogenen Attributen gefunden werden. Ändert sich z.B. die Spurbreite signifikant, wird von einer Straßentypänderung ausgegangen und ein neues Teilstück begonnen.

4.2.5. Aufbau einer cm-genauen Karte

Zum Testen entsprechender Algorithmen und Anwendungen für cm-genaue Karten wurde das Messgelände der BMW AG in Aschheim cm-genau vermessen. Abbildung 4-10 zeigt die vermessene Bahn.

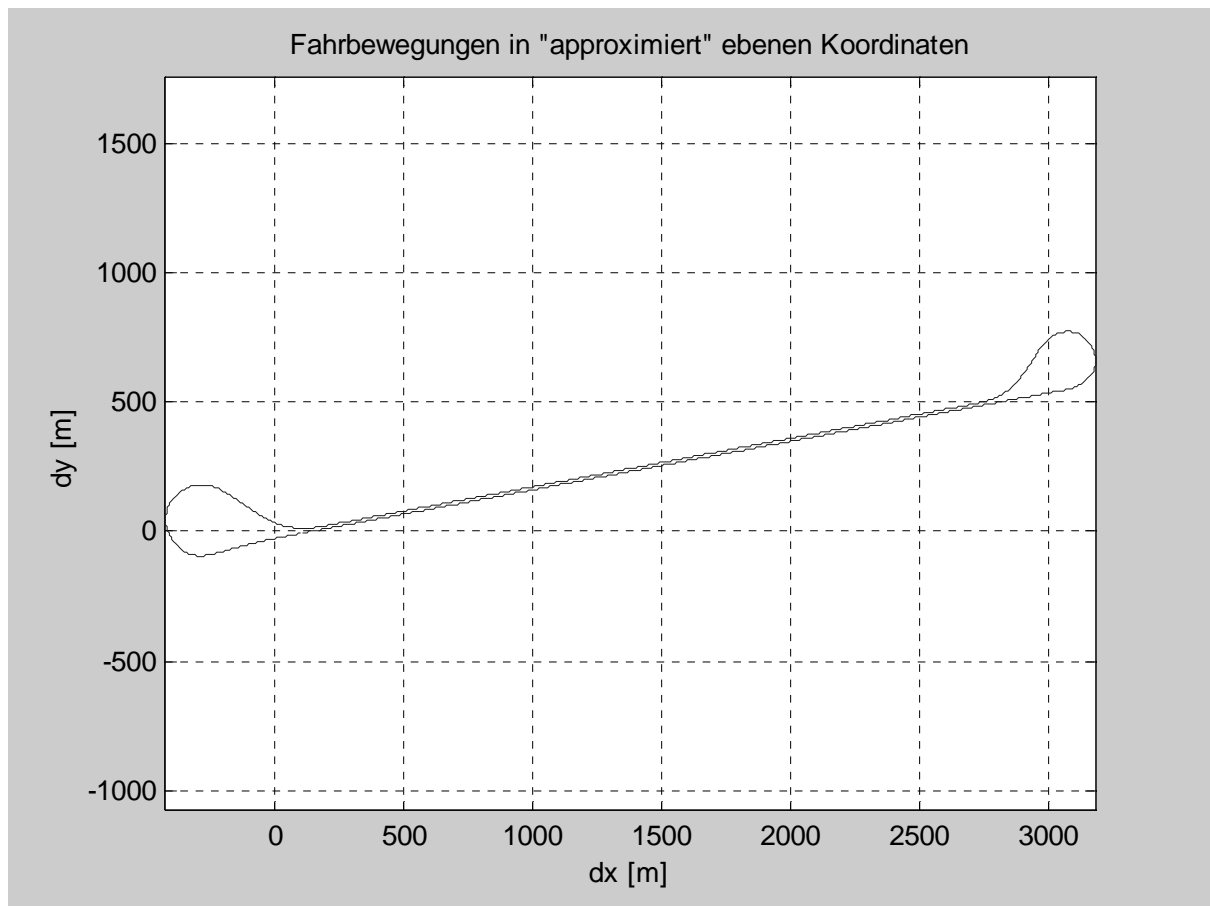


Abbildung 4-10: cm-genau vermessene Versuchsstrecke

Sämtliche Algorithmen zur Erzeugung dieser Karte wurden offline angewendet, d.h. die Bahn wurde erst vermessen und dann in mehreren Schritten eine digitale Karte erzeugt. Da der Mensch nicht ohne weiteres in der Lage ist, die Spur mit einem normalen Fahrzeug so exakt zu halten, um im Anschluss aus einer ganz normalen Fahrt eine so hochgenaue Karte zu erstellen, wurde eine Spezialkonstruktion verwendet. Man könnte zwar aus mehrmaligen Fahrten und Mittelung der Daten immer noch sehr gute Ergebnisse erzeugen, jedoch hätten diese bei einem Fahrer immer noch eine persönliche Ausprägung.

In dieser Arbeit wurde ein anderer Weg gewählt: Es wurde versucht, durch ein sehr exaktes Abfahren des Mittelstreifens eine Bahn auf den cm genau zu vermessen. Hierzu wurde ein GPS-Sensor an einer eigens angefertigten Lanze einer Kehrmaschine befestigt. Die Lanze, die ca. 2 m vor dem Fahrzeug ragte, wurde beim langsamen Befahren (ca. 20 km/h) der Strecke vom Fahrer exakt auf den Mittelstreifen positioniert (ca. +/-5 cm). Die Kehrmaschine hat dabei den Vorteil des großen Sicht-

bereiches unmittelbar vor dem Fahrzeug, wodurch eine genaue Positionierung der Lanze überhaupt erst möglich wurde (siehe Abbildung 4-11).



Abbildung 4-11: cm-Vermessungssystem

Die so erhaltenen Daten wurden mit oben beschriebenem Algorithmus zu einer Karte verarbeitet. Der Radius wurde mangels Raddrehzahlsensoren und Gierratensensor an der Kehrmaschine nicht mit aufgezeichnet. Ebenfalls wurde die Spurbreite der Spuren auf dem Messgelände nicht mit der Videobildverarbeitung sondern von Hand vermessen. Die Spurbreite ist auf dem Messgelände konstant. Der Radius wurde aus der sehr genauen Messung mittels CPDGPS rekonstruiert. Die vermessene Bahn ist ca. 6.5 km lang. Es wurden ca. 6300 Punkte aufgezeichnet. Die daraus resultierende Karte besteht aus ca. 250 Punkten.

In Abbildung 4-12 sind die Abstände der einzelnen Messpunkte im Vergleich zu der erstellten Karte dargestellt. Auffällig sind die gleichgerichteten Fehler zwischen 2200 und 3000 bzw. 5200 und 6000. Hier befinden sich die Kurven am Anfang und Ende der Strecke. Die Kartenlinie verläuft immer innerhalb der tatsächlichen Kurvenlinie. Somit wird bei Kurven ein konstanter Fehler erzeugt. Die starken Fehler (ca. 15 cm) am Anfang der Strecke zwischen 0 und 2200 lassen sich wahrscheinlich auf Waldstücke neben der Strecke und dadurch bedingte Multipath-Effekte zurückführen.

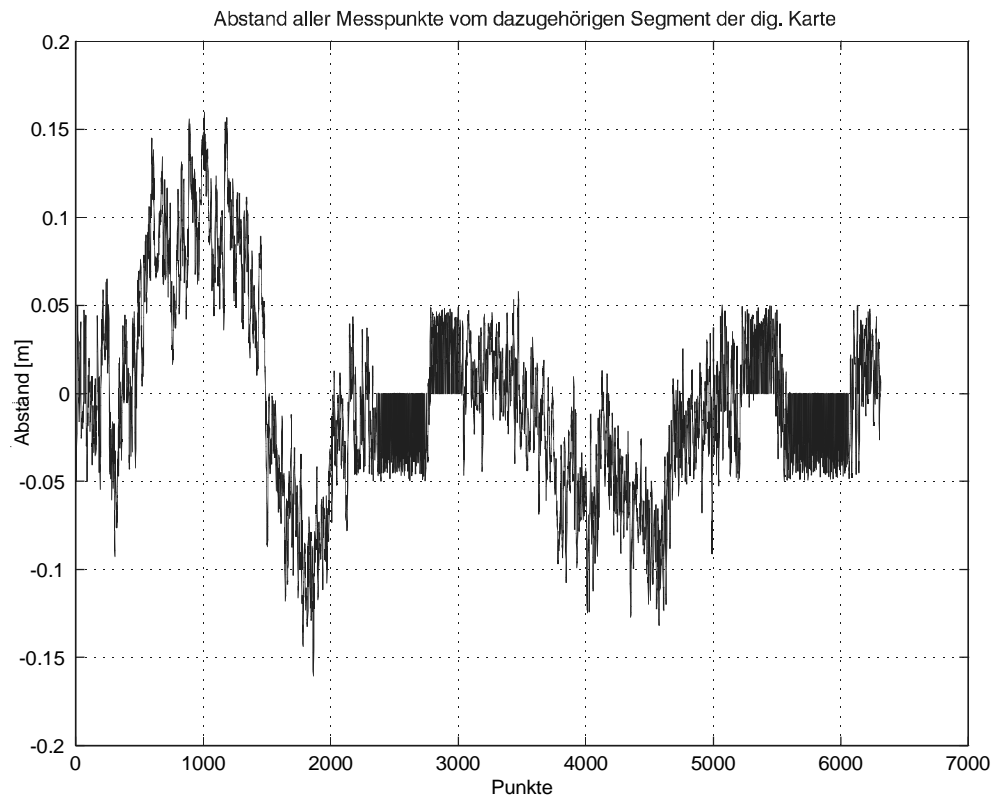


Abbildung 4-12: Kartenfehler der Strecke

Diese Karte wird im Kapitel 5. Anwendungen die Grundlage für die Querregelung darstellen.

4.3. Attribute

Mit Attributen werden alle Eigenschaften einer Straße oder Gegend beschrieben die nicht die Geometrie einer Straße eines Gebietes beschreiben. Attribute werden aber an einem Ort referenziert. Jedes Attribut hat somit Gültigkeit an einem bestimmten Ort bzw. für eine bestimmte Strecke. Im folgenden wird auf wesentliche Attribute eingegangen, die nicht in der heutigen DNK enthalten, die aber erlernt werden können.

4.3.1. Verkehrsschilder

Verkehrsschilderkennung wird bereits in diversen Forschungsprojekten bearbeitet. Die Erkennungsleistung von Videobildverarbeitungssystemen für Verkehrsschilder wird derzeit mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 70 % angegeben. In Kombination mit lernenden Karten könnten sämtliche Schilder erfasst und in digitale Karten eingetragen werden. Durch mehrmaliges Befahren oder Nachbearbeitung in einer Zentrale könnten somit sämtliche Verkehrsschilder in digitale Karten aufgenommen und wieder an die Nutzer verteilt werden. Änderungen müssten nach einer Bestanderfassung auch durch die aufstellenden Ämter nachgetragen werden. Das Prinzip ist wieder gleich. Beim Befahren der Strecke werden die Schilder aufgezeichnet und in die lo-

kale digitale Karte eingetragen. Im folgenden soll die Häufigkeit von Änderungen für einen Streckenabschnitt von ca. 60 km Länge dargestellt werden.

Veränderung von Verkehrsschildern in einem bestimmten Zeitraum:

Verkehrsschilder sind im Prinzip statisch. In der Regel werden Geschwindigkeitsregelungen und andere Einschränkungen durch Verkehrsschilder über einen langen Zeitraum beibehalten. Um einen ersten Eindruck von der Änderungshäufigkeit zu bekommen, wurden für einen Teil des Testgebietes die Änderungen über einen Zeitraum von ca. 1 Jahr mitprotokolliert (siehe Tabelle 4-1). Nach dem initialen Erstellen der zusätzlichen Datenbank wurden die Geschwindigkeitsbeschränkungen und Ortsgrenzen überwacht.

Tabelle 4-1: zeitliche Veränderung von Verkehrsschildern

Zeit	Ort	Art	Grund
Herbst 98	B13 auf einer Länge von ca. 5km	100 km/h auf 80 km/h	Im Winter wurde die Straße durch Frost stark beschädigt. Die Straße wurde im Anschluss nur abgeschliffen und die erlaubte Geschwindigkeit aufgrund dessen reduziert.
Sommer 99	B13 auf einer Länge von ca. 15km	Statt 80km/h auf 60 km/h Reduzierung jetzt nur noch 70 km/h	Ganz offensichtlich wurde von den Behörden ein neuer Beschluss zur Regelung des Verkehrs an entsprechenden Stellen gefasst. Diese Änderung konnte auch an anderen Stellen außerhalb des Testgebietes festgestellt werden.
Herbst 99	Giebing ca. 1 km	Ausweitung einer 50 km/h Zone	Vermutlich auf Drängen von Anwohnern.

Im ganzen sind dies bereits zahlreiche Änderungen. Berücksichtigt sollte jedoch werden, dass die Änderung auf der B13 im Sommer 99 auf einen neuen Beschluss zurückzuführen ist. Durch rechtzeitige Kenntnis dieses Beschlusses hätten die Änderungen in den Datenbanken weitgehend automatisiert eingefügt werden können, indem bei entsprechenden Regelungen die 60 km/h in 70 km/h umgewandelt und die 80 km/h gelöscht würden. Bewertet man diese Änderung nicht, so sind nur ca. 6 km Straße von den Änderungen betroffen.

Trotzdem zeigt dieses Protokoll, dass eine ständige Überwachung bzw. ein ständiger Kontakt mit den entsprechenden Behörden unbedingt anzustreben ist. Deutlich wird auch die Notwendigkeit von Online-Updates für die digitalen Karten direkt in den Fahrzeugen, die diese Informationen nutzen.

4.3.2. Geschwindigkeiten

Vom Nutzer eingestellte Wunschgeschwindigkeiten können vom System erfasst werden. Durch Auswertung, an welchen Punkten eine Veränderung eintritt, kann das

System eine Änderung der Verkehrsregeln vermuten. Wird diese Änderung vom Nutzer an der gleichen Stelle bei mehreren Fahrten vorgenommen, ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass sich an entsprechender Stelle ein Verkehrsschild befindet. Wird die Änderung von einem ganzen Nutzerkollektiv vorgenommen, kann man schon mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit von einem Geschwindigkeitslimit an dieser Stelle ausgehen. Ebenfalls können diese Daten zur Validierung von eventuell erkannten Schildern dienen.

Eine andere Anwendung ist das Wiederabspielen eines gelernten Verhaltens. Der Nutzer lehrt sein Fahrzeug, welche Wunschgeschwindigkeit an welcher Stelle eingestellt werden soll. Beim nächsten Befahren wird diese auf Wunsch vom System automatisch eingestellt. Die Hausstrecke kann so teilautomatisiert werden.

4.3.3. Straßeneigenschaften

Mit Videobildverarbeitung ist es bereits möglich, Spurbreiten zu vermessen. Gleichzeitig wird die Anzahl der Spuren ausgegeben. Anhand der Güte, die von der Videoverarbeitung geliefert wird, kann die Qualität der Information bewertet werden. Die Informationen werden wieder erst Punkten zugeordnet. Da jedoch Attribute wie Spurnzahl und Breite der Spuren in diesem Datenbankmodell nur Segmenten zugeordnet werden können, muss anschließend eine Bewertung der während des Befahrens des Segmentes gesammelten Daten erfolgen. Dabei kommen wieder Kriterien zum Tragen, die anhand einer Wahrscheinlichkeit die Zuordnung vornehmen. Hat z.B. die Videobildverarbeitung bei 80% des Segmentes 3 Spuren erkannt, so wird diese Information für das Segment akzeptiert. Bei einer Änderung der Eigenschaften innerhalb des Segmentes könnte eine Markierung erfolgen, so dass später beim Datenbankhersteller eine Korrektur der Situation erfolgen kann und an dieser Stelle die Segmente geteilt werden können.

4.3.4. Routen

Beim Befahren einer Strecke tritt an jeder Kreuzung dasselbe Problem auf. Das System weiß nichts über die Absichten des Fahrers an einer einige 100 m vorausliegenden Kreuzung. Ist die Strecke schon einmal befahren worden, ist es möglich, die Absichten des Fahrers von der letzten Befahrung einfach für die folgende wieder anzunehmen. Um die Daten noch weiter zu verfeinern, wurde die Uhrzeit und der Wochentag noch hinzugenommen. Der Lernalgorithmus merkt sich dabei beim Überfahren folgende Daten:

- Abbiegevorgang (von Segment x zu Segment y)
- Wochentag
- Uhrzeit

Wochentag und Uhrzeit sind dabei Bitfelder, wo für den entsprechenden Tag bzw. die entsprechende Stunde jeweils ein Bit gesetzt bzw. gelöscht wird. Die Häufigkeit der gleichen Abbiegevorgänge spiegelt sich dabei in veränderten Kosten für den Abbiegevorgang wieder. Je häufiger eine Kreuzung in eine bestimmte Richtung überfahren wird, desto geringer werden die Kosten für den Abbiegevorgang.

4.4. Nachbearbeitung von Karten

Um den Lernerfolg zu kontrollieren und eventuelle Änderungen durchzuführen, benötigt man ein Werkzeug zum Darstellen bzw. Verändern von Geometriedaten und Attributen.

Lernvorgänge können in vielen Situationen automatisch ablaufen. An den Stellen, wo Unsicherheiten auftreten, werden die Daten einfach nicht verändert. D.h. die Daten werden nur dort geändert, wo eindeutige Messsignale vorliegen. Es wird beim Verwerfen eines Segmentes während des Lernvorganges davon ausgegangen, dass es beim nächsten Befahren unter Umständen bessere Signale gibt. Nun kann es jedoch vorkommen, dass eine Umgebungsbedingung dafür verantwortlich ist, dass an einer bestimmten Stelle immer Fehler auftreten. Z.B. ein sehr dichtes Waldstück mit bestimmten Multipathfehlern. Um auch an diesen Stellen die Karte zumindest noch nachträglich verbessern zu können, wird ein Tool zur Kontrolle und zum Verändern der Datenbank notwendig. In dem hier entstandenen Tool „Mapchange“ gibt es die Möglichkeit, sämtliche Geometrieinformationen von bestehenden Punkten zu ändern, neue Punkte hinzuzufügen, Punkte zu löschen. Selbiges ist für alle Landmarks möglich, d.h. sämtliche gelernte Information kann hier dargestellt und verändert werden (siehe Abbildung 4-13).

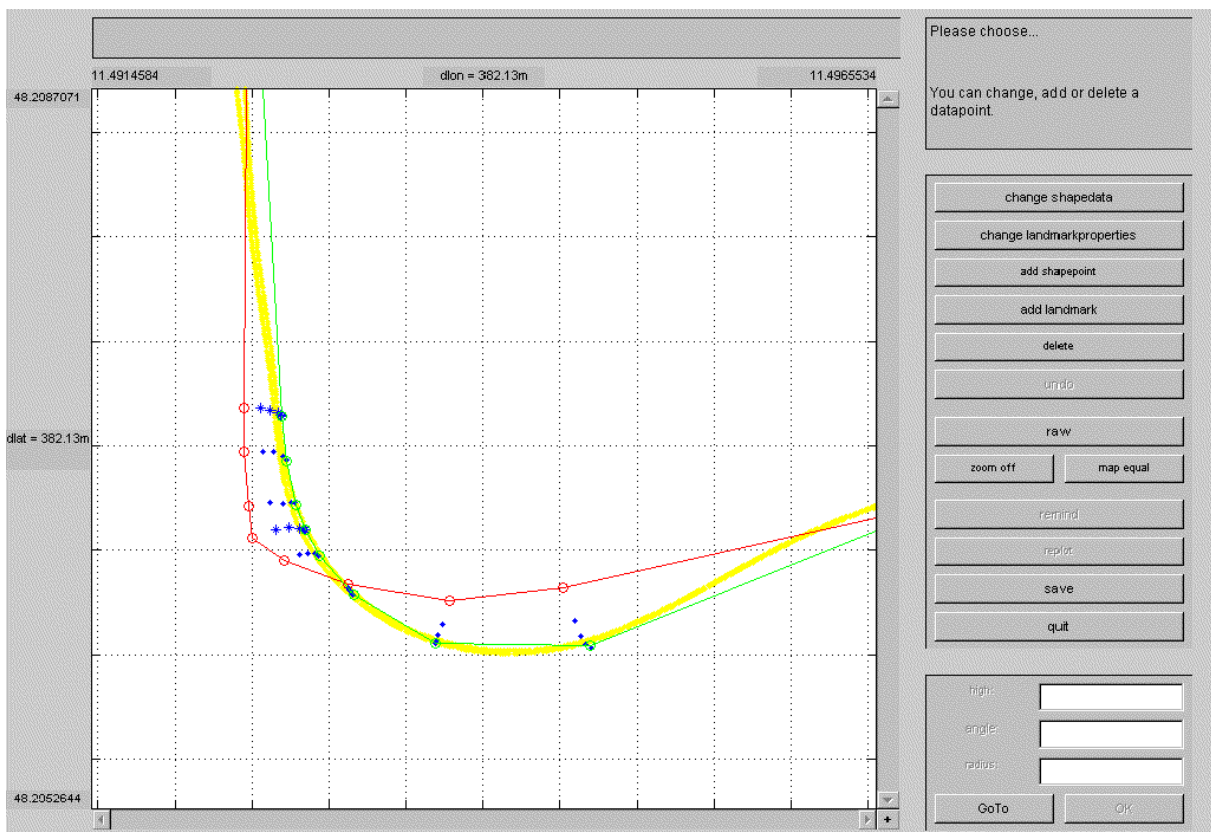


Abbildung 4-13: Nachbearbeitungstool für digitale Karten

Im Zusammenhang mit den automatisierten Lernvorgängen vervollständigt dieses Tool die Kette zum Weg zu perfekten digitalen Karten. Durch Visualisierung der Messungen (Rohdaten) kann der Benutzer hier sämtliche Informationen kontrollieren. Natürlich ist dieses Tool nicht für den Endanwender, den Autofahrer, gedacht,

sondern vielmehr für einen Operator einer Datenbankfirma, der sämtliche Informationen aller an einem Kollektiv beteiligten Informationen zusammennimmt und somit die verbreiteten digitalen Karten verbessert. Es können hier sämtliche Geometrieeigenschaften und Landmarks angezeigt und verändert werden. Im folgenden Bild (siehe Abbildung 4-14) sind z.B. alle Geschwindigkeitsbeschränkungen für ein Stück dargestellt.

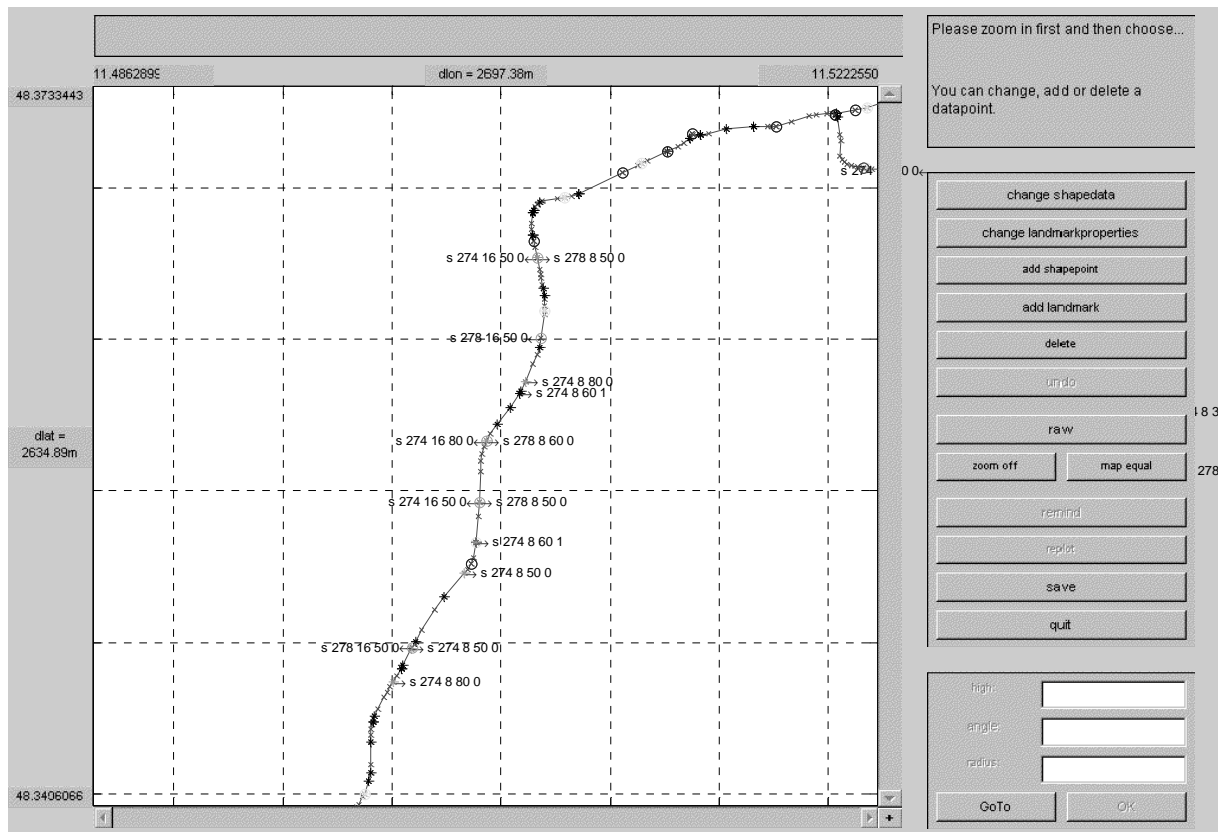


Abbildung 4-14: Landmarks auf einer Versuchsstrecke

D.h. es können hier auch Eintragungen für sämtliche Attribute auf einfache Art und Weise vorgenommen werden.

4.5. Lernen im Kollektiv

Die Qualität der digitalen Karten kann sehr schnell gesteigert werden, wenn die Lernvorgänge nicht nur in den einzelnen Fahrzeugen stattfinden würden. Überträgt das jeweilige Fahrzeug seine gesammelten Daten an eine Zentrale könnte sehr schnell und effizient eine neue verbesserte digitale Karte erstellt werden. Die gesammelten Daten aller bzw. die daraus neu entstandene digitale Karte würde wieder an sämtliche Nutzer über online-Kanäle (z.B. GSM + Internet, DAB usw.) verteilt. Änderungen in digitalen Karten werden somit unmittelbar übertragen, so dass auch Baustellen und ähnlich kurzfristige Änderungen relativ schnell berücksichtigt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur die Daten von z.B. XFCD (eXtended Floating Car Data) auf Tauglichkeit für eine solches Verfahren überprüft. Die entsprechenden Erweiterungen für direkte Online-Übertragungen und einen Server, der

alle Daten der Fahrzeuge sammelt und in die digitale einarbeitet werden in weiterführenden Projekten bereits bearbeitet.

Je nach geforderter Aktualität können die Daten der Fahrzeuge auch nur einmal wöchentlich oder nur bei Inspektionen aus den Fahrzeugen ausgelesen werden. Ein entsprechendes Karten-Update ersetzt dann diese im zusätzlichen Speicher gelerten Daten im Fahrzeug, so dass wieder Speicher für neue Daten frei wird.

4.5.1. eXtended Floating Car Data

Floating Car Data dienen zwar im wesentlichen der Stauerkennung, könnte aber auch gut zum Verbessern der Kartengeometrie benutzt werden. Derzeit werden von FCD nur Positionsdaten mit einem Zeitstempel übertragen. Die Daten sind in dieser Form für den Lernzweck noch wertlos, da die Genauigkeit im Bereich von Standard GPS liegt und keine Information über den aktuellen Fehler in der Messung vorliegt. Für eine Mittelung wäre eine sehr hohe Datenmenge nötig. FCD-Daten werden aber nur mit Messraten von max. ca. 1 min pro Datensatz aufgezeichnet.

Würden jedoch von FCD-Fahrzeugen zusätzlich die Satelliteninformation, über die die Positionslösung berechnet worden ist, übertragen, wäre man in der Lage, durch *Postprocessing* der Daten das Genauigkeitsniveau auf DGPS zu heben. Diese Daten wiederum könnten sehr gut zum Verbessern der Geometrie verwendet werden. Die neuen Daten könnten iterativ in die Datenbank eingearbeitet werden. Die Algorithmen wie oben beschrieben wären hierfür qualifiziert. Zusätzlich könnte man visuell durch einen Mitarbeiter an der Datensammelstation mit einer Kontrollsoftware durch Einblendung von Rohdaten im Hintergrund Fehler finden und korrigieren. Auf diese Weise würde schnell eine sehr genaue Datenbank entstehen.

5. ANWENDUNGEN

Die Datenbankanwendung kann in verschiedensten Assistenzsystemen zusätzliche wertvolle Informationen zur vorausschauenden Konditionierung dieser Systeme liefern. So benötigt SAM (Situations Adaptives AntriebsManagement) Informationen über vorausliegende Geschwindigkeiten bzw. Verkehrsregelungen, um eine verbrauchsoptimierte Beschleunigungsstrategie zu berechnen. ALC (Adaptive Light Control) benötigt Informationen über die Verwindung der Straße und den Straßentyp, um die Leuchtverteilung und Richtung einzustellen. ACC (Active Cruise Control) würde noch zuverlässiger, wenn gefundene Objekte entsprechenden Spuren zugeordnet werden könnten. Auch Objektverluste in Kurven z.B. fallen nicht mehr so stark ins Gewicht, da eine angepasste Geschwindigkeit vom Längsregler bereits eingestellt ist. Die Längsregelung in Kurven ganz allgemein erweitert das Funktionsspektrum bzw. das Anwendungsgebiet von ACC deutlich. HC (Heading Control) kann je nach Ausbaustufe der Datenbank entweder unterstützt oder mit cm-genauen Karten die Funktion komplett über die Datenbank realisiert werden. Diese Anwendungen stellen jeweils unterschiedliche Anforderungen an digitale Karten bzw. die Positionierung. Folgendes Bild (Abbildung 5-1) gibt einen Überblick über verschiedene Anwendungen bzw. Anforderungen, die die Anwendungen an die Datenbank stellen.

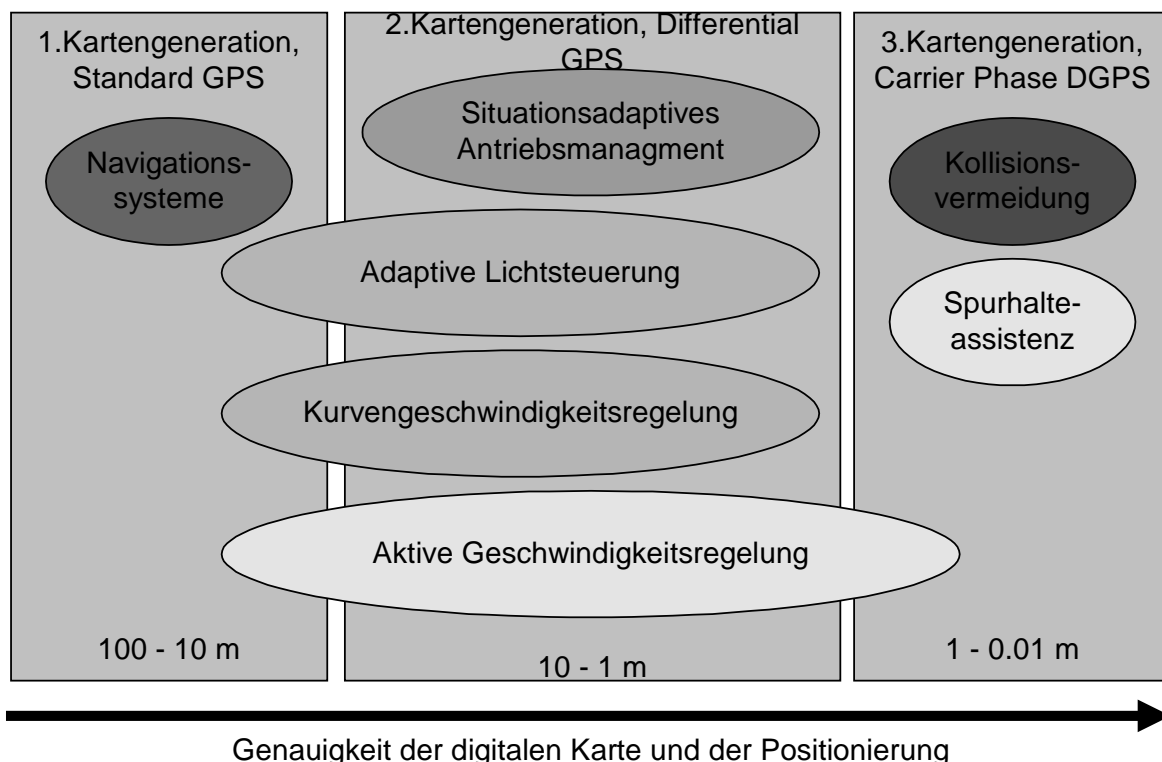


Abbildung 5-1: Anwendungen im Vergleich zur Genauigkeit

Im folgenden sollen besonders die im Umfang dieser Arbeiten erstellten Anwendungen für die Datenbank dargestellt werden. Die beschriebenen Ergebnisse aus diversen Testfahrten stellen erste gesammelte subjektive Erfahrungen mit den Systemen dar, die teilweise in dem Kapitel Bewertung durch mehrere Versuchsfahrer bestätigt werden sollen.

5.1. Längsregelung

Zur Längsregelung ist es erforderlich, alle geschwindigkeitsbeeinflussenden Attribute zusammenzustellen und daraus eine ortsbezogene Geschwindigkeit zu errechnen. Zusätzlich ist eine situationsangepasste Beschleunigungs- bzw. Bremsstrategie zu entwerfen.

Sämtliche im folgenden dargestellten Strategien gelten im wesentlichen für die Überlandfahrt. Bei Stadtfahrten wird die ungehinderte freie Fahrt in mind. 95% der Fälle durch die gesetzlich vorgeschriebene Geschwindigkeit eingeschränkt. Weitere Gründe für Unterschreitung der gesetzlichen Geschwindigkeit sind im wesentlichen temporäre Hindernisse bzw. vorausfahrender Verkehr oder dadurch bedingte unübersichtliche Situationen. Somit sind die häufigsten geschwindigkeitsbeschränkenden Gründe für die Stadt aufgezählt. Da diese Anwendung aber als Beispielanwendung für den Nutzen digitaler Karten in Fahrerassistenzsystemen dienen soll, wurde die Untersuchung auf den Überlandverkehr beschränkt, wo im wesentlichen Kurven und statische Hindernisse die Geschwindigkeit bestimmen. Ebenfalls werden in dieser Beispielanwendung noch keine Ampeln berücksichtigt, obwohl diese schon in der Datenbank vorhanden sind. Zur Auswertung und Integration sind jedoch die Schaltzeiten der Ampeln notwendig. Eine weitere Betrachtung und Fortführung dieser Ereignisse wird unter anderem in SAM [Rieker, 1999] vorgenommen.

Die Hauptursache für Geschwindigkeitsänderungen bei einer Überlandfahrt sind Kurven, Sichtweitereinschränkungen und gesetzlich vorgeschriebene Geschwindigkeiten gefolgt von Straßentypen und deren Beschaffenheit und weiteren Umgebungsbedingungen.

Im folgenden wird auf die Funktionsweise der Datenbankanwendung und der jeweiligen geschwindigkeitsbeeinflussenden Parameter näher eingegangen.

5.1.1. Längsregelungsanwendung

Im Fahrschlauch sind Kurven als Zusammenfassung mehrerer Einzelpunkte kenntlich gemacht. Die Geschwindigkeit für den Kernbereich der Kurve ist als berechnete Größe im Fahrschlauch eingetragen. Der Tracker (siehe Abbildung 5-2) findet diese Geschwindigkeit, um in der Auswahl mehrere Geschwindigkeiten miteinander zu vergleichen. Für jede Kurvengeschwindigkeit wird eine Beschleunigung vom aktuellen Zustand des Fahrzeuges gerechnet. Die Parameter sind die Beschleunigungsstrategie, der Abstand zur Kurve und die Kurvengeschwindigkeit. Die niedrigste gefundene Beschleunigung gehört zu der Kurve, auf die geregelt wird. D.h. nach einer Minimumauswahl wird einfach diese Beschleunigung im Regler eingestellt.

$$(5-1) \quad \begin{aligned} a_{i_Kurve} &= f(v_{ist}, v_{ziel}, l) \\ a &= \min(a_{i_kurve}, i = 1..n) \end{aligned}$$

Das resultierende Verhalten muss dabei nicht unbedingt eine negative Beschleunigung sein, sondern kann auch eine positive, aber geringere als die Maximalbeschleunigung sein. So wird auch eine Beschleunigung zum Erreichen einer höheren Geschwindigkeit im Vorausschaubereich berechnet. Außerdem wird jeweils wieder die niedrigste Beschleunigung gewählt.

Für Bremsbeschleunigungen bzw. positive Beschleunigungen gelten unterschiedliche Vorausschaubereiche, d.h. Bereiche, in denen nach relevanten Kurven gesucht

wird. Beim Bremsen gilt dabei die minimale Bremsbeschleunigung und die aktuelle Geschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitsdifferenz zur Kurve als Parameter, bei Beschleunigungen ein Wert der ungefähr dem menschlichen Vorausschaubereich entspricht.

$$(5-2) \quad l_{Brems} = 0.5 \cdot \frac{v_{ist}^2 - v_{min}^2}{|a_{min_brake}|}$$

$$l_{Accel} = 0.5 \cdot \frac{v_{ist}^2}{|a_{accel}|}$$

Analog zu Kurven werden sämtliche weitere geschwindigkeitsbeeinflussende Ereignisse wie z.B. Geschwindigkeitsbeschränkungen im Fahrschlauch verfolgt und die resultierenden Beschleunigungen entsprechend verglichen. Die geringste Beschleunigung wird unabhängig vom verursachenden Ereignis eingestellt. Folgendes Schaubild (Abbildung 5-2) stellt die Anwendung dar:

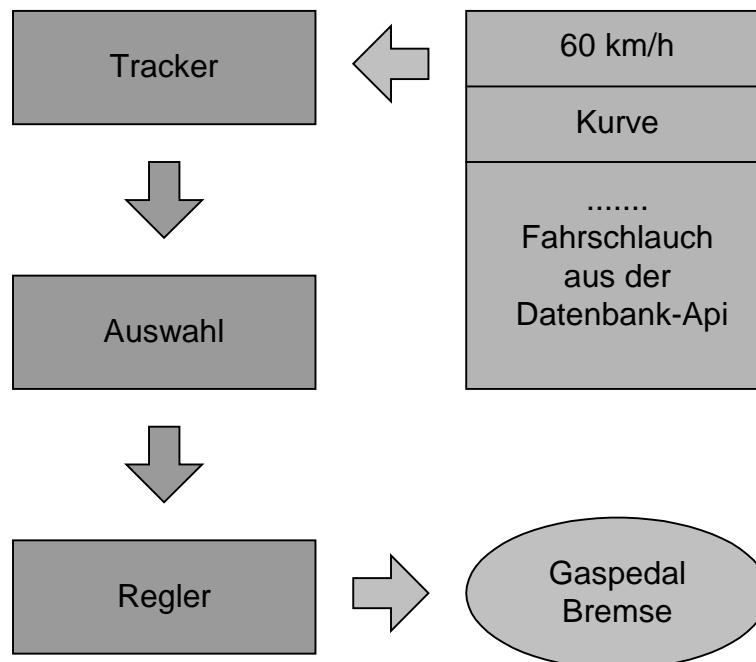


Abbildung 5-2: Prinzipbild von Längsregelsystem

5.1.2. Kurvengeschwindigkeiten

In der Literatur sind mehrere Arbeiten zum Thema Geschwindigkeitsverhalten in Kurven zu finden [Köppel, Bock, 1979]. In [Krebs, Damianoff, 1983] wurden jedoch die meisten erforschten Verfahren verglichen und zu einem Resultierenden zusammengefasst (siehe Abbildung 5-3). Diese Strategie in leicht abgewandelter Form soll hier Anwendung finden. Die Geschwindigkeit, die ein durchschnittlicher Fahrer dabei in einer Kurve fährt, wird im wesentlichen durch den Kurvenradius und den Richtungsänderungswinkel einer Kurve bestimmt.

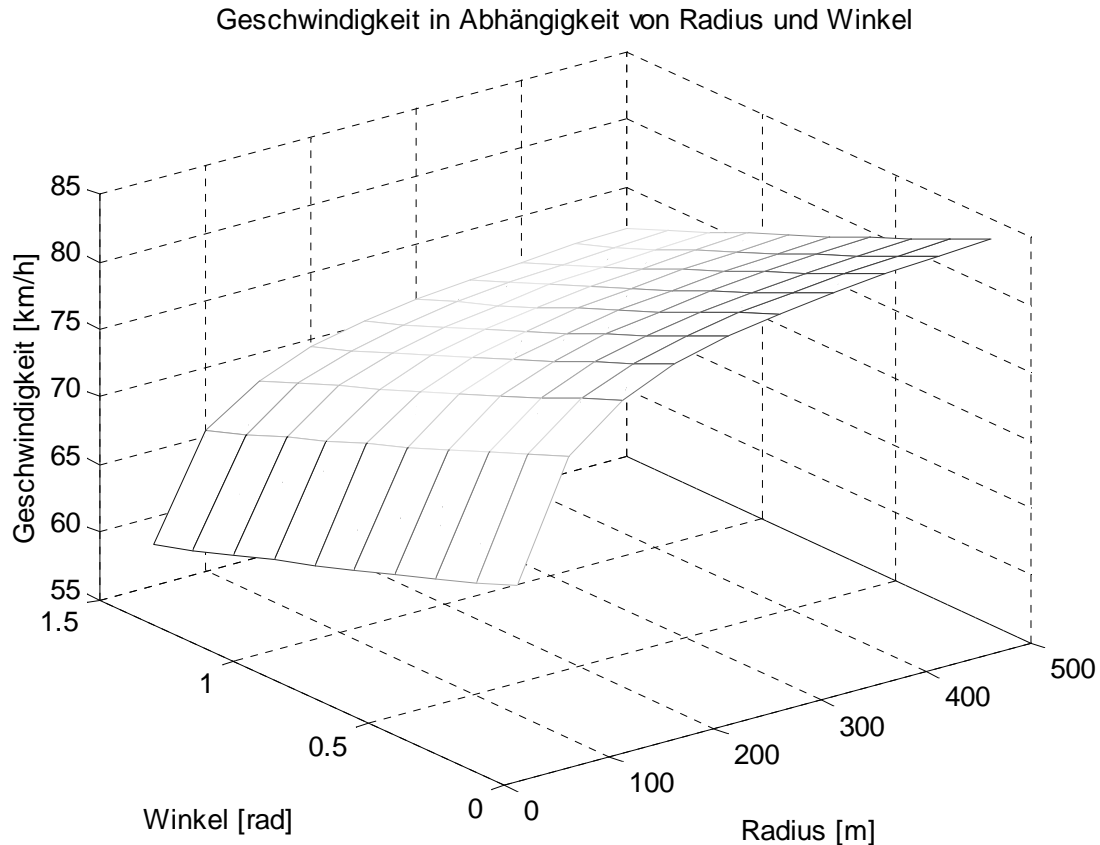


Abbildung 5-3: Kurvengeschwindigkeiten

$$(5-3) \quad v_{\text{kurve}} = 87 \cdot \exp\left(-\frac{12}{r_{\text{kurve}}} - 0.11 \cdot \theta_{\text{kurve}}\right) \quad [\text{km} / \text{h}]$$

In mehreren Testfahrten konnten bereits sehr gute Ergebnisse mit dieser Berechnungsvorschrift erzielt werden. Weitere bisher subjektive Ergebnisse wurden jedoch eingearbeitet. Z.B. bringt der Richtungsänderungswinkel keinen weiteren Einfluss oberhalb von 120 Grad. Bei einer Autobahnausfahrt z.B. entstehen Winkel von bis zu 270 Grad pro Kurve. Ohne diese Beschränkung würde das Fahrzeug in der Ausfahrt beinahe zum Stillstand kommen.

Ebenfalls geht der Kurvenwinkel bei Radien, die größer als 500 m sind, nicht mehr als Parameter in die Berechnung ein, da die Kurve dann nicht mehr als Richtungsänderung wahrgenommen wird. Ab hier erfolgt eine reine Berechnung in Abhängigkeit vom Radius. Daraus ergibt sich folgende Berechnungsvorschrift:

$$(5-4) \quad \theta_{\text{par}} = f_1^0(\text{rad}, 100, 500)$$

$$\infty \text{ m} < r < 500 \text{ m} \Rightarrow v_{\text{kurve}} = v_0 \cdot \exp\left(-\frac{12}{|r|}\right)$$

$$(5-5) \quad 100 \text{ m} < r < 500 \text{ m} \Rightarrow v_{\text{kurve}} = v_0 \cdot \exp\left(-0.11 \cdot \theta_{\text{Kurve}} \cdot \theta_{\text{par}}^2 - \frac{12}{|r|}\right)$$

$$100 \text{ m} < r < 20 \text{ m} \Rightarrow v_{\text{kurve}} = v_0 \cdot \exp\left(-0.06 - 0.11 \cdot \theta + (|r| - 200) / 100\right)$$

mit $v_0 = 26.16 \text{ m/s}$

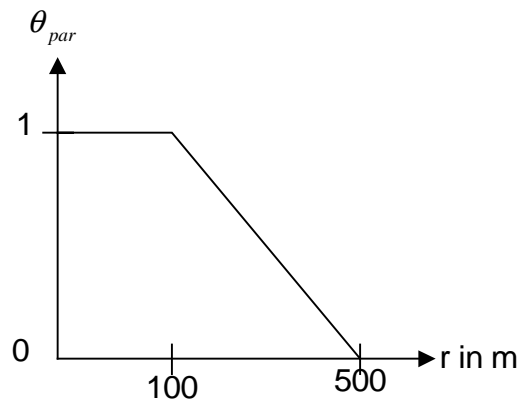


Abbildung 5-4: Zugehörigkeitsfunktion

Folgende Grafik (Abbildung 5-5) stellt die neue Berechnungsvorschrift dar.

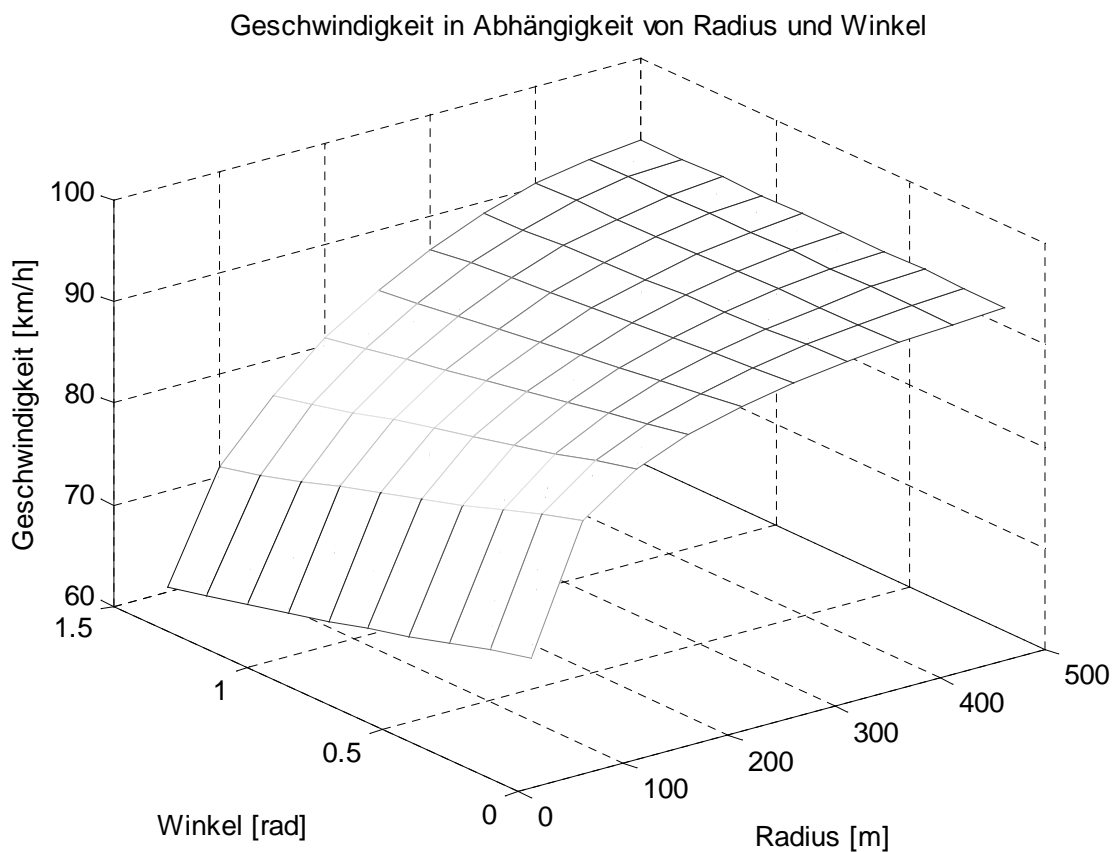


Abbildung 5-5: angepasste Kurvengeschwindigkeiten

Im Vergleich zur ursprünglichen Strategie sinkt der Winkelinfluss quadratisch mit dem Radius. Zwischen 100m und 500m wird der Radius ausgeblendet. Zusätzlich

wurde v_0 erhöht und somit die Strategie etwas besser auf moderne (im Vergleich zum Zeitpunkt der Erstellung der ursprünglichen Arbeit) Fahrwerke angepasst.

Die Querbeschleunigungen zeigen dabei ein typisches Verhalten für Kurvenfahrten. Bei engen Kurven und somit niedrigen Geschwindigkeiten werden wesentlich höhere Querbeschleunigungen in Kauf genommen als bei hohen Geschwindigkeiten.

Aus den Geschwindigkeiten und den dazugehörigen Radien lassen sich folgende Querbeschleunigungen (siehe Abbildung 5-6) berechnen:

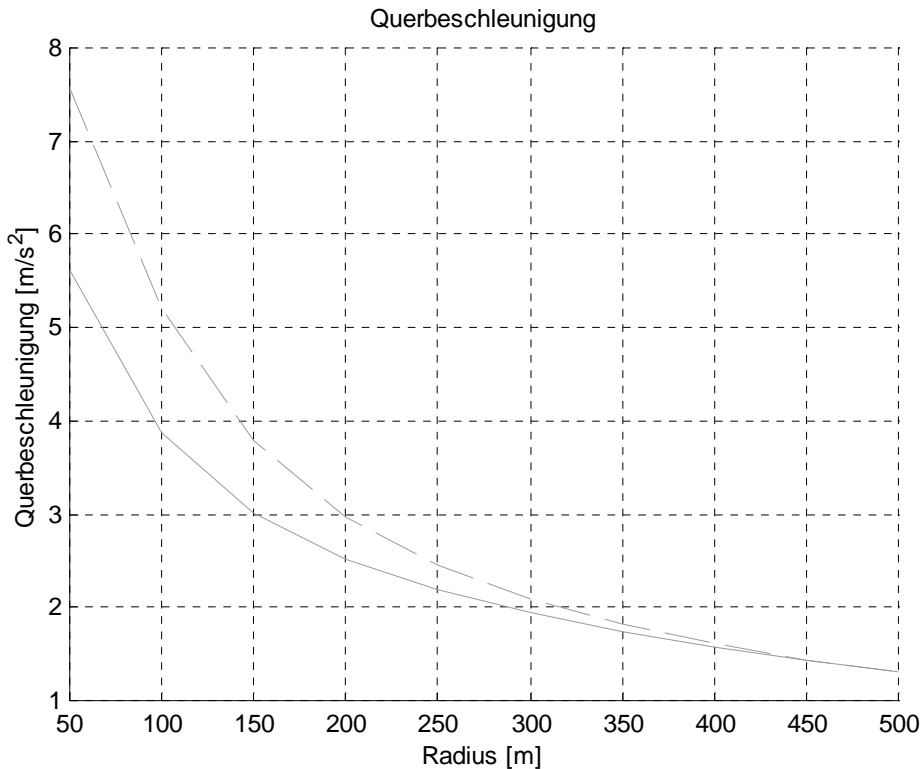


Abbildung 5-6: Querbeschleunigungen

Die gestrichelte Linie stellt die Querbeschleunigungen bei Minimalwinkel, die durchgezogene bei Maximalwinkel dar. Die höheren Querbeschleunigungen bei kleineren Winkel ergeben sich durch die Tatsache, dass die entsprechenden Kurven in der Realität nicht exakt ausgefahren, sondern geschnitten werden. Die dargestellte Querbeschleunigung stellt nur die rein rechnerische und nicht die tatsächlich im Fahrzeug gemessene Querbeschleunigung dar. Somit stimmt die Darstellung für enge Kurven besser, da hier die Kurve nur im Anfangs- und Endbereich geschnitten werden kann, während der Mittelteil weitgehend konstant gefahren wird.

Die empirische Bewertung dieser Kurvenstrategie zeigte, dass diese Formel für eine gut ausgebaute einspurige Überlandstraße mit guten Markierungen und einer Spurbreite von ca. 3 Metern gilt. Um diese Geschwindigkeitsberechnung weiter zu verallgemeinern, wurden weitere Arbeiten aus der Literatur und empirische Ergebnisse aus Testfahrten verwendet. Diese weiterführenden Berechnungen auf Basis der Ausgangsformel wurden aus diversen Testfahrten gewonnen.

Als erstes muss die Geschwindigkeit dem Straßentyp angepasst werden. Die Straßenklassen und die Priorität aus der Datenbank werden dabei wie folgt zugeordnet:

Tabelle 5-1: Durchschnittsgeschwindigkeiten

Geschwindigkeit in km / h	Beschreibung	Straßen-typ	Erwartete Priorität
160	Gut ausgebaute Autobahn (meist 3-spurig, Seitenstreifen, usw.)	1	4
140	Standard Autobahn (meist 2-spurig)	2	4
110	Gut ausgebaute Landstraße (2-spurig)	3	3
100	Standard Landstraße (1-spurig, mit Seitenmarkierungen)	4	2
80	Schlecht ausgebaute Landstraße (1-spurig ohne Seitenmarkierungen)	5	1
55	Stadt	6	2-1
35	Verkehrsberuhigte Zone	7	1
20	Spielstraße	8	1

Die Geschwindigkeiten stellen dabei Durchschnittsgeschwindigkeiten (in leicht angepasster Form dar), wie sie in der DNK beschrieben sind. Diese werden um jeweils eine Klasse erhöht bzw. verringert, wenn der erwartete Rank nicht dem in der Tabelle entspricht. Die Beschreibung ist aus der Digitalisierungsvorschrift abgeleitet und soll eine Vorstellung vom beschriebenen Straßentyp geben. Sie stellt eine Sollvorgabe dar, die im Einzelfall aber vom Digitalisierer den Gegebenheiten angepasst wird. Z.B. kann eine 2-spurige, mit entsprechenden Spurbreiten und einem Seitenstreifen ausgestattete Autobahn auch mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 160 km/h beschrieben werden.

Auf Basis der Durchschnittsgeschwindigkeit wird jetzt ein Skalierungsfaktor für die Kurvengeschwindigkeit berechnet:

$$(5-6) \quad s = 0.5 + (v_{average} / 200)$$

$$v_{Kurve} = s \cdot v_{Kurve}$$

Eine geometrisch vergleichbare Kurve auf einer schlecht ausgebauten Straße, verglichen mit einer Kurve auf einer gut ausgebauten Straße ist von der Querschleunigung, die auf den Fahrer wirkt, exakt identisch. Trotzdem empfindet der Fahrer die Kurve auf einer schlecht ausgebauten Straße als habe er sie schneller durchfahren [Köppel, Bock, 1979]. Durch die Multiplikation mit berechnetem Skalierungsfaktor wird dieser Effekt weitgehend von der Geschwindigkeitsstrategie berücksichtigt.

Die Kurvengeschwindigkeit auf Land- und Stadtstraßen wird zusätzlich noch auf Basis der Durchschnittsgeschwindigkeit nach oben begrenzt.

$$(5-7) \quad v_{kurve} = \min(v_{kurve}, v_{average} \cdot 1.5)$$

Anpassungen an besondere Situationen wie Ecken, S-Kurven müssen noch erfolgen.

Mit der gefundenen Geschwindigkeit muss jetzt noch ein Ort bzw. ein Bereich in der Kurve identifiziert werden, für den diese Geschwindigkeit gültig ist. Ebenfalls in der Literatur beschrieben wird das Prinzip der Drittelspunkte einer Kurve. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Kurve bis zum ersten Drittelpunkt angebremst, bis zum zweiten Drittelpunkt konstant durchfahren und danach wieder aus der Kurve beschleunigt wird (siehe Abbildung 5-7).

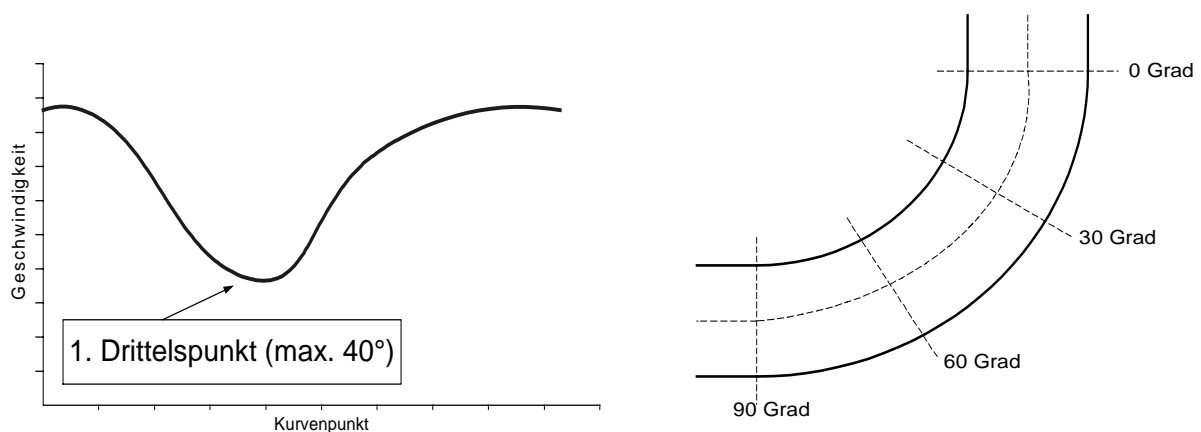


Abbildung 5-7: Brems- bzw. Beschleunigungspunkte in Kurven

Der erste und letzte Drittelpunkt darf dabei nicht mehr als 40 Grad zum jeweiligen Kurvenrand entfernt sein. Anschaulich wird diese Einschränkung z.B. an einem Autobahnkreuz, bei dem eine Ausfahrtspur einen Änderungswinkel von 270 Grad beschreibt. Man merkt sehr schnell, dass man nur bis zu einem bestimmten Punkt in die Kurve eintaucht, einen großen Teil konstant durchfährt und erst am Ende -meist zu früh- wieder beschleunigt. Sowohl die festgestellten 40 Grad als auch die Kurvengeschwindigkeiten dienen dabei als Richtwert und müssen an die Sportlichkeit des Fahrers angepasst werden.

Dieses Prinzip hat sich bei Testfahrten für die Fahrweise als sehr angenehm herausgestellt. Wird davon abgewichen, stellt sich unmittelbar ein unangenehmes Fahrgefühl ein. Hier bestätigen sich die Forderungen an eine genaue Positionierung und die höhere Genauigkeit an die digitale Karte, um diese Punkte einerseits in der digitalen Karte möglichst genau zu berechnen und beim Überfahren den Ort genau zu finden. Je niedriger die Kurvengeschwindigkeit wird, desto wichtiger wird das korrekte Anbremsen und Herausbeschleunigen aus Kurven, während bei schnellen Kurven das Hauptgewicht eher auf einer korrekten Geschwindigkeit liegt. Die eingestellte Geschwindigkeit wird jedoch immer eine Kurvengeschwindigkeit aus Beifahrersicht sein, d.h. eine hundertprozentig an den Fahrer angepasste Geschwindigkeit gibt es nicht. Ohnehin kennt auch der Fahrer selbst nicht die korrekte Geschwindigkeit einer ihm unbekanntem Kurve und wird selbst auch ständig in der Kurve Korrekturen vornehmen müssen. Eine Kurve kann auch immer erst nach Durchfahren beurteilt werden, da dann erst alle Parameter „gefühlte“ wurden. So passiert es oft beim Fahren mit diesem System, dass man sich zu Beginn einer Kurve bzw. Situation unwohl fühlt

und erst nach der Situation die Reaktion versteht. Das System sieht eben schon weiter als der Fahrer, was eben oft Unverständnis zu Beginn einer Aktion durch das System auslöst.

5.1.3. Beschleunigungen

Sind Geschwindigkeit und Ort bekannt, kann eine Beschleunigungsstrategie entworfen werden. Ähnlich wie die Geschwindigkeit ist die Beschleunigungsstrategie der Situation anzupassen. Hier spielt unter anderem der Grund für die Bremsung und Beschleunigung eine Rolle. Eine allgemeine Regel kann wie folgt zusammengefasst werden: Der Fahrer nimmt den Fuß vom Gas (Fahrzeug schleppt), anschließend wird langsam eine meist konstante Bremsung eingeleitet (Parabel), um dann schließlich wieder in einen Schleppevorgang überzugehen. Dies muss nicht unbedingt sinnvoll sein, entspricht aber der erwarteten Reaktion und sollte deshalb zumindest teilweise in einer Beschleunigungsstrategie (siehe

Abbildung 5-8) berücksichtigt sein. Dieses Verhalten wird hauptsächlich durch Zeitfilterung und die Trägheit des Systems erzeugt, so dass durch Einstellen einer konstanten Beschleunigung dieses Verhalten automatisch erreicht wird. Die Beschleunigung ist aber sehr wohl unterschiedlich in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Differenzgeschwindigkeit ($v_{ist} - v_{ziel}$).

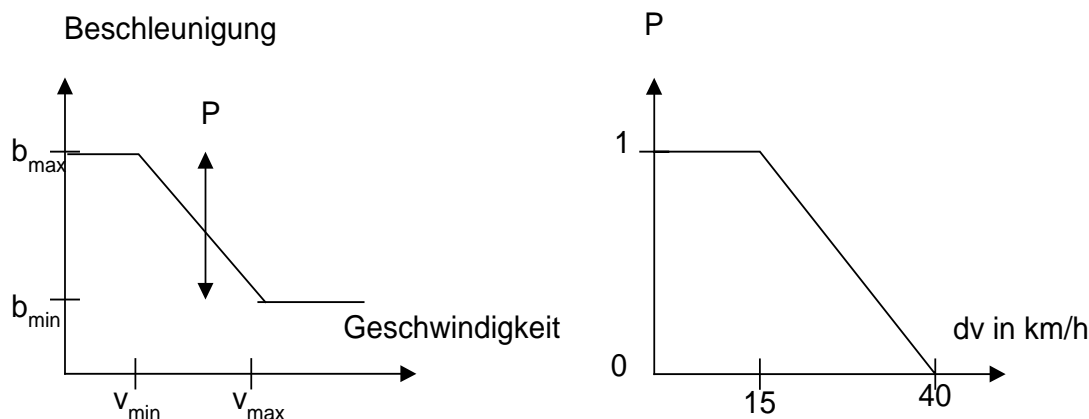


Abbildung 5-8: Beschleunigungskennlinie

Die Bremsbeschleunigung wird bei fallender Geschwindigkeit höher. So wird eine Bremsung von 50 km/h auf 30 km/h deutlich stärker sein als eine Bremsung von 100 km/h auf 80 km/h. Die linke Kennlinie soll diesem Effekt Sorge tragen. Der zweite Parameter ist von der Differenzgeschwindigkeit abhängig. So wird wiederum eine Bremsung von 100 km/h auf 50 km/h deutlich stärker ausfallen als eine Bremsung von 100 km/h auf 80 km/h, die je nach Sichtweite evtl. nur im Schleppe erfolgt (je nach Sportlichkeit des Fahrers). Diese Eigenschaft wird durch Heben bzw. Senken der Bremskennlinie durch P berücksichtigt.

Auf Basis der für eine bestimmte Situation festgelegten Bremskennlinie wird die Entfernung berechnet, ab der die Bremsung eingeleitet werden muss. Ist die Bremsung

einmal eingeleitet, wird die Entfernung ständig überprüft und ein entsprechender Skalierungsfaktor s berechnet, der den Fehler ständig ausgleicht. Dies ist einer Regelung mit Rückführung vergleichbar.

$$(5-8) \quad s = \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \frac{v_{ist}^2 - v_{con}^2}{b_{con}}$$

Eingeleitet wird die Bremsung erstmalig, wenn $s > 1$ wird. Ab dann wird die Bremsung auf jeden Fall beibehalten, bis die berechnete Bremsbeschleunigung unter einen Minimalwert fällt. Der Skalierungsfaktor s wird mit der gerade aktuellen Bremsbeschleunigung aus der Kennlinie multipliziert, so dass die Regelung immer auf die aktuelle Situation reagiert (Abstandsregelung).

5.1.4. Sportlichkeitsparameter

Um das Fahrverhalten an verschiedene Fahrertypen anzupassen, wurden unterschiedliche Parameter veränderlich gestaltet. Sportlichkeit zeigt sich nicht nur im schnelleren Fahren selbst, sondern auch durch höhere positive bzw. negative Beschleunigungen. Der sportliche Fahrer taucht auch tiefer in die Kurve ein und beschleunigt schon früher aus der Kurve heraus. Er beschleunigt auch an Stellen, wo ein eher langsam fahrender Fahrer einfach in die nächste Kurve rollen würde. All diese Parameter sollen auch vom vorliegenden System in moderater Form berücksichtigt werden. Die Sportlichkeit kann dabei vom Fahrer in vier Stufen verändert werden (-2, -1, 0, 1). Bei 0 werden die Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Eintauchpunkte berechnet wie in diesem Kapitel beschrieben. Die Parameter werden mit dem Sportlichkeitsfaktor skaliert.

5.1.5. Weitere geschwindigkeitsbeeinflussende Attribute

Statische Sichtweite:

Sichtweitenbehinderungen sind einer der Hauptgründe für verlangsamtes Fahren. Hier im besonderen die Haltesichtweite. Der Fahrer versucht mit Hilfe einer Risikoabschätzung, eine Geschwindigkeit der aktuellen Haltesichtweite anzupassen. Ebenfalls wird eine unübersichtliche Kurve deutlich langsamer durchfahren als eine geometrisch vergleichbare übersichtliche Kurve. Selbst eine gerade Straße mit einer Kuppe wird mit gemäßiger Geschwindigkeit überfahren.

Das vom Fahrer verwendete „Gesetz“ soll auch hier Anwendung finden. Auf Basis der Haltesichtweite (ein Attribut der zusätzlichen Datenbank) kann eine Maximalgeschwindigkeit berechnet werden.

$$(5-9) \quad v_{\max} = \sqrt{2 \cdot l_{sichtweite} \cdot a_{sichtweite}}$$

$a_{sichtweite}$ ist dabei eine Funktion von der Sichtweite selbst, da der Fahrer bei sehr geringen Sichtweiten ein höheres Risiko und somit eine höhere Bremsbeschleunigung akzeptiert.

$$\begin{aligned}
 l \leq 60 \text{ m} & \Rightarrow a_{\text{sichtweite}} = a_{\text{max}} \\
 (5-10) \quad 60 \text{ m} < l < 200 \text{ m} & \Rightarrow a_{\text{sichtweite}} = a_{\text{min}} + (a_{\text{max}} - a_{\text{min}}) \cdot f_1^0(l, 60, 200) \\
 l \geq 200 \text{ m} & \Rightarrow a_{\text{sichtweite}} = a_{\text{min}}
 \end{aligned}$$

Das entsprechende Geschwindigkeitsprofil wird zusätzlich nach oben bzw. unten begrenzt.

Nicht statische Sichtweite bzw. Wetterbedingungen

Nicht statische Sichtweite ist z.B. Dunkelheit, Regen, Nebel usw. Die entsprechenden Sensoren vorausgesetzt können diese Einschränkungen sich in der Geschwindigkeit bzw. Dynamik widerspiegeln. Regen kann mit dem im Fahrzeug befindlichen Regensensor detektiert werden. Nacht bzw. Dunkelheit werden an dem Zustand der Lichter in Zusammenhang mit der Uhrzeit mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit detektiert.

In verschiedenen Stufen kann dann ähnlich wie bei Sportlichkeitseinstellungen die Gesamtstrategie in seiner Dynamik verändert werden. Wetterbedingungen sind hier ähnlich zu behandeln. Jedoch kann über den Reibwert einer Straße aufgrund von z.B. Eis, Nässe usw. nur spekuliert werden. Anhaltspunkte geben z.B. Jahreszeit, Straßenklasse und Temperatur.

Warnschilder

Warnschilder wie z.B. Kurvenwarnschilder beeinflussen den Fahrer, indem sie ihm eine Gefahr deutlicher bewusst machen [Krebs, Damianoff, 1983]. So zeigt sich eine angenehmere Auslegung des Systems, wenn man dem Fahrer z.B. durch leichten Schlepp sehr frühzeitig vor der entsprechenden Kurve klar macht, dass das System die Kurve erkannt hat und eine entsprechende Aktion geplant ist.

Geschwindigkeitslimits

Auch hier dient der Fahrer als Vorbild fürs System. Die Geschwindigkeit eines 60 km/h Schildes z.B. wird in der Regel erst einige Meter hinter dem Schild adaptiert auf 60 km/h plus einer fahrerabhängigen zusätzlichen Erhöhung (z.B. 10km/h). Beim Aufhebungsschild wird in der Regel bereits deutlich vor dem Schild die Geschwindigkeit wieder erhöht.

Der Fahrer kann auswählen, ob Geschwindigkeitslimits bzw. Ortsgeschwindigkeiten automatisch eingeregelt werden oder nur angezeigt werden. Bei der Anzeige ohne Regelung kann der Fahrer durch Ändern der Wunschgeschwindigkeit seine persönlichen Bedürfnisse quasi einstellen. Das System soll dem Fahrer keine bestimmte Fahrweise aufzwingen, sondern soll ihn in seinen Bedürfnissen nach seinen Vorgaben unterstützen. Auf jeden Fall trägt besonders diese Systemeigenschaft zu einem sehr angenehmen, stressfreien Fahren bei.

5.1.6. Mensch Maschine Interface

Immer wieder wird diskutiert, ob die Fülle an Information den Fahrer überfordert. Deshalb sollten ihm alle Information mit möglichst wenig Anzeigen dargeboten wer-

den. In dieser Arbeit wurde deshalb das bereits bewährte Konzept der BMW Fahrerassistenzsysteme übernommen. Die Geschwindigkeit wird dabei entweder über das aktive Gaspedal oder automatisch eingestellt [Naab, Reichart, 1994]. Das aktive Gaspedal zeigt dem Fahrer dabei in haptischer Form eine Änderung der empfohlenen Geschwindigkeit an. Dabei wird ein im Gaspedal fühlbarer Druckpunkt so verstellt, dass sich eine angepasste Beschleunigung ergibt. Gleichzeitig stellt eine im Gaspedal angebrachte Sensorik fest, ob der Fahrer dem Druck nachgibt oder diesen überdrückt. Bei einem Nachgeben durch den Fahrer kann zusätzlich eine automatische Bremsung durch das System eingeleitet werden. Überdrückt der Fahrer jedoch den Systemvorschlag fährt er quasi frei, als ob das System nicht aktiv wäre. Erst wenn die Vorschläge wieder akzeptiert werden, greift das System aktiv in die Regelung ein. So bleibt der Fahrer jederzeit im Regelkreis und kann seine persönliche Sportlichkeit mit einbringen. In Situationen, in denen sich der Fahrer unsicher ist, verlässt er sich wieder auf das System.

Um die errechnete Lösung für den Fahrer zusätzlich transparenter zu gestalten, wird die initial eingestellte Wunschgeschwindigkeit an der entsprechenden Stelle durch eine grüne LED (bei 140 km/h) im Tacho angezeigt. Gelbe LED's zeigen die errechnete Geschwindigkeit für Kurven bzw. sonstige geschwindigkeitsbeeinflussende Attribute an. Dabei wird der Bereich zwischen der vom System errechneten Sollgeschwindigkeit und der Fahrer-Wunschgeschwindigkeit mit gelben LED's ausgefüllt (siehe Abbildung 5-9:).

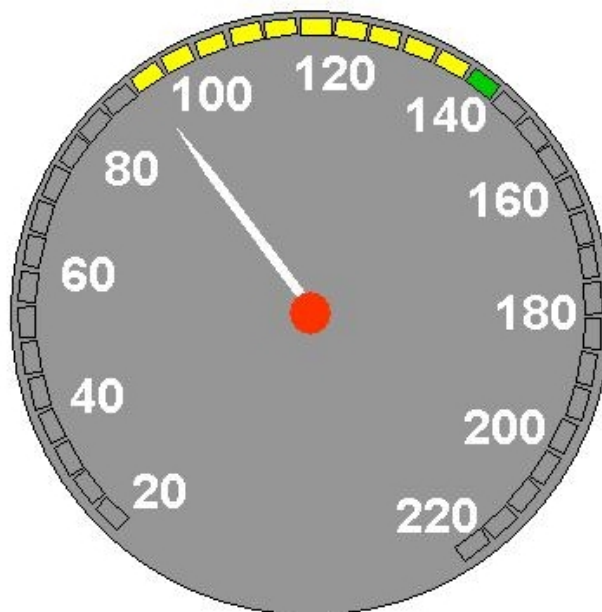


Abbildung 5-9: LED's im Tacho zum Anzeigen von Geschwindigkeiten

Ändert sich die gesetzliche Geschwindigkeitsbegrenzung, wird dies durch die Veränderung der grünen LED im Tacho deutlich. Diese wird dann einfach auf den neuen Geschwindigkeitswert gesetzt. Bei einer automatischen Übernahme der gesetzlichen Geschwindigkeit wird dies auch durch die Veränderung des Druckpunktes im Gaspedal deutlich. Zusätzlich wird dem Fahrer durch eine Anzeige im Kombi dargestellt, ob das System aktiv ist.

5.2. Querregelung (Heading Control)

Heading Control (HC) unterstützt den Fahrer bei seiner Spurhalteaufgabe. Bisher wurden Spurhaltesysteme im wesentlichen auf Basis von Videobildverarbeitung [Naab, 1998], [Dickmanns, 1998] realisiert. Ansätze mit entsprechender Infrastruktur (z.B. magnetische Nägel) wurden ebenfalls getestet. Infrastrukturelle Maßnahmen sind in der Regel jedoch teuer und sehr aufwendig. So setzten sich bisher hauptsächlich autonome Systeme durch, die ohne Infrastruktur bzw. nur mit ohnehin vorhandener auskommen. Die Hauptschwierigkeit bei autonomen Systemen liegt in der exakten Erkennung der vorausliegenden Spur bei verschiedenen Straßen- und Wetterbedingungen.

In der Videobildverarbeitung wird zumeist versucht, die Straßenmarkierungen zu extrahieren und die entsprechenden Eingangsgrößen für die Querregelung aus dieser Information zu berechnen. Mit diesen Eingangsgrößen kann dann über geeignete Regelstrategien [Naab, 1998] ein Eingriff in das Lenkrad erfolgen. Bei BMW wird wieder der Ansatz der Lenkunterstützung in Form von zusätzlichen Lenkkräften verfolgt. Bewegt sich das Fahrzeug in Richtung der Spurberandungen, werden vom Regler Gegenkräfte erzeugt und so der Fahrer mit einer der Situation angemessenen Maßnahme wieder in die Spurmitte zurückgelenkt. Der Fahrer behält dabei die oberste Priorität. Er kann die zusätzliche erzeugte Lenkkräft jederzeit überdrücken.

Um dieses System mit digitalen Karten zu testen, wurde die Videobildverarbeitung abgekoppelt und die Eingangsgrößen mit digitalen Karten und hochgenauem Carrierphase Differential GPS berechnet. CDGPS wurde bereits im Kapitel 2 beschrieben. Die Erzeugung der cm-genauen digitalen Karte erfolgte mit den im Kapitel 4 beschriebenen Algorithmen. Ein aufwendiges Datenbankmanagement war in diesem Fall nicht notwendig, da es sich bei dem Testgelände um einen Rundkurs handelt und somit die Daten einfach in einen Ringpuffer in den Speicher geladen werden. Sämtliche Versuche fanden auf dem Messgelände der BMW Group statt. Untersuchungen zu HC allgemein können in [Naab, 1998] nachgelesen werden.

5.2.1. Eingangsgrößenberechnung

Die Eingangsgrößen des bestehenden HC Reglers sind die Ablage zur Mittellinie einer Spur, der Differenzwinkel zwischen Straßentangente und Fortbewegungsrichtung des Fahrzeuges und der aktuelle Radius der Straße (siehe Abbildung 5-10). Diese Größen können aus der Datenbank berechnet werden.

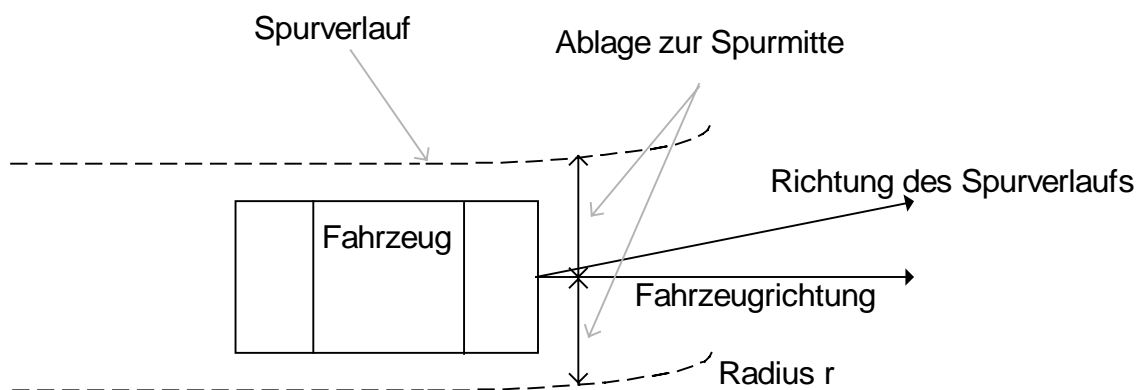


Abbildung 5-10: Eingangsgrößen für Heading Control

Kurvenradien sind schon in der Datenbank enthalten und werden über die virtuellen Punkte zwischen zwei Datenbankpunkten verteilt. Dabei wird der Radius einfach von einem Punkt zum anderen überblendet.

Das Map Matching zur Berechnung der aktuellen Position erfolgt wie im Kapitel Fahrzeugpositionierung beschrieben. Die Parameter für die Kalmanfilterung sind dabei jedoch an die wesentlich höhere Genauigkeit des verwendeten GPS-Systems anzupassen. Das vorhandene Map Matching berechnet jeweils die Ablage der aktuellen Position zur digitalen Karte bzw. ihrer gedachten Fortführung zwischen zwei Punkten. Für die Genauigkeitsanforderungen von HC ist es hier nicht mehr ausreichend, den Radius und damit den veränderten Abstand zur Karte zu vernachlässigen. Es würde eine unkomfortable, roboterähnlich abgehackte Bewegung des Lenkrades erfolgen, die den verwendeten Regler zum Abschalten aus Sicherheitsgründen bewegen würde.

Die durch die Krümmung veränderte Ablage h_{err} muss nachträglich korrigiert werden. Ebenso der veränderte Richtungswinkel ψ_{err} der sich durch Krümmung ergibt. Eine Alternative zu dieser Fehlerrechnung läge in der Erhöhung der Punktzahl, was jedoch die Verarbeitungsgeschwindigkeit und auch die Speicherkapazität deutlich stärker belasten würde.

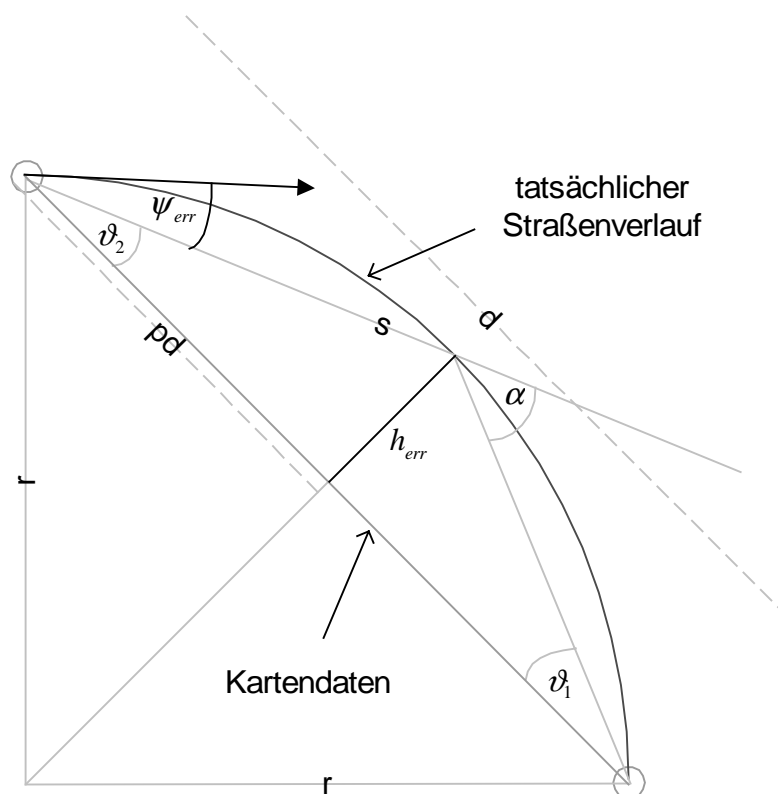


Abbildung 5-11: Krümmung über zwei Kartenpunkten

Die dunkelgraue gerade Linie zwischen dem Anfangs- und Endpunkt stellt die Kartendaten dar. Die schwarze gekrümmte Linie den tatsächlichen Straßenverlauf. Die Fehler werden dabei wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{d - pd}{pd} & \alpha &= \arcsin\left(\frac{0.5 \cdot d}{r}\right) \\
 \vartheta_1 &= \frac{\alpha}{1 + v} & \vartheta_2 &= \alpha - \vartheta_1 \\
 (5-11) \quad h_{err} &= (d - pd) \cdot \tan(\vartheta_1) \\
 s &= \frac{pd}{\cos(\vartheta_2)} \\
 \psi_{err} &= 2 \cdot \arcsin\left(\frac{0.5 \cdot s}{r}\right) - \alpha
 \end{aligned}$$

Die Ablage muss noch auf die Spurmitte und der Winkelfehler auf Fahrzeugwinkel umgerechnet werden. Zur Umrechnung werden der Fahrzeugwinkel aus dem Kalmanfilter sowie der Kartenwinkel und der Abstand von der Messung zur Karte aus dem Matchingprozess verwendet.

$$\begin{aligned}
 (5-12) \quad d\theta &= \theta_{Karte} + \psi_{err} - \theta_{Fahrzeug} \\
 d_{Spur} &= b_{Straße} - (d_{match} + h_{err})
 \end{aligned}$$

θ_{Karte} entspricht dabei dem absoluten Winkel des Straßenstückes bezogen auf Nord, $\theta_{Fahrzeug}$ dem absoluten Winkel des Fahrzeuges bezogen auf Nord. Die Ablage d_{Spur} bezieht sich auf eine einspurige Straße mit der Spurbreite von $b_{Straße}$.

Die so errechneten Werte werden einfach dem vorhandenen Regler als Eingangsgrößen angeboten. Sämtliche Strategien und Untersuchungen des alten Reglers gelten weiter.

Besonders positiv bei einer Steuerung über GPS ist anzumerken, dass die Steuerung weder von Witterungsbedingungen noch von nicht vorhandenen Straßenmarkierungen beeinflusst wird. HC würde also auch auf einer verschneiten Straße oder bei sehr starkem Regen funktionieren, also in Situationen, in denen selbst der Autofahrer nur noch schwer die Berandungen und somit seine Spur erkennen kann. Jedoch kann der Empfang von GPS wiederum durch hohe Gebäude und Multipath stark beeinflusst werden. Also wird sich letztlich eine Kombination beider Verfahren mit Hilfe einer geeigneten Sensorfusion als bester Weg herausstellen.

5.3. ALC (Adaptive Light Control)

ALC bewirkt eine bessere Ausleuchtung von Kurvensituationen. Schon in früheren Arbeiten wurden die Frontscheinwerfer eines Fahrzeuges an die Lenkung gekoppelt (Citroen). Die Ausleuchtung der Kurven erfolgte jedoch systembedingt immer erst, wenn man sich bereits in der Kurve befindet. Heute verfolgt man im wesentlichen Ansätze, das Kurvenlicht (siehe Abbildung 5-12) über die Fahrdynamik und entsprechende Modelle zu steuern [Löwenau, 1998].



Abbildung 5-12: Vergleich der Ausleuchtung mit (links) und ohne (rechts) ALC

Die Steuerung ist damit zwar stabiler geworden, die Kurve kann aber trotzdem erst nach Eintritt erkannt und ausgeleuchtet werden. Mit digitalen Karten kann eine frühzeitige Konditionierung der Scheinwerfer erfolgen. So ist es möglich, eine Kurve bereits vor der ersten Lenkbewegung auszuleuchten. Probleme bei der reinen Fahrdynamiksteuerung stellen auch S-Kurven dar, da sich hier nicht nur eine späte, sondern auch falsche Ausleuchtung der Kurve ergibt. Dies führt in diesem Fall zu einer schlechteren Ausleuchtung als bei unbeweglichen Scheinwerfern und ist somit für den Fahrer ungewohnt. Mit Hilfe digitaler Karten können diese Situationen erkannt werden und so die Steuerung exakt nach dem Straßenverlauf erfolgen. Die Fahrdynamik kann aber weiterhin bei qualitativ schlechten Karten zur Verbesserung verwendet werden.

Dieses System wurde im wesentlichen zum Nachweis des Nutzens von digitalen Karten für ALC aufgebaut. Weitere Untersuchungen (siehe [Löwenau, 1998]) wurden nicht angestellt und würden auch den Rahmen dieser Arbeit sprengen. In den allgemeinen Gedanken sollen jedoch die gesammelten Erfahrungen bei den Testfahrten beschrieben werden, die somit als subjektiv betrachtet werden müssen.

5.3.1. Steuerung über Kartendaten

In dieser Arbeit wurde die reine Bahnsteuerung auf qualitativ guten digitalen Karten verwirklicht. In einer Vorausschau von mindestens 40 m plus 2s bei aktueller Geschwindigkeit wird der Kartenwinkel berechnet. Die Entfernung beruht auf der Annahme, dass der Fahrer auch weiter entfernte Ziele bei höherer Geschwindigkeit ansteuert. Der Maximalwert wurde auf 80m begrenzt und ergibt sich im wesentlichen aus der Leuchtweite der Scheinwerfer.

$$(5-13) \quad s_{ALC} = 40 + 2 \cdot v$$

Nun wird der Punkt auf der Karte gesucht, der in entsprechender Entfernung vor dem Fahrzeug liegt. Der Winkel zwischen aktueller Straßenrichtung und dem Vektor vom Fahrzeug zu dem gefundenen Punkt wird berechnet.

Er kann nach Maximalbegrenzung auf den physikalisch maximal möglichen Winkel der Scheinwerfer direkt an die Scheinwerfer übermittelt werden. Eine Tiefpass-Filterung mit kurzer Zeit von ca. 1.0s wird zum Ausgleich von kleinen Kartenfehlern überlagert.

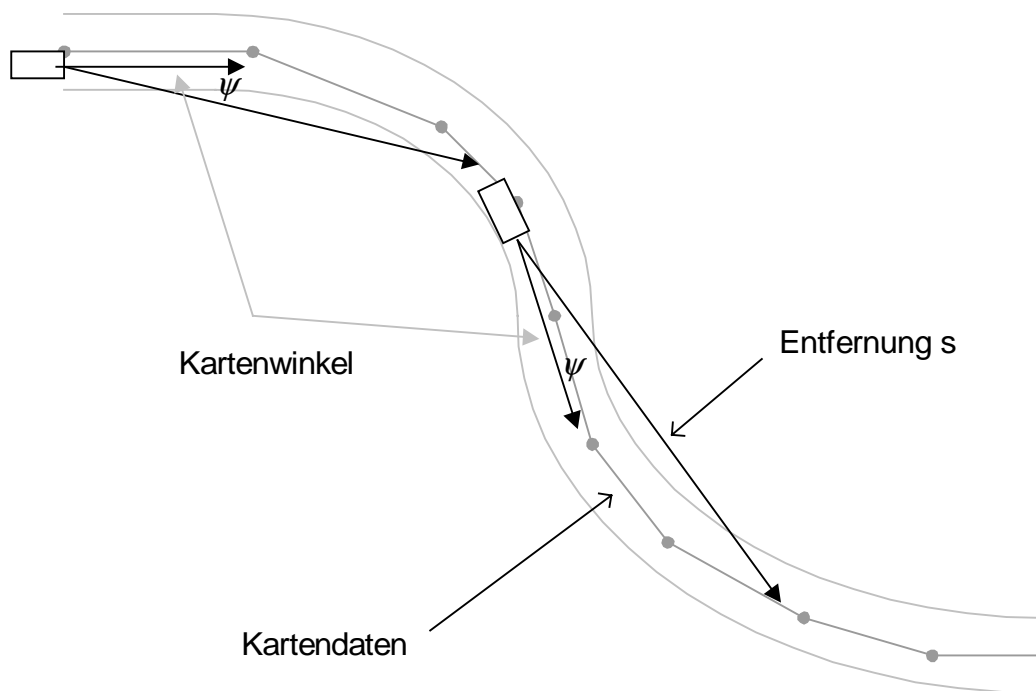


Abbildung 5-13: Winkel zwischen Fahrzeug und Straße

In den Kartendaten (dunkelgraue gepunktete Linie) wird soweit voraus gelaufen, bis die Vorausschaudistanz s erreicht ist (siehe Abbildung 5-13). Dies ist zwar nicht ganz korrekt, weil sich die Vorausschau auf eine Leuchtentfernung bezieht. Leuchtentfernung krümmen sich aber typischerweise nicht, sondern werden auf einer Geraden angegeben. Durch das „Vorauslaufen“ in der Karte folgt man jedoch der Krümmung. Der daraus resultierende Fehler fällt aber bei einem maximalen Drehwinkel von 20 Grad und der ohnehin weiten Ausleuchtung durch die Scheinwerfer nicht weiter ins Gewicht. Ist eine Distanz gefunden, wird an der entsprechenden Stelle ein Punkt erzeugt. Mit Hilfe dieses Punktes und dem Ausgangspunkt kann jetzt der absolute Winkel dieser Strecke errechnet und mit dem Kartenwinkel des Anfangspunktes verglichen werden.

$$\begin{aligned}
 d_y &= \lambda_{\text{Startpunkt}} - \lambda_{\text{Endpunkt}} \\
 d_x &= (\varphi_{\text{Startpunkt}} - \varphi_{\text{Endpunkt}}) \cdot \cos(\lambda_{\text{Startpunkt}}) \\
 (5-14) \quad d &= \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \\
 \psi_{\text{ALC}} &= \theta_{\text{Karte_Startpunkt}} - \arccos\left(\frac{d_x}{d}\right)
 \end{aligned}$$

Der relative Winkel zwischen Fahrzeug und Straße am Startpunkt wird hierbei nicht berücksichtigt, ist aber aufgrund der ohnehin sehr breiten Ausleuchtung durch die Scheinwerfer und der höheren Geschwindigkeit im Überlandbereich vernachlässigbar.

5.3.2. Steuerung über Kartendaten und Fahrdynamik

Bei qualitativ schlechteren Kartendaten (Navigationskarten) kann die Steuerung über das Zusammenspiel von Lenkwinkel und Kartendaten gesteuert werden. Die Kartendaten können auch bei schlechter Qualität Aussagen über Kurvenrichtung und ungefähren Kurvenradius machen. So kann der Lichtwinkel schon vorkonditioniert werden, indem die Scheinwerfer vor dem Eintritt in die Kurve in Kurvenrichtung bewegt werden. Wird in der Kurve ein signifikanter Lenkwinkel gemessen, übernimmt dieser die exakte Steuerung in der Kurve, während die digitale Karte beim Kurvenausgang die Scheinwerfer schon wieder leicht in die Kartenrichtung vorkonditioniert, obwohl z.B. der Lenkwinkel noch Vollausschlag vorgibt. S-Kurven können auch schon in qualitativ weniger guten Karten erkannt werden. Auch wenn der Radius in diesem Fall nur sehr ungenau berechnet werden kann, da die S-Kurve in der Karte eventuell nur aus zwei Punkten besteht, kann dieses Vorwissen der Fahrdynamiksteuerung zur Vorkonditionierung dienen.

5.3.3. Allgemeines zum System

Heutige digitale Karten lassen schon weitgehend zuverlässige Aussagen über Straßentyp, Stadt, Land usw. zu. So kann die ALC-Strategie schon an diesen Daten parametrisiert werden. Die zur Verfügung stehenden Scheinwerfer drehen dabei nur das Abblendlicht. Das Fernlicht leuchtet immer gerade. Eine Auswertung über den Nutzungsgrad von Fern- zu Abblendlicht bei Überlandfahrten auf vorwiegend Landstraßen könnte Auskunft über den Nutzen des Systems für den Anwender geben. Bei Stadtfahrten bzw. Autobahnfahrten ist in der Regel die Krümmung sehr gering oder die Straßen sind ohnehin beleuchtet. Auch andere Verkehrsteilnehmer könnten einen Nutzen aus dem System ziehen. Gerade in Rechtskurven wird entgegenkommender Verkehr geblendet. Werden die Scheinwerfer jedoch in die Kurve gedreht, kann dies vermieden werden. Allerdings entsteht dafür ein erhöhtes Blendpotential bei Linkskurven, da hier natürlich die Scheinwerfer die Kurve deutlicher ausleuchten. Verschiedene Leuchtstrategien für die Ausleuchtung vor dem Fahrzeug könnten eine interessante Variante darstellen. So wäre eine kontinuierliche Überblendung von Abblend- zu Fernlicht in Abhängigkeit der Kurvenlage denkbar. In Kombination mit einer Fernlicht-Abschaltautomatik könnte dem Fahrer hier eine lästige Aufgabe bei Nachtfahrten abgenommen werden.

Inwiefern die gleichmäßige Helligkeit in Blickrichtung sich positiv auf den Ermüdungsgrad des Fahrer auswirkt, wäre eine weitere interessante Betrachtungsmöglichkeit von Kurvenlicht. Bei gerade leuchtenden Scheinwerfern wechselt ständig der Beleuchtungsgrad in Blickrichtung zwischen Hell und Dunkel. Dies führt zu einer zusätzlichen Ermüdung ähnlich wie z.B. bei Diavorträgen.

5.4. Weitere Anwendungen

5.4.1. SAM (Situations Adaptive AntriebsManagement)

Durch Analyse und Beurteilung aller im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Informationen wird in diesem Projekt versucht, eine Kraftstoffverbrauch senkende und somit auch emissionsarme Strategie zu entwickeln. SAM greift dabei in den Antriebsstrang, die Drosselklappe und die Bremsen ein, um die Fahrstrategie auf die aktuelle Verkehrssituation einzustellen. Digitale Karten stellen dabei die Basis für das System dar. Über den Ort von Geschwindigkeitsbeschränkungen, elektronische Verkehrszeichen, Ampeln, Kreuzungen usw. werden die Parameter für die Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungsregelung gefunden.

Gerade der Bremsvorgang birgt große Energiesparpotentiale in sich. Sehr viel Energie wird hier in der Regel in Wärme umgewandelt. Durch vorausschauenderes Fahren kann die Geschwindigkeitsverringerung durch Ausrollen bzw. eine Schubabschaltung optimiert werden. Im folgenden Beispiel wird ein konventionelles Fahrzeug mit einem mit SAM ausgerüsteten Fahrzeug verglichen. Beide Fahrzeuge bewegen sich mit 100 km/h auf eine Ortschaft zu. Der Fahrer kann das Ortschaftschild ca. 200m vorher erkennen, nimmt dann den Fuß vom Gas und bremst schließlich um die geforderte Geschwindigkeit von 50 km/h am Ortschaftschild zu erreichen. Folgende Abbildung 5-14 beschreibt die Situation und stellt den Kraftstoffverbrauch während der Aktion mit und ohne SAM-Strategie dar.

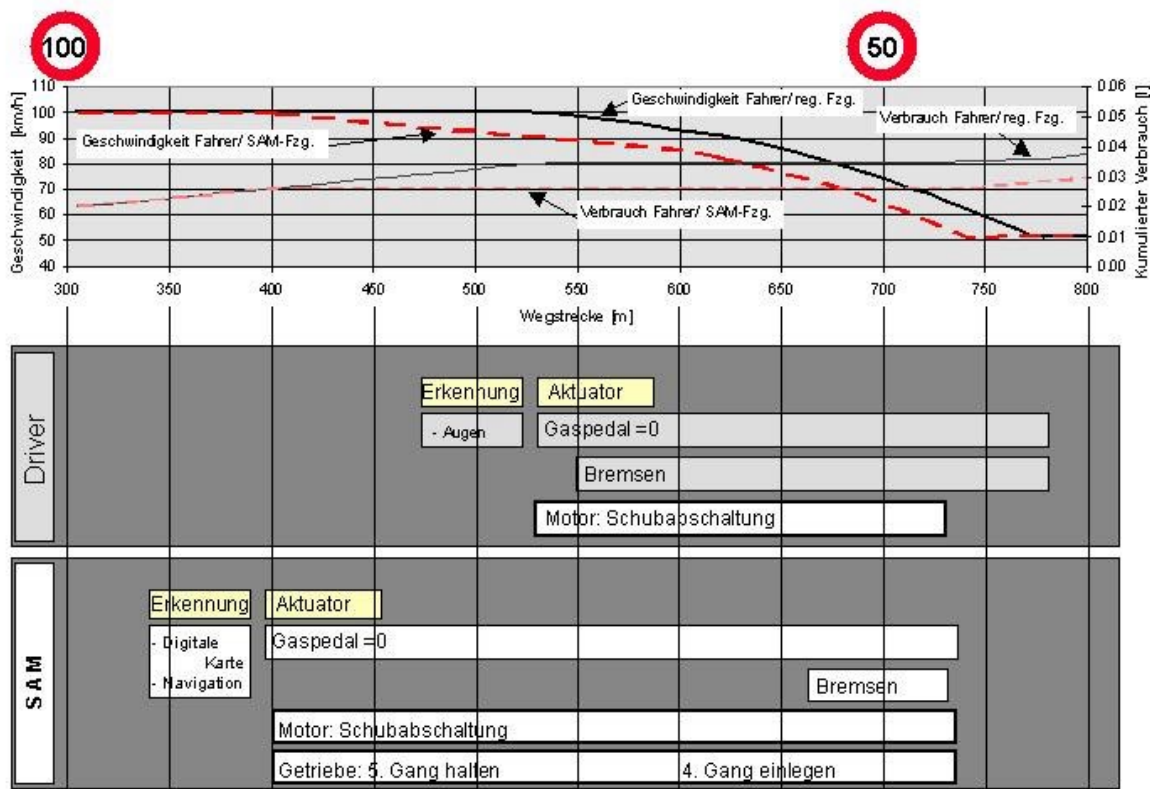


Abbildung 5-14: Annäherung an eine Geschwindigkeitsbeschränkung

Das System kann deutlich weiter vorausschauen als der Mensch. Somit ist eine rechtzeitige und ökonomische Reaktion auf Geschwindigkeitsänderungen möglich. SAM berechnet dabei den optimalen Zeitpunkt für eine Schubabschaltung und stellt diese über das aktive Gaspedal ein. Der Fahrer kann diese Vorgabe jederzeit übersteuern, indem er den Druckpunkt im Gaspedal einfach überdrückt.

Auf dem ca. 500 m langen Vergleichsstück wurde die Geschwindigkeit nur einige Prozent verringert, dabei jedoch eine Kraftstoffeinsparung von ca. 16 % erzielt. D.h. durch nur geringe Änderungen in der Geschwindigkeit und einen ausreichenden Vorausschaubereich kann der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen eines Fahrzeuges deutlich verringert werden. Die dabei nur geringfügige Änderung der Geschwindigkeit ist dazu im Vergleich nur ein geringer Komfortverlust, der für den großen Gewinn in Kauf genommen werden kann.

Versuche mit dem in dieser Arbeit beschriebenen Datenbanksystem haben ergeben, dass eine typische SAM-Situation ca. alle 400m auf einer normalen Strecke auftritt. Auf einer Strecke von ca. 16 km zeigte sich eine Verbrauchsreduzierung mit SAM von ca. 14.7%. Das verwendete Fahrzeug hatte einen Durchschnittsverbrauch von 11 l / 100km. Die normale Fahrzeit der Strecke betrug ohne SAM ca. 20 min, mit SAM nur 36 sec länger.

Die Integration von SAM mit anderen Fahrerassistenzsystemen erfolgt in naher Zukunft. So kann das volle Spektrum der Assistenz auf Wunsch vom Fahrer abgerufen werden. Durch entsprechende Schalter kann dabei eine verbrauchsoptimierte oder auch sportliche Variante gewählt werden. Im Rahmen der fortwährenden Verringerung von CO₂-Emission eine durchaus gangbare Variante.

5.4.2. ACC (Active Cruise Control)

Das bereits in Serie befindliche System ACC erweitert die bereits bekannte Tempomatfunktion im Fahrzeug. ACC-Systeme reduzieren die im Tempomat eingestellte Geschwindigkeit aufgrund eines Hindernisses vor dem Fahrzeug, d.h. in der Regel ein vorausfahrender langsamerer Verkehrsteilnehmer. Die Geschwindigkeit wird wieder erhöht, wenn der langsamere Teilnehmer das Sichtfeld des Radarsensors bzw. den vorausberechneten Fahrweg des eigenen Fahrzeuges wieder verlässt. Der Vordermann wechselt z.B. die Spur von links nach rechts. ACC reagiert mit der Erhöhung der Geschwindigkeit bis zur im Tempomat eingestellten Geschwindigkeit. Der Fahrweg wird auf Basis der aktuellen Fahrdynamik berechnet. Befindet sich das vorausfahrende Fahrzeug gerade in einer S-Kurve kann es z.B. zu Fehlzuordnungen kommen.

Abbildung 5-15: zeigt eine typische ACC-Situation, in der ohne digitale Karte eventuell eine Fehlentscheidung getroffen würde, da heutige ACC-Systeme eine Spurprädiktion nur an der aktuellen Eigendynamik des eigenen Fahrzeuges vornehmen und somit keinerlei Umgebungsinformation zum Straßenverlauf besitzen.

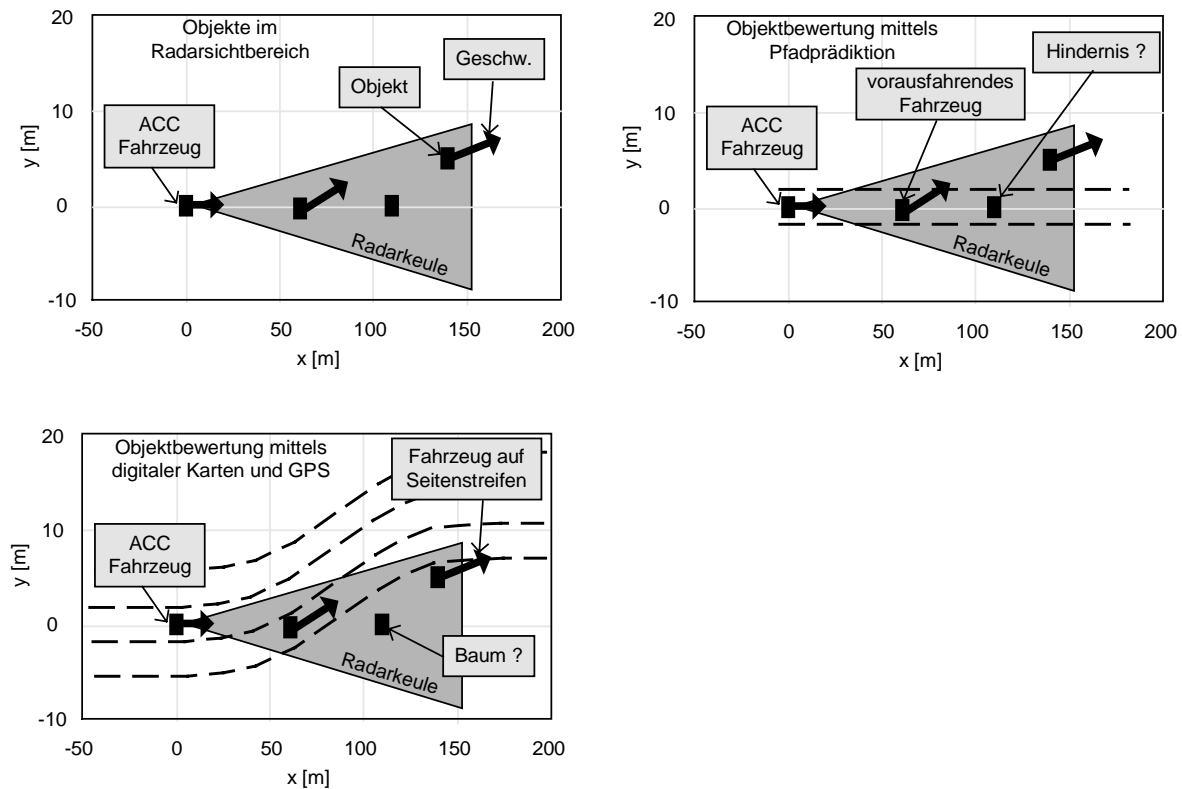


Abbildung 5-15: Pfadprädiktion mit bzw. ohne digitale Karten

Genau hier liegen die Möglichkeiten, mittels der DNK diese Situationen zu erkennen und entsprechend zu reagieren. Bereits mit heutigen Navigationskarten könnten Situationen wie Ausfahrts Spuren erkannt und eine Konditionierung von Beschleunigungsstrategien in Abhängigkeit des Straßentypes und einer Ortskennzeichnung festgelegt werden. In der Erweiterung der digitalen Karten wird dann sogar eine Spurzuordnung des vorausfahrenden und des eigenen Fahrzeuges möglich. So würden relevante Objekte von nicht relevanten getrennt und eine eindeutige Regelung möglich gemacht. Aus dem Vorhandensein einer weiteren Spur könnte dann der Überholwunsch des Fahrers abgeleitet werden und weitere Assistenzmöglichkeiten zum Überholvorgang eingeleitet werden.

6. BEWERTUNG

Die erstellte Beispielanwendung zur Längsregelung von Fahrzeugen soll durch eine Untersuchung auf ihre Eignung getestet werden. Im weiteren wird diese Anwendung mit NavSpeed bezeichnet. Da diese Anwendung ein neues Gebiet in der Fahrerassistenz erschließt, kann die Gebrauchstauglichkeit des Systems nur bedingt anhand anderer Assistenzsysteme zur Längsführung (z.B. ACC) beurteilt werden. Um ein klares Bild über die Ausprägung der Funktionen, die Darstellung der Funktionen für den Anwender und eventuelle Parameter zu bekommen, wird eine eigene Untersuchung notwendig.

6.1. Ziel der Bewertung

Akzeptanz bezeichnet die Bereitschaft, inwieweit Innovationen von den damit konfrontierten Personen angenommen werden. Um zu überprüfen, ob das System als Fahrerassistenzsystem akzeptiert wird, müssen es die Testpersonen nach obiger Definition nutzen und die dargebotenen Informationen befolgen können. Daher stehen im Mittelpunkt der Bewertung zwei Aspekte:

- Ein Fragebogen, in dem sowohl die Eignung (d.h. die Gebrauchstauglichkeit und Verkehrssicherheit) des Systems als auch das adäquate Befolgen der durch das System angebotenen Assistenz (z.B. Empfinden der Assistenz, die Integration der Assistenz,) überprüft wird.
- Fahrdaten, die Aufschluss über die Nutzung des Systems zulassen.

Ziel ist dabei die Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit des Systems. Dabei soll die Wirksamkeit unter realen Fahrbedingungen untersucht werden. Die Befragung bzw. die Testfahrten dienen dabei als Voruntersuchung für eine eventuell spätere umfassendere Testreihe mit einer größeren Stichprobe an Versuchspersonen und längeren Testfahrten. Im Vordergrund dieser Bewertung stehen dabei die Fragen zur Akzeptanz der Geschwindigkeitsregelung, insbesondere hinsichtlich der Geschwindigkeitsregelung über das aktive Gaspedal und einer angemessenen Informationsdarstellung der Systemzustände über das optische Display im Tacho.

6.2. Vorbereitungen

Zur Vorbereitung für die Untersuchung musste die Systemauslegung und die Vorgehensweise für den Versuch festgelegt werden. Neben dem Fragebogen selbst waren die Fragestellung nach der Sportlichkeit, dem MMI und diversen Parametern des Systems zu beantworten.

6.2.1. Versuchsgebiet

Da für das System die höhere Datenbankqualität benötigt wird, wird als Versuchsgebiet das im Kapitel 3 beschriebene Testgebiet verwendet. Da die Anwendung im wesentlichen auf Kurven, Sichtweitenbehinderungen und gesetzliche Geschwindigkeiten reagiert, wurde eine Überlandstraße mit mehreren Ortsdurchfahrten, Kurven und

Sichtweitenbehinderungen als Fahrstrecke in Form eines Rundkurses ausgewählt. Folgende Abbildung 6-1 zeigt den entsprechenden Kartenausschnitt.

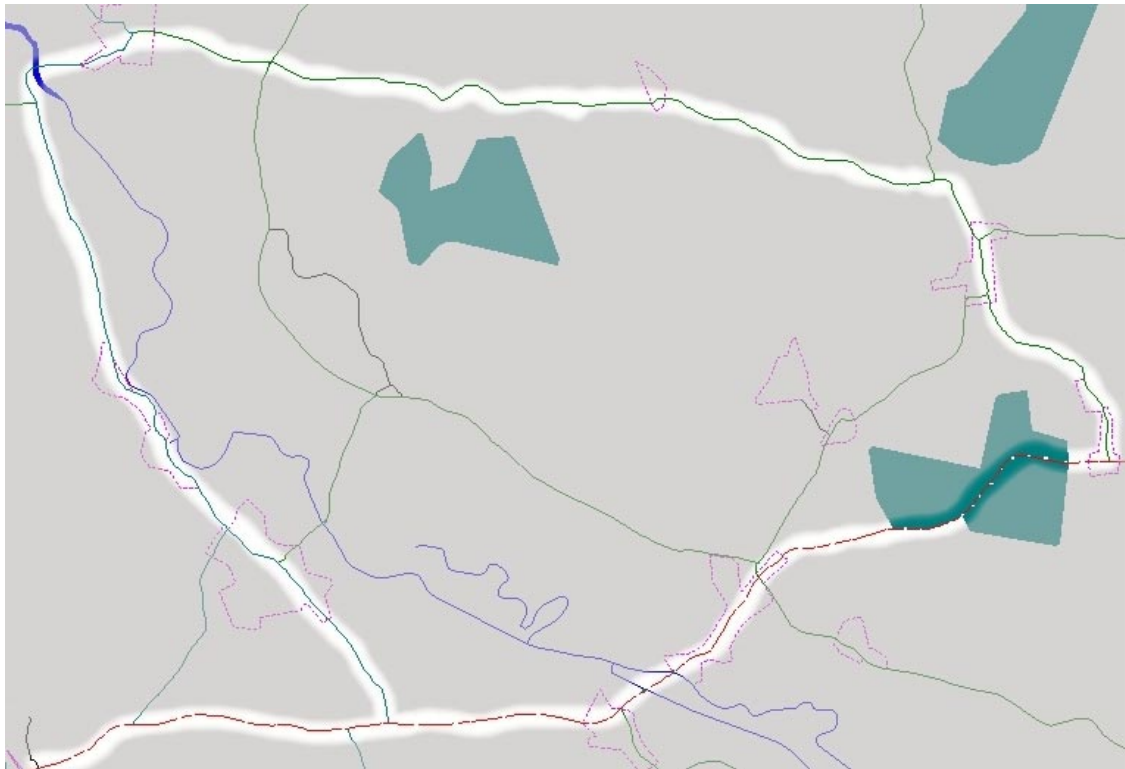


Abbildung 6-1: Rundkurs für Testfahrten mit den Versuchspersonen

Auf dem Rundkurs befinden sich 9 Ortschaften, wobei zweimal zwei Ortschaften unmittelbar aneinandergrenzen und somit als jeweils eine gezählt werden können. Die Verteilung der gesetzlich vorgeschriebenen Geschwindigkeiten auf dem Kurs wird in folgender Abbildung 6-2 dargestellt.

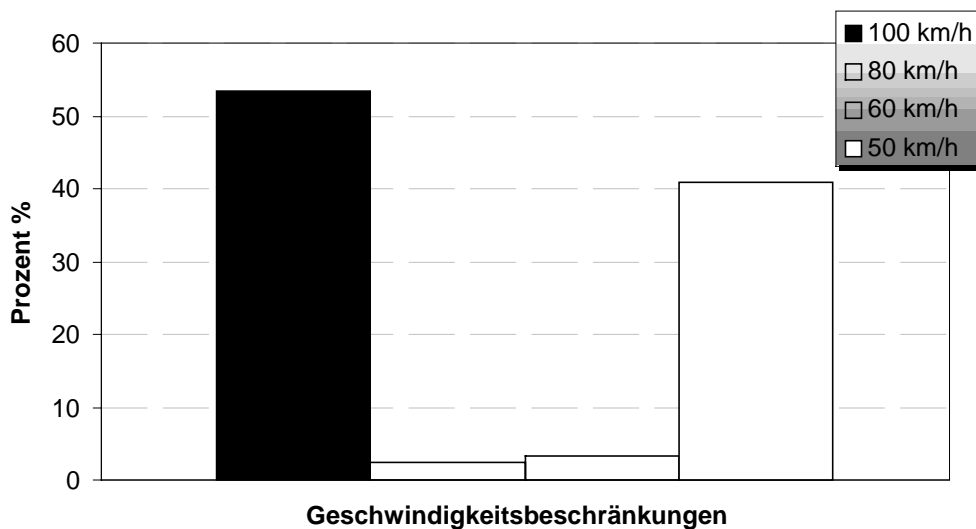


Abbildung 6-2: Verteilung der gesetzlichen Geschwindigkeit über den Rundkurs

Ca. 53 % der Strecke ist freie Landstraße ohne explizite Beschränkung der Geschwindigkeit. 40 % der Strecke sind Dörfer bzw. Gebiete, die durch 50 km/h gesetzliche Geschwindigkeit beschränkt sind.

6.2.2. Fragebogen

Der Fragebogen entstand aus einem Eignungstest für Fahrerassistenzsysteme. Dabei soll für verschiedene Assistenzsysteme eine Gebrauchstauglichkeit und Verkehrssicherheit des jeweiligen Systems überprüfbar werden. Die Eignung wurde wie folgt definiert:

„Ist das System leicht zu nutzen bzw. inwieweit kann das System vom Fahrer so verwendet werden, dass die vorgesehene Funktion angemessen erfüllt wird und gleichzeitig das System verkehrssicher ist bzw. die Aufmerksamkeit, die der Fahrer dem System widmen muss, mit den Erfordernissen der jeweiligen Verkehrssituation vereinbar bleibt“.

Insbesondere wurden neben den allgemeinen Eignungsfragen die Eignung des aktiven Gaspedales, der Informationsgehalt über das aktive Gaspedal und der Informationsgehalt der im Tacho dargestellten Systemzustände abgefragt. Außerdem soll der ausgefüllte Fragebogen auch Aufschluss über das Befolgen der dargebotenen Information geben, d.h. inwieweit entspricht die Information bzw. die vorgeschriebene Geschwindigkeit durch das System der Fahrerabsicht. Die Fragen wurden dabei zum persönlichen Empfinden von Geschwindigkeiten in bestimmten Situationen nach der Versuchsfahrt gestellt. Im Mittelpunkt standen dabei Fragen zum Systemverständnis, zum Empfinden des aktiven Gaspedals und zur empfundenen Geschwindigkeitsregelung in spezifischen System-Situationen (Kurven, unübersichtlicher Straßenverlauf, Ortsdurchfahrten).

Weiter wurden die Versuchspersonen zu Ihrem Alter, Geschlecht, privatem Fahrzeug, Kilometerleistung pro Jahr und Ihrem Fahrstil befragt. Der Fahrstil wurde nach Beendigung der Testfahrt nochmals erfragt, um Unterschiede mit und ohne System derselben Versuchsperson herauszufinden. Hierzu wurde ein kurzer Fragebogen [Chaloupka, 1998] verwendet, der den Fahrstil in zwei Klassen (eher defensiv, eher sportlich) teilt.

6.2.3. Expertenbefragung

Zur Expertenbefragung wurden im wesentlichen Personen aus der Forschung über die Systemergonomie befragt. Die Experten sollten das MMI und die Systemauslegung für die Versuchsfahrten beurteilen. Unter anderem wurden dabei Fragen zu folgenden Themen gestellt:

- aktives Gaspedal und Pedalkräfte
- Parameter des Systems und Sportlichkeit
- Grad der Bedienung durch die Versuchsperson
- Anzeige der Zustände im Display

Die Ergebnisse und somit die Einstellungen für die Versuchsfahrt sind im folgenden beschrieben:

Die Änderungsmöglichkeiten der Pedalkräfte des Gaspedales waren aufgrund technischer Beschränkungen nur bedingt möglich. So wurden die Experten im wesentlichen gefragt, ob die Auslegung bzw. die Pedalkräfte für den Versuch akzeptabel sind. Die gemeinsame Meinung bestätigte die Eignung mit dem Hinweis, die Versuchspersonen immer wieder auf das Gaspedal bzw. den Druckpunkt aufmerksam zu machen. Der Versuchsleiter erklärt dabei zu Beginn die Funktionsweise des Pedales und kann während der Fahrt die Versuchspersonen bei erkannter Überschreitung des Druckpunktes nochmals auf diesen Zustand aufmerksam machen. Als Parameter wurde im wesentlichen die Sportlichkeit beschrieben. Diese wurde auf einen festen aber komfortablen Wert eingestellt, der von den Experten als zügig bis komfortabel beschrieben wurde. Die Versuchspersonen sollten nicht die Möglichkeit haben, die Sportlichkeit oder andere Parameter während der Versuchsfahrt zu verstellen. Der Grund für diese Einschränkung liegt in der ohnehin ungewohnten Funktion, die das System für den Fahrer darstellt. Das System greift aktiv in die Längsregelung des Fahrzeuges ein und beschreibt somit eine neue Klasse von Assistenzsystemen, die derzeit noch einen sehr geringen Bekanntheitsgrad haben. Hier liegt auch der Grund für die Einschränkung der Versuchspersonen auf solche Personen, die schon einmal zumindest die ACC-Funktion kennen gelernt haben.

Bei der Anzeige der Zustände im Display ergab sich der größte Diskussionsbedarf. Bisherige Längsregelsystem wie z.B. ACC zeigen die Reaktion des Abstandsreglers durch ein „Fahrzeug erfasst“ Symbol im Kombiinstrument an. Der Fahrer bekommt dabei keine Information über den Grad bzw. die Ausführung der Aktion des Systems angezeigt. Er kann diese erst hinterher beurteilen. Ein Ansatz war nun, die Aktion von diesem Längsregelsystem durch ein weiteres Symbol im Kombiinstrument anzuzeigen und dem Fahrer somit mitzuteilen, dass die Einschränkung bzw. Reduzierung der Geschwindigkeit durch eine Kurve bzw. Umgebungsparameter bedingt ist. Der Vorteil ist die einfache Verständlichkeit der Anzeige und somit eine gute Akzeptanz. Der Nachteil liegt in der geringeren Information, die durch eine schlichtes Aufleuchten einer Anzeige übermittelt wird.

Ein andere Ansatz liegt in der Darstellung der vom System vorgeschlagenen Geschwindigkeit. Dabei wird durch einige LED's im Tacho, die rings um den Tachometer angebracht sind, eine Differenzgeschwindigkeit von der aktuellen Wunschgeschwindigkeit bis zur beschränkenden Geschwindigkeit angezeigt. Das System schlägt dem Fahrer jedoch genau genommen ein Motormoment (aktives Gaspedal) vor. Um aus diesem eingestellten Motormoment eine Geschwindigkeit abzuleiten, wird die Geschwindigkeit errechnet, die sich aus der aktuellen Beschleunigung einige Sekunden vor dem Fahrzeug ergibt. Bei großen Geschwindigkeitsunterschieden und somit höheren zu erwartenden Bremsbeschleunigungen werden so mehr LED's angezeigt als umgekehrt. Der Fahrer bekommt also eine zusätzliche Rückmeldung über den Grad der eingeleiteten Aktion durch das System und kann schon im voraus die Zielgeschwindigkeit erkennen. Das Anzeigen von errechneten Kurvengeschwindigkeiten wurde vermieden, da die Zuordnung der Aktion zu einer Kurve schwierig wäre. Die nächste Kurve ist nicht zwingendermaßen die Kurve, auf die das System regelt. Bei einer sehr leichten Eingangskurve mit einer sehr engen Folgekurve würde das System schon vor der ersten Kurve die Geschwindigkeit der zweiten anzeigen. Somit wäre die Aktion nicht mehr einem Ort zuzuordnen und würde beim Fahrer unter Umständen Unverständnis auslösen.

Die Experten waren sich in der Anzeigevariante uneinig. So wurde die Displayvariante, die von den meisten Experten als geeignet befunden wurde, für die Versuchsfahrt verwendet. Es wurden schließlich die Balken für die Geschwindigkeiten dargestellt.

6.2.4. Fahrdaten

Während der kompletten Versuchsfahrt wurden Daten aus dem System automatisch mitgeschrieben. Die Versuchspersonen wurden nicht darüber informiert. Folgende Daten wurden aufgezeichnet: die errechnete Kurvengeschwindigkeit, die Ist-Geschwindigkeit, die Wunschgeschwindigkeit, die Gierrate, der ACC-Modus, der Übertreten-Status und Positionsinformationen. Die Kurven- und Ist-Geschwindigkeit dienen dem Vergleich, wie stark die Abweichung eines Fahrers von der errechneten Geschwindigkeit ist. Aus dem ACC-Modus lässt sich ableiten, wie oft sich die Versuchsperson während der Versuchsfahrt im abstandsgeregelten Modus (ACC), im eigentlichen Systemmodus und auf freier Fahrt befand. Der Übertreten-Status lässt Aussagen über die Akzeptanz der errechneten Lösung zu. Mit Hilfe der Positionsdaten können die Daten später wieder einem Ort zugeordnet und somit verglichen werden.

6.2.5. Stichprobe

An der Untersuchung nahmen 14 männliche Testpersonen im Alter von 26 bis 64 Jahren, alle erfahrene Autofahrer, teil. Das Durchschnittsalter der Testpersonen betrug 41 Jahre. Einschränkend anzumerken ist, dass es sich dabei ausschließlich um einschlägig vorbelastete Personen handelte, die zwar nicht am Systemdesign beteiligt waren, aber bei der Entwicklung von Assistenzsystemen mitarbeiten.

6.3. Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgte bei normalem Tageslicht zwischen 9:00 Uhr und 16:00 Uhr. Die Zeiten wurden aufgrund günstiger Verkehrslage gewählt, um an möglichst vielen Stellen die Regelung aufgrund von Kurven usw. beurteilen zu können. Pro Tag wurden sieben Versuchspersonen getestet. Sie wurden an einem Treffpunkt außerhalb von München direkt an der Versuchsstrecke empfangen. Die Dauer der Testfahrt betrug ca. 30 min. und verlief über eine Strecke von ca. 30 km.

Die Versuchspersonen mussten alle vor Fahrtantritt den Fragebogen zur Sportlichkeit des eigenen Fahrstiles ausfüllen. Außerdem wurden sie vom Versuchsleiter über die Systemfunktionen und den Ablauf der Versuchsfahrt informiert. Die Beschreibung war wie folgt:

„Das System berechnet eine situationsangepasste Geschwindigkeit für die Ereignisse eingeschränkte Sichtweite, Kurve und Änderung der gesetzlichen Geschwindigkeit. Die gesetzliche Geschwindigkeit wird durch eine automatische Veränderung der Wunschgeschwindigkeit und somit automatische Regelung eingestellt. Der Fahrer kann einen Parameter für eine Überschreitung festlegen. Für den Versuch sind 10 km/h eingestellt. D.h. in einer Stadt wird das System 60 km/h statt der vorgeschriebenen 50 km/h einstellen. Die Ereignisse Kurve und eingeschränkte Sichtweite werden dem Fahrer -ähnlich wie bei der Abstandsregelung auf ein vorausfahrendes Ob-

jekt- durch einen veränderten Druckpunkt und gegebenenfalls eine Bremsung angeboten. Gleichzeitig ist das Abstandsregelsystem ACC aktiv.“

Nach Beginn der Versuchsfahrt wurden alle Fahrer noch einmal auf das Er tasten des Druckpunktes hingewiesen.

Während der Fahrt wurde vom Versuchsleiter ein Logbuch geführt, in dem Äußerungen mitprotokolliert wurden und die Versuchsperson in ihrem Fahrstil eingeschätzt wurde. Der Versuchsleiter hat dabei die Äußerungen in folgende Kategorien aufgeteilt: Äußerungen bezogen auf Ortsdurchfahrten, Kurven, Sichtweitenprobleme, besondere Vorkommnisse und Allgemeines. Weiter wurde das Wetter während der Versuchsfahrt festgehalten. Der Versuchsleiter war weiter dazu angehalten, keine wertende Aussagen zum System zu geben.

Nach Beendigung der Fahrt wurde der Versuchsperson der Fragebogen ausgehändigt. Gleichzeitig zum Gesamtfragebogen wurde die Versuchsperson hier noch einmal nach dem Fahrstil mit dem System befragt.

6.4. Ergebnisse

6.4.1. Einschätzung des Fahrstils vor und nach der Fahrt

Abbildung 6-3 zeigt, wie die Testpersonen ihren Fahrstil einschätzen.

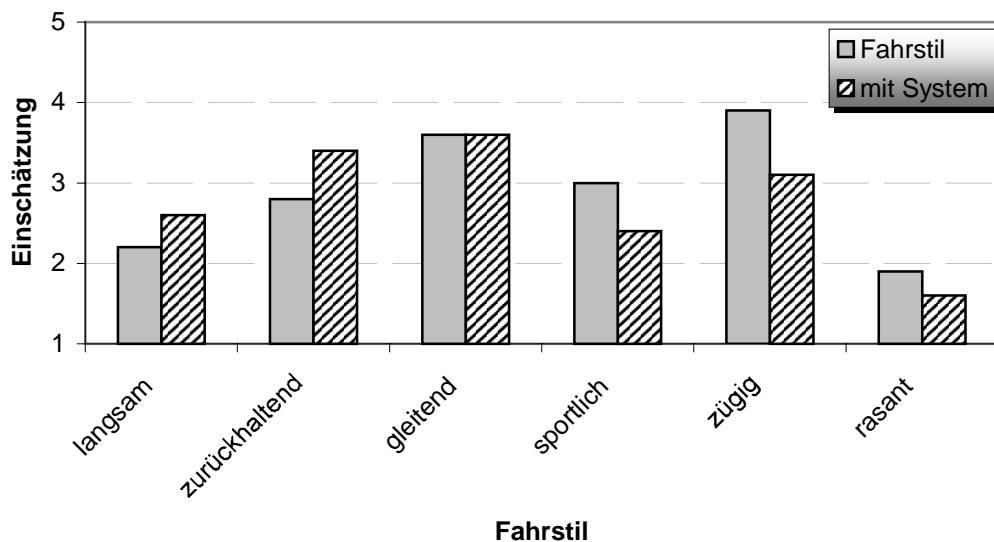


Abbildung 6-3: Fahrstil (Mittelwert von 14 Versuchspersonen)

Ein t-Test zum Vergleich der abhängigen Stichproben ergibt folgende signifikante Unterschiede:

- Versuchspersonen schätzen ihren Fahrstil mit dem System weniger "zügig-aktiv" ein ($p=0.005$);

- Versuchspersonen schätzen ihren Fahrstil mit dem System "zurückhaltender" ein ($p=0.035$);
- Versuchspersonen schätzen ihren Fahrstil mit dem System als weniger "sportlich" ein ($p=0.055$; fast signifikant!).

Die anderen drei Fahrstil-Einschätzungen haben sich nicht signifikant verändert.

Ein Vergleich der Fahrstil-Einschätzung des Versuchsleiters mit der eigenen Einschätzung des Fahrstils ergab keine hohen Korrelationen (siehe Tabelle 6-1). Im Durchschnitt schätzte der Versuchsleiter den Fahrstil der Testpersonen als eher sportlich ein (bei 10 von 14 Testpersonen), während die Testpersonen ihren eigenen Fahrstil mit dem System als eher zurückhaltend einstufen (siehe Abbildung 6-3).

Tabelle 6-1: Korrelation Einschätzung Fahrstil (Fremdeinschätzung durch Versuchsleiter vs. eigener Einschätzung)

Eigeneinschätzung Fahrstil	Korrelation mit Fremdeinschätzung "sportlich" (Wertebereich von $r = -1$ bis 1 , wobei positive Werte eine entsprechend hohe Bewertung bedeuten!)
Sportlich	$r = 0.21$
Zügig	$r = 0.47$
Rasant	$r = -0.03$
Langsam	$r = 0.46$
Zurückhaltend	$r = 0.02$
Gleitend	$r = 0.38$

Am besten scheint die Fremdbeurteilung des Versuchsleiters "sportlich" mit der Eigenbeurteilung "zügig" übereinzustimmen. Demgegenüber scheint vor allem die Eigeneinschätzung "langsam" nicht mit der Fremdeinschätzung des Versuchsleiters übereinzustimmen.

6.4.2. Empfinden

Abbildung 6-4 zeigt, wie die Testpersonen die Geschwindigkeitsregelung durch NavSpeed erfahren haben.

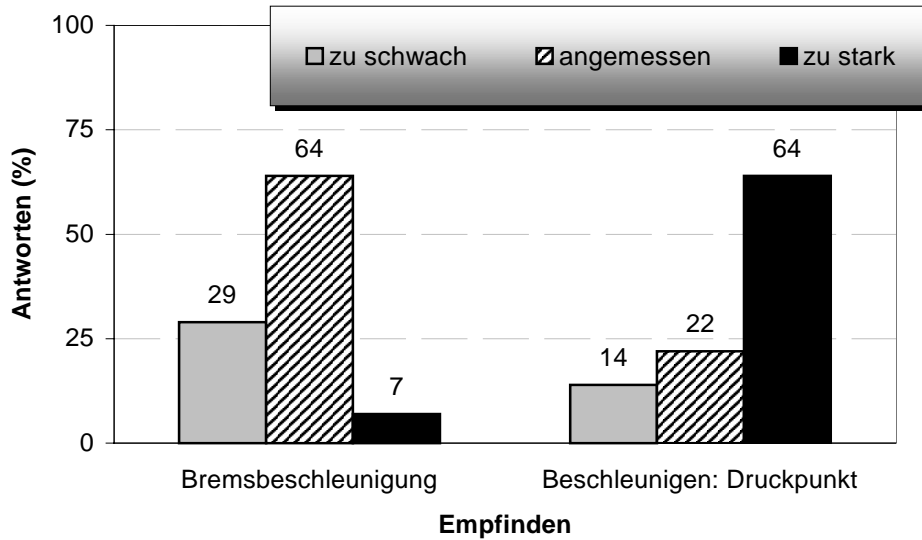


Abbildung 6-4: Erfahrung der Geschwindigkeitsregelung

Die Mehrheit der Testpersonen empfindet die Bremsbeschleunigung als angemessen, wohingegen der Druckpunkt am Gaspedal häufig als zu stark wahrgenommen wird. Dies gilt insbesondere beim Anfahren und nach dem Abbiegen (siehe dazu auch die Kommentare der Testpersonen im Anhang).

Abbildung 6-5 zeigt das Geschwindigkeitsempfinden der Testpersonen.

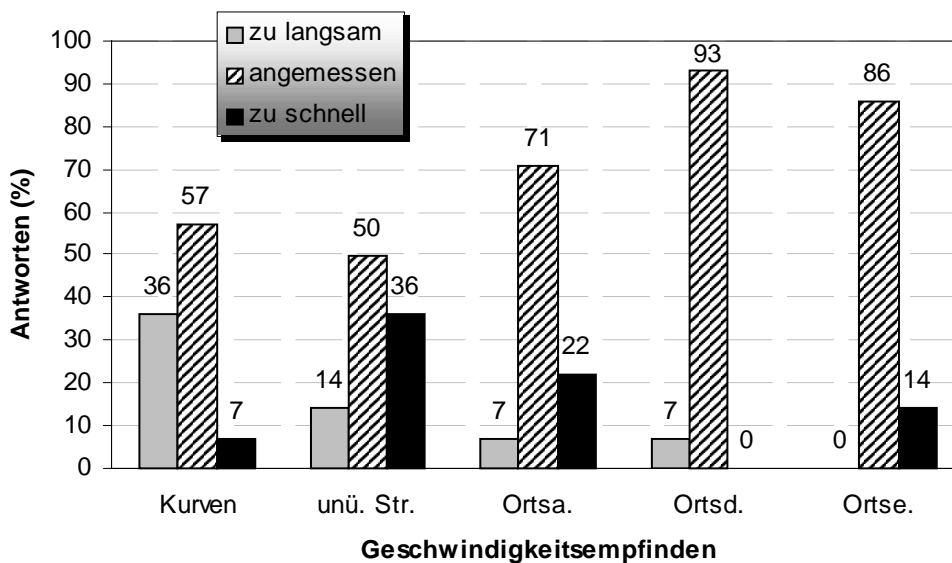


Abbildung 6-5: Empfindung der vom System geregelten Geschwindigkeit

Während die Geschwindigkeitsregelung bei Ortsdurchfahrten für angemessen gehalten wird, ergeben sich unterschiedliche Meinungen bei Kurven und bei unübersichtlichem Straßenverlauf. Interessant dabei ist, dass Kurven von einem Teil der Testpersonen als zu langsam durchfahren wahrgenommen werden, während ein unübersichtlicher Straßenverlauf als zu schnell durchfahren erlebt wird. Gründe darin könnten in der Antizipation des Straßenverlaufs der Testpersonen liegen:

- Kurven können durch die Voraussicht gut antizipiert werden, daher ist ein sportliches Durchfahren der Kurven häufig möglich.
- Die Versuchsperson fahren in einem sehr komfortablen und trotzdem sportlichen Fahrzeug (BMW 750).
- Ein unübersichtlicher Straßenverlauf ist von den Testpersonen nur ungenügend antizipierbar. Daher kann die Testperson den Verlauf nicht richtig einschätzen und passt ihr Fahrverhalten dieser Unsicherheit mit einem defensiveren Fahrstil an.

Abbildung 6-6 zeigt, wie gut die Testpersonen die jeweiligen Systemzustände von NavSpeed einschätzen konnten.

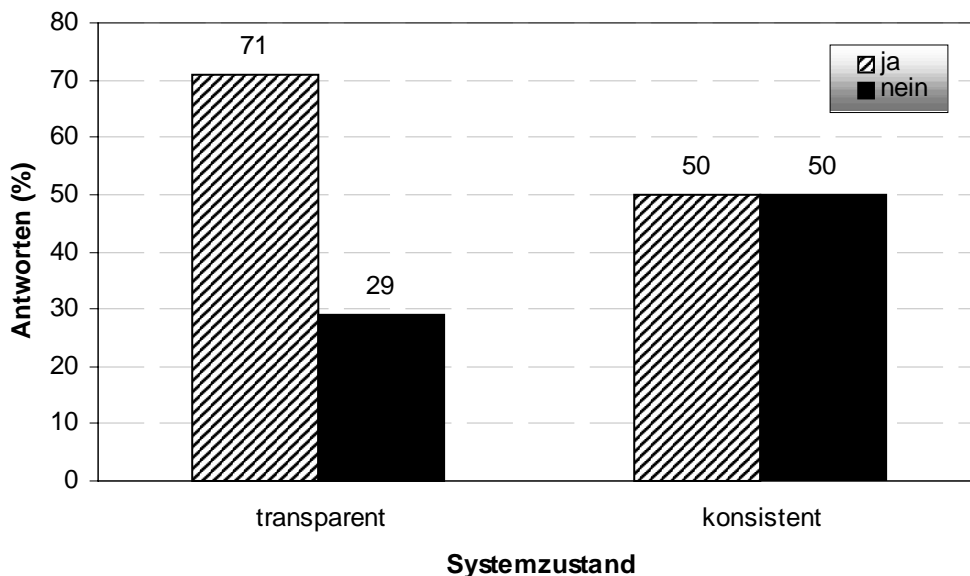


Abbildung 6-6: Wahrnehmung des Systemzustands von NavSpeed.

Während den Testpersonen in der Regel in allen Fahrsituationen bewusst war, in welchem Systemzustand sich NavSpeed befand (Systemzustand transparent), hat sich nach Meinung der Hälfte der Testpersonen NavSpeed in den verschiedenen Situationen unterschiedlich verhalten (Systemzustand konsistent). Diese Einschätzung traf vor allem bei Kurven zu (siehe Anhang). Der Systemzustand von NavSpeed war vor allem nach Abbiegesituationen nicht klar, da dort der Druckpunkt am Gaspedal als zu stark empfunden wurde (siehe Anhang).

Abbildung 6-7 zeigt schließlich, ob sich die Testpersonen in bestimmten Situationen unwohl gefühlt haben. Der hohe Prozentanteil derer, die diese Frage mit "ja" beantwortet haben, ist erstaunlich.

"Gab es Fahrsituationen, in denen Sie sich unwohl gefühlt haben?"

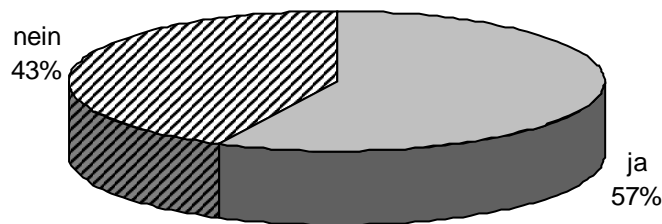


Abbildung 6-7: *Gefühl* mit NavSpeed.

Berücksichtigt man jedoch die schriftlichen Antworten der Testpersonen dazu (siehe Anhang), stellt sich heraus, dass sich das Unwohlgefühl auf ganz spezifische Situationen, nämlich in der Regel auf zu hohe Geschwindigkeiten in Kurven, bei unübersichtlichem Straßenverlauf und bei Ortsdurchfahrten beschränkte (siehe auch Abbildung 6-5).

6.4.3. Eignung

NavSpeed wird von den Testpersonen als relativ gut geeignet für den Einsatz während der Fahrt bewertet, sowohl in Bezug auf die Gebrauchstauglichkeit, als auch auf die Verkehrssicherheit (siehe Abbildung 6-8).

Am besten wird das aktive Gaspedal bewertet (alle Noten im Bereich von 1 bis 3). Der Informationsgehalt der Rückmeldungen wird in der Regel auch mit gut bewertet, obwohl 3 Versuchspersonen Abstriche in der Verkehrssicherheit machen (dreimal die Note 4). Als störend wird der für manche Situationen als zu stark empfundene Druckpunkt angemerkt (siehe dazu auch Abbildung 6-4). Eine Versuchsperson bewertet die Gebrauchstauglichkeit der Rückmeldungen über das Gaspedal als "mangelhaft" (siehe dazu auch die Kommentare im Anhang).

Die Informationsdarstellung im Tachometer wird von den Versuchspersonen im Vergleich zur Eignung des aktiven Gaspedals und den Rückmeldungen über das aktive Gaspedal in der Regel etwas niedriger bewertet. Jeweils 3 Versuchspersonen bemängeln die Eignung der Informationsdarstellung im Tachometer, sowohl hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit (einmal die Note 5 und zweimal die Note 4), als auch in

Bezug auf die Verkehrssicherheit (einmal die Note 5 und zweimal die Note 4) (siehe dazu auch die Anmerkungen im Anhang).

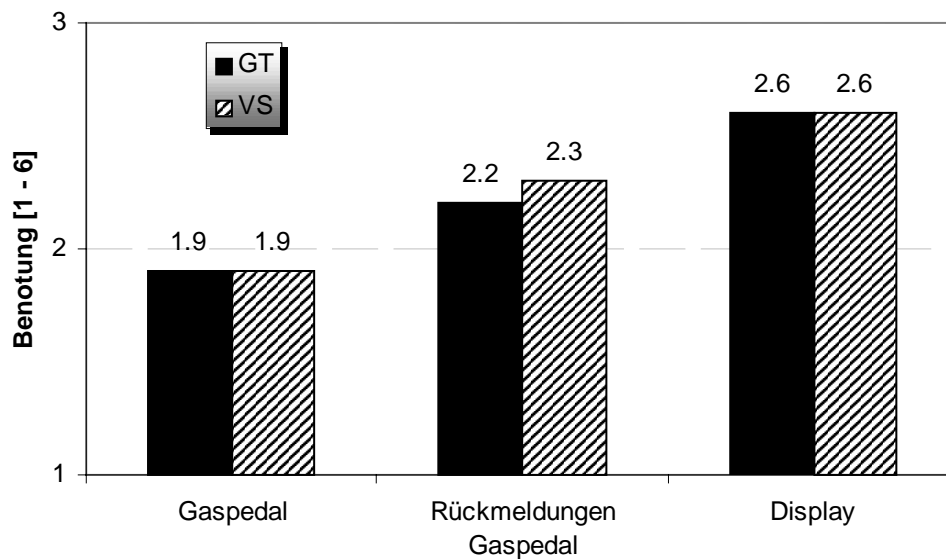


Abbildung 6-8: Eignung von NavSpeed (verschiedene System-Aspekte).

6.4.4. Beeinflussung des Fahrers durch NavSpeed

Die relativ gute Eignungsbewertung des Systems schlägt sich auch in der Bewertung darüber nieder, wie NavSpeed auf die Fahrer wirkt und wie sie die Beeinflussung durch das System bewerten (siehe Abbildung 6-9).

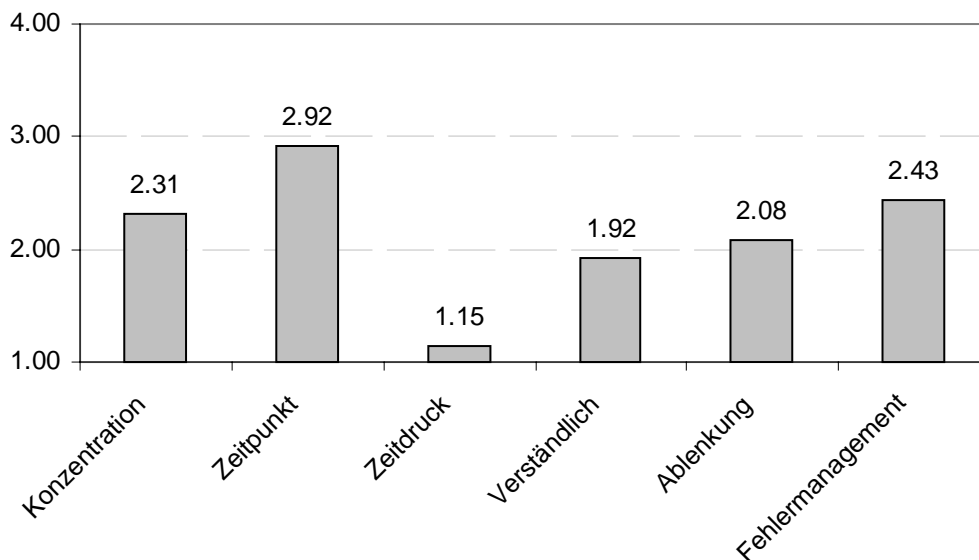


Abbildung 6-9: Wirkung des Systems auf den Fahrer.

Folgende Punkte fallen auf:

Am uneinheitlichsten bewerten die Versuchspersonen das Fehlermanagement des Systems. 50 % der Versuchspersonen sind der Meinung, dass diese Frage nicht auf das System zutrifft, von den übrigen 7 Versuchspersonen wird diese Frage eher neutral beantwortet.

Am kritischsten wird von den Versuchspersonen der Zeitpunkt der Informationsdarbietung durch das System bewertet. Dieser Zeitpunkt ist vielen Versuchspersonen nicht exakt genug (11 Versuchspersonen bewerten diese Frage mit neutral).

Sowohl die Konzentration auf das System, als auch die Ablenkung durch das System wird dagegen als niedrig und somit positiv für das System bewertet (nur eine Versuchsperson musste sich stark konzentrieren und keine Versuchsperson fühlte sich durch das System abgelenkt).

Trotz der geringen Ablenkung durch das System und der niedrigen Konzentration auf das System waren die dargebotenen Informationen für die Versuchspersonen gut verständlich (keine Versuchsperson gab hier eine neutrale oder gar schlechte Wertung ab!).

Folgender wichtiger Punkt lässt vor allem ableiten: Die Versuchspersonen fühlten sich durch das System nicht unter Zeitdruck gesetzt!

6.4.5. Beeinflussung von Fahrstil und Fahrerleben

Sowohl die Beeinflussung des Fahrstils als auch des Fahrerlebens wurden durch die Nutzung des Systems von den Versuchspersonen eher positiv bewertet (siehe Abbildung 6-10).

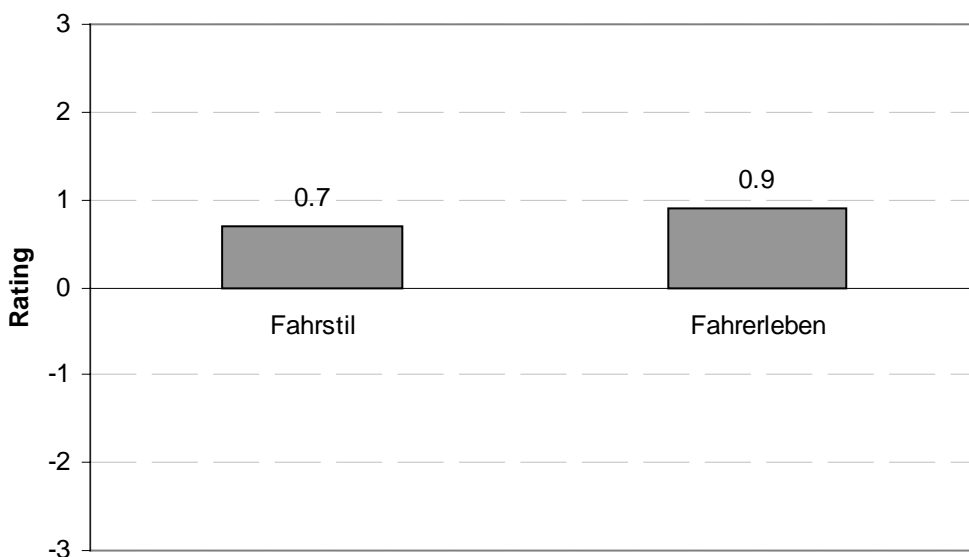


Abbildung 6-10: Beeinflussung von Fahrstil und Fahrerleben durch Systemnutzung.

Wenn man dieses Ergebnis mit der Einschätzung des eigenen Fahrstils vergleicht (siehe Abbildung 6-3), hat die durch das System bedingte ruhigere Fahrweise einen eher positiven Einfluss auf die Testpersonen.

6.4.6. Ergebnisse Fahrdaten

Gut 40 Prozent der Teststrecke führte dabei durch Ortschaften, während über 50 Prozent ohne Geschwindigkeitsbeschränkung, d.h. mit 100 km/h durchfahren werden konnten (siehe Abbildung 6-2).

Abbildung 6-11 zeigt die prozentuale Nutzung von NavSpeed.

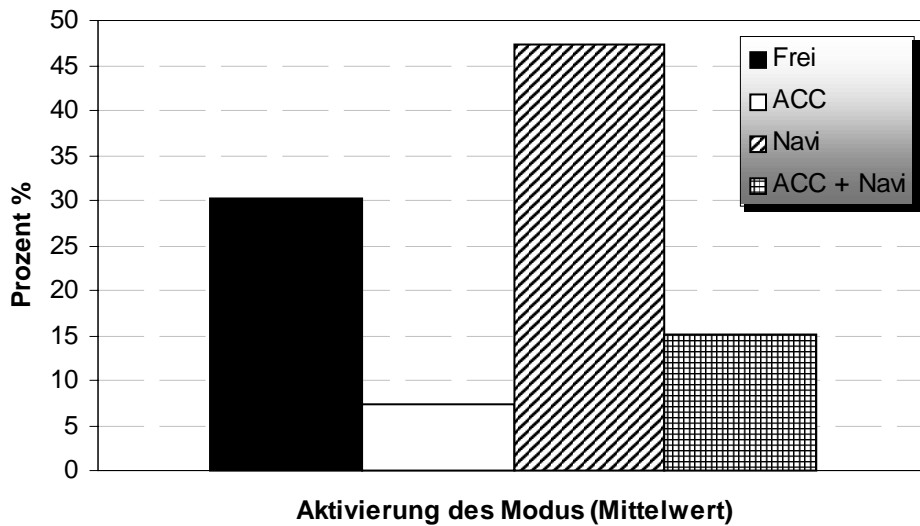


Abbildung 6-11: Aktivierung der Assistenzsysteme: Modus NavSpeed und ACC.

Obwohl bei über 50 Prozent der Teststrecke keine Geschwindigkeitsbeschränkung vorlag (siehe Abbildung 6-2), konnten die Testpersonen im Durchschnitt nur 30 Prozent ohne Systemaktivierung fahren.

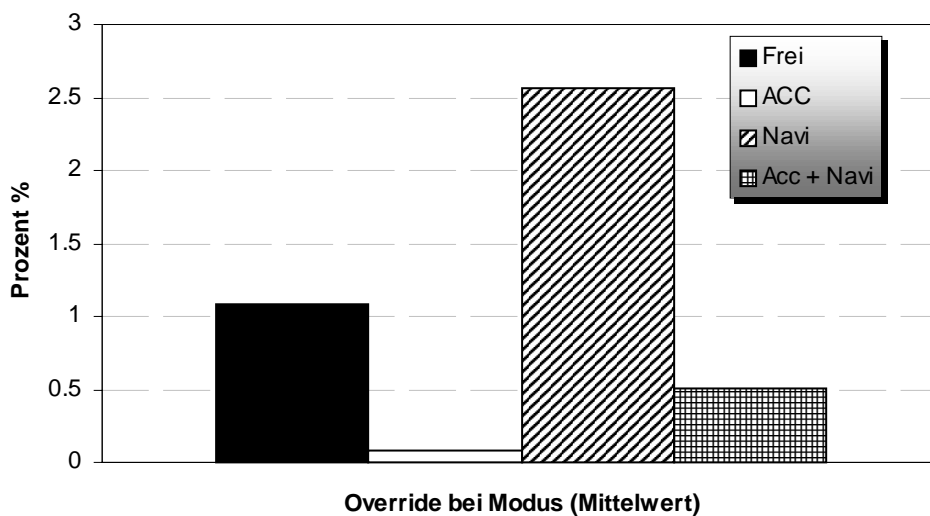


Abbildung 6-12: Prozentuale Übertretung der Geschwindigkeitsvorgabe durch NavSpeed.

Weitere 15 Prozent der Fahrzeit war NavSpeed aktiv, konnte aber durch ein vorausfahrendes Fahrzeug (ACC-Mode) nicht genutzt werden. Dennoch nutzten die Testpersonen während fast der Hälfte der Testfahrt NavSpeed.

Die Testpersonen folgten in der Regel den Geschwindigkeitsvorgaben von NavSpeed. Nur in knapp drei Prozent der Systemaktivierung übertraten die Testpersonen die von NavSpeed empfohlene Geschwindigkeitsvorgabe (siehe Abbildung 6-12).

In Abbildung 6-13 ist der mittlere Geschwindigkeitsverlauf in einem ausgewählten Teilabschnitt der Teststrecke abgebildet.

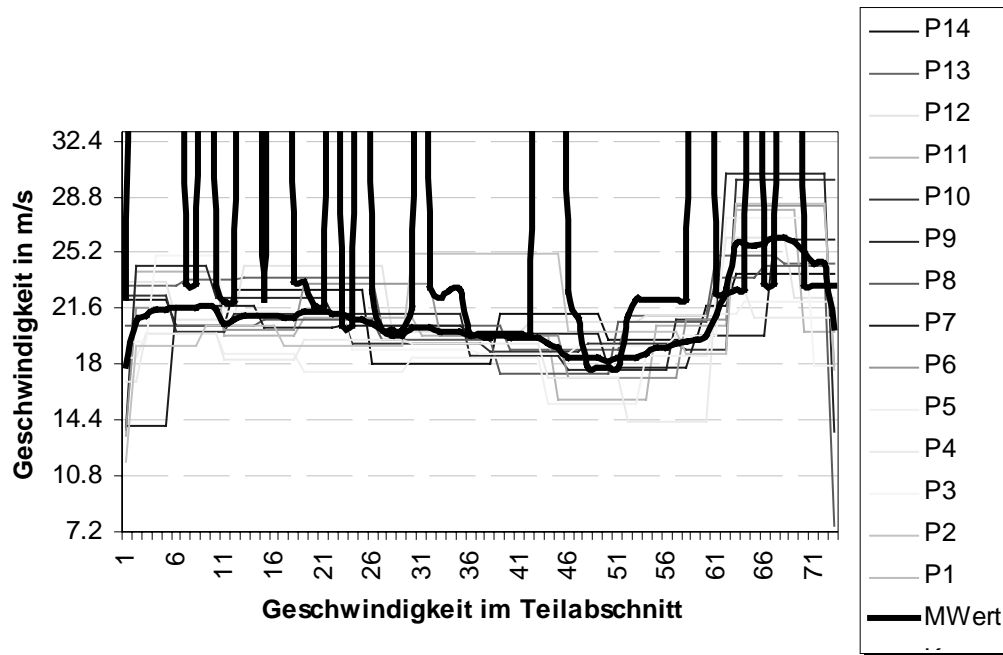


Abbildung 6-13: Geschwindigkeitsverlauf im Teilabschnitt

Die Testpersonen halten in diesem kurvigen Teilabschnitt die Geschwindigkeitsvorgaben von NavSpeed sehr gut ein. Die größeren Abweichungen am Ende des Teilabschnittes (ab Abschnitt 61, siehe Abbildung 6-13) sind eventuell auf Zuordnungsprobleme der Datenorte bei der Datenaufzeichnung zurückzuführen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse aus den Fahrdaten, dass die Testpersonen NavSpeed auf der Teststrecke ausgiebig nutzen können (siehe Abbildung 6-11) und in der Regel die Geschwindigkeitsvorgaben von NavSpeed gut einhalten (siehe Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13).

6.5. Beurteilung und Zusammenfassung der Ergebnisse

Es sei hier einleitend noch einmal erwähnt, dass Akzeptanz die Bereitschaft bezeichnet, inwieweit innovative Systemfunktionen von den damit konfrontierten Personen angenommen werden. Insofern kann man erwarten, dass durch die Auswahl der Testpersonen - einschlägig vorbelastete Personen - eine eher positive Einstellung zu dem getesteten Assistenzsystem gegeben sein sollte, die nicht unbedingt ohne Abstriche für eine Zufallsstichprobe vorausgesetzt werden kann.

Dennoch überwiegen bei diesem ersten Test von NavSpeed die positiven Aspekte. Zusammenfassend kann festgestellt werden:

Auffallend ist, dass die Versuchspersonen tendenziell ihren Fahrstil mit dem System als zurückhaltender einschätzen (siehe Abbildung 6-3). Interessant ist auch, dass sich die Einschätzung "gleitend-beherrscht", die einen eher neutralen Fahrstil angibt, überhaupt nicht ändert. Die Tatsache, dass die Versuchspersonen Ihren Fahrstil mit dem System als zurückhaltender und langsamer angeben, kann auch daran liegen, dass das System für sie neu ist!

Die uneinheitlichen Ergebnisse beim Geschwindigkeitsempfinden in den verschiedenen Situationen (siehe Abbildung 6-5) würden dafür sprechen, dass NavSpeed die geregelten Geschwindigkeitsverläufe für jede Situation unterschiedlich berechnen sollte. Insbesondere wird für Situationen, die der Fahrer relativ gut einsehen kann, ein anderer Berechnungsalgorithmus nötig sein (z.B. beim Zeitpunkt der Warnung) als für solche Situationen, die vom Fahrer nicht einsehbar sind. Beim Kurvenfahren könnten dabei Modelle berücksichtigt werden, die Aussagen über die Strategie beim Kurvenfahren zulassen (insbesondere bei der Antizipation von Kurven). Eine Warnstrategie, die nicht an die Strategien des Fahrers angepasst ist, wird vom Fahrer nicht akzeptiert. Einschränkend ist hier allerdings auch zu erwähnen, dass den Versuchspersonen aufgrund der Kürze der Testfahrt keine Möglichkeit gegeben wurde verschiedene Sportlichkeitsparameter einzustellen.

Während das aktive Gaspedal für diese Art von Rückmeldung prinzipiell gut geeignet erscheint, ist zu überlegen, wie die Kraftabstimmung der Rückmeldungen noch überarbeitet werden könnte (siehe Abbildung 6-4 und Abbildung 6-8).

Im Gegensatz zum aktiven Gaspedal muss das Informationsdarstellungskonzept im Tachometer an die neue Anwendung weiter angepasst werden. Da NavSpeed und ACC gemeinsam eingesetzt werden können, sollte ein geeignetes Displaykonzept für beide Systeme erarbeitet werden. Unter Umständen könnte eine klare örtliche Trennung der Informationen von NavSpeed und ACC im Display der Verständlichkeit der Informationen dienen. Zuviel Information auf engem Raum können vor allem in kritischen Situationen vom Fahrer unter Umständen nicht adäquat getrennt werden.

Wenn man das Fragebogen-Ergebnis bei Fahrstil und Fahrerleben mit NavSpeed (siehe Abbildung 6-10) mit der Einschätzung des eigenen Fahrstils vergleicht (siehe Abbildung 6-3), hat die durch das System bedingte ruhigere Fahrweise einen eher positiven Einfluss auf die Testpersonen. Wenn sich diese Tendenz bestätigen sollte, wäre dies ein gutes Ergebnis für BMW: *Freude am Fahren*, obwohl das System eher einen kontrollierten Fahrstil fördert!

6.5.1. Ausblick

NavSpeed wird von den Testpersonen in der im Testfahrzeug implementierten Form, d.h. mit der Rückmeldemöglichkeit über das aktive Gaspedal, akzeptiert und auch für ein geeignetes Fahrerassistenzsystem zur Geschwindigkeitsregulierung gehalten. Dieses insgesamt positive Ergebnis sollte dazu genutzt werden, um NavSpeed weiterzuentwickeln. Dabei sollten auch wesentliche *Human Factors Aspekte* berücksichtigt werden:

Der Zeitpunkt, wann NavSpeed die Geschwindigkeit regelt (und an den Fahrer rückmeldet) sollte erweiterte Modelle mit einbeziehen, die Daten darüber liefern, wie ein Fahrer *vorausschauend* fährt.

Die Art der haptischen Rückmeldung über das aktive Gaspedal muss verfeinert werden (im Kraftverlauf allgemein und wenn möglich auch situationsabhängig).

Das Displaykonzept von NavSpeed *und* ACC sollte weiter aufeinander abgestimmt werden, so dass die Informationen vom Fahrer eindeutig verstanden werden. Da die dargestellten visuellen Informationen wahrscheinlich im Armaturenbereich und damit im primären Sichtfeld des Fahrers liegen werden, darf die dargestellte Information einerseits den Fahrer nicht ablenken (weniger ist mehr!), muss aber trotzdem so deutlich sein, dass sie der Fahrer *schnell* verstehen kann. Es muss für den Fahrer möglich sein, die haptische Information durch das aktive Gaspedal mit der visuellen Information im Display in Einklang bringen zu können.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

7.1. Zusammenfassung

Die Umgebungserfassung ist die Kernaufgabe von Fahrerassistenzsystemen. Mit jeder zusätzlichen Information kann die Aufgabe besser bewältigt werden. Im wesentlichen werden zur Umgebungserfassung Sensorsignale anhand von Modellen interpretiert. Im Vergleich zur menschlichen Umgebungserfassung sind jedoch eine Vielzahl von Sensoren notwendig, um die notwendige Erfassungsleistung zu erreichen. Verfügbare Sensoren decken nur jeweils einen kleinen Teil der benötigten Information ab. Zudem ist die Reichweite der Sensoren in der Regel auch kürzer als die des Menschen.

Mit der Verwendung von digitalen Karten zur Umgebungserfassung erreicht man nicht nur beliebige Reichweiten, sondern auch eine beliebig hohe Genauigkeit für statische (bzw. langsam veränderliche) Umgebungen. Sowohl die Anforderungen an Sensoren zur Positionierung als auch die an digitale Karten gehen aus dieser Arbeit hervor. Folgende Abbildung 7-1 stellt die Bandbreite heute verfügbarer Sensorik zur Positionsbestimmung dar.

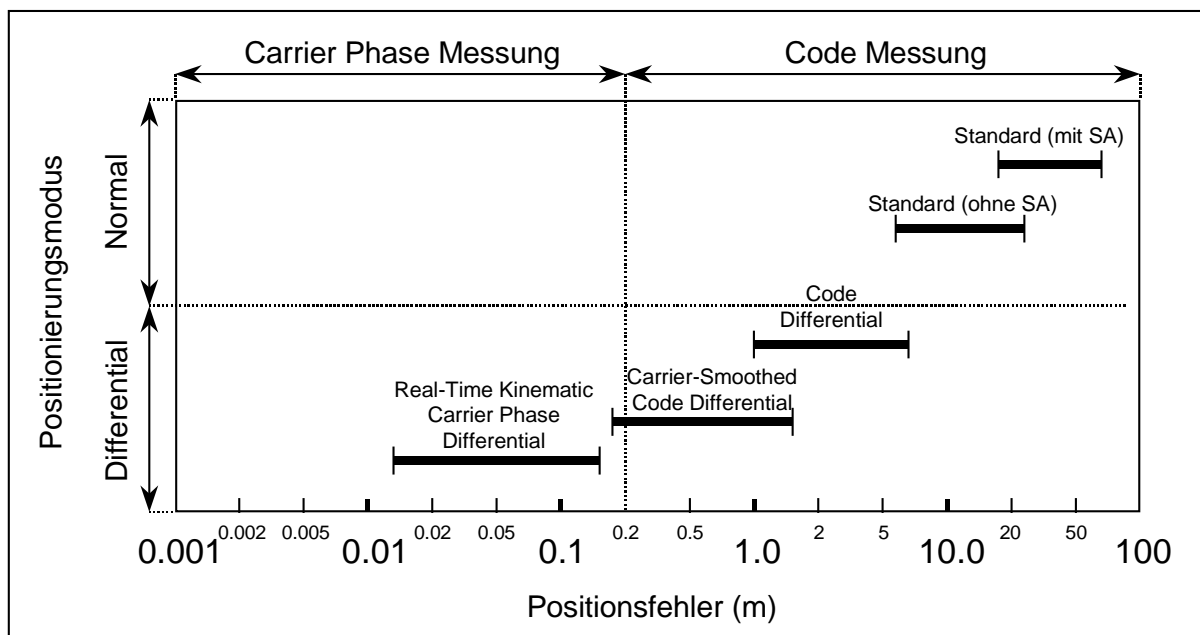


Abbildung 7-1: Bandbreite heutiger Positioniersysteme

Die Anforderungen an digitale Karten wurden im wesentlichen in drei Generationen eingeteilt: Die 1. Generation beschreibt dabei heute verfügbare digitale Karten, die 2. Generation stellt die Inhalte von digitalen Karten in drei bis fünf Jahren dar, während die 3. Generation ohne weiteren zeitliche Bezug das Ziel der Entwicklung dieser Karten darstellt. In folgender Tabelle 7-1 werden die Generationen zusammengefasst und gegenübergestellt.

Tabelle 7-1: Kartengenerationen im Vergleich

1.Generation	2.Generation	3.Generation
Punktgenauigkeit +/- 15m	Punktgenauigkeit +/- 1m, Höhe, Steigung, Radius	Punktgenauigkeit +/- 0.01 m, Höhe, Steigung, Radius Speicherung der Geometrieinformation als Funktion Pro Fahrstreifenmarkierung eine Funktion
nur bei sehr großen Tunnels, Brücken (>200m)	Exakte Umgebungsinformation zu Ereignissen wie Waldstraße, Brücke, Tunnel, Haltesichtweiten	Exakte Umgebungsinformation zu Ereignissen wie Waldstraße, Brücke, Tunnel, Haltesichtweiten Licht- bzw. Beleuchtungsverhältnisse Typische Temperatureigenschaften in diesen Gebieten
8 Straßentypen	Straßentypen nach Bauvorschriften kategorisiert, Anzahl der Spuren, Breite der Spuren, Seitenstreifen, Unterscheidung nach Orts- bzw. Überlandstraße	Straßentypen nach Bauvorschriften kategorisiert, Anzahl der Spuren, Breite der Spuren, Seitenstreifen, Unterscheidung nach Orts- bzw. Überlandstraße, Reibwertinformationen Bürgersteige, Fahrradwege Besonderheiten wie Ausfahrts Spuren usw. müssen gesondert markiert werden
nur Richtungsschilder	sämtliche Vorschrift- und Gefahr-Verkehrsschilder	sämtliche Verkehrsschilder mit exakter Lage bzw. Aufstellort, Beleuchtung
keine Information	Qualitätsinformation Online-Updatefähigkeit der Datenbank	Qualitätsinformation, Altersinformation Online-Updatefähigkeit der Datenbank

Die Positionierung ist schon heute in nahezu allen Genauigkeitsbereichen in Echtzeit möglich. Digitale Karten hingegen müssen erst noch für die angegebenen Anforderungen erstellt bzw. erweitert werden. Da die Erstellung digitaler Karten in den geforderten Genauigkeitsklassen für die einzelnen Hersteller mit hohen Kosten bzw. hohem Aufwand verbunden wäre, werden Verfahren zur automatischen Aktualisierung vorgestellt. Es wird neben der Verbesserung der Geometrie einer Karte die Möglichkeit aufgezeigt, beliebige erfasste Informationen in die digitale Karte aufzunehmen und diese für weitere Befahrungen einer Strecke verfügbar zu haben. Die neuen Daten können dabei unmittelbar ohne weitere Bearbeitung verwendet werden. So erzeugte digitale Karten erreichen bereits nach zwei bis drei Iterationen ein hohes Genauigkeitsniveau. Attribute wie z.B. Verkehrsschilder können bei jeder Befahrung überprüft werden und im Falle einer Änderung schnell in die Karte aufgenommen werden. Die Karte bleibt also nicht starr auf einem Stand stehen, sondern erweitert sich selbst durch die von Sensoren aufgenommenen Daten.

Die Anforderungen an digitale Karten wurden mit jeweils mindestens einer Anwendung pro Kartengeneration bestätigt. Für die 2. Kartengeneration wurde die Längsregelung aufgrund statischer Ereignisse entwickelt. Das entwickelte System reagiert dabei auf vor dem Fahrzeug liegende Kurven, Sichtweitenprobleme und Verkehrsregelungen. Die entsprechenden Kurvengeschwindigkeiten werden aus der Geometrie der Straße berechnet. Weitere Anpassungen erfolgen durch die Attribute eines Straßenstücks, der Sportlichkeit des Fahrers und den Wetterbedingungen. Das System überprüft dabei ständig die vorausliegende Strecke und bestimmt abhängig von der Eigengeschwindigkeit des Fahrzeuges eine angepasste Beschleunigung.

Folgende weitere Anwendungen wurden mit dem hier erstellten Kartensystem getestet: Adaptive Light Control, Situations-Adaptives Antriebsmanagement und Active Cruise Control.

Für die 3. Kartengeneration wurde die Querregelung auf Basis digitaler Karten als Testanwendung gewählt. Sämtliche Eingangsparameter für die Querregelung wurden dabei aus dem hier erstellten System berechnet. Diese waren unter anderem der Querversatz zur Mitte der Spur, der Richtungswinkel des Fahrzeuges, der Richtungswinkel der Straße und der Radius. Es konnte dabei gezeigt werden, dass mit Hilfe einer entsprechend genauen Karte und sehr exakten Positionsmessungen eine Spurhalteunterstützung möglich ist. Besonders interessant wird diese Art der Eingangsgrößenberechnung für die Spurhalteunterstützung bei schlechten Sichtbedingungen bzw. bei z.B. einer verschneiten Straße. Das System ist trotzdem in der Lage, die Spur exakt zu finden und den Fahrer bei diesen schlechten Bedingungen in seiner Spur zu halten. Hier könnten auch weitere technische Anwendungsbereich liegen. Z.B. könnten Schneeräumfahrzeuge damit auch bei stark verschneiten Straßen eine exakte Spur halten. Eine Übersicht möglicher Anwendungen mit den verschiedenen Kartengenerationen ist in folgender Abbildung 7-2 dargestellt.

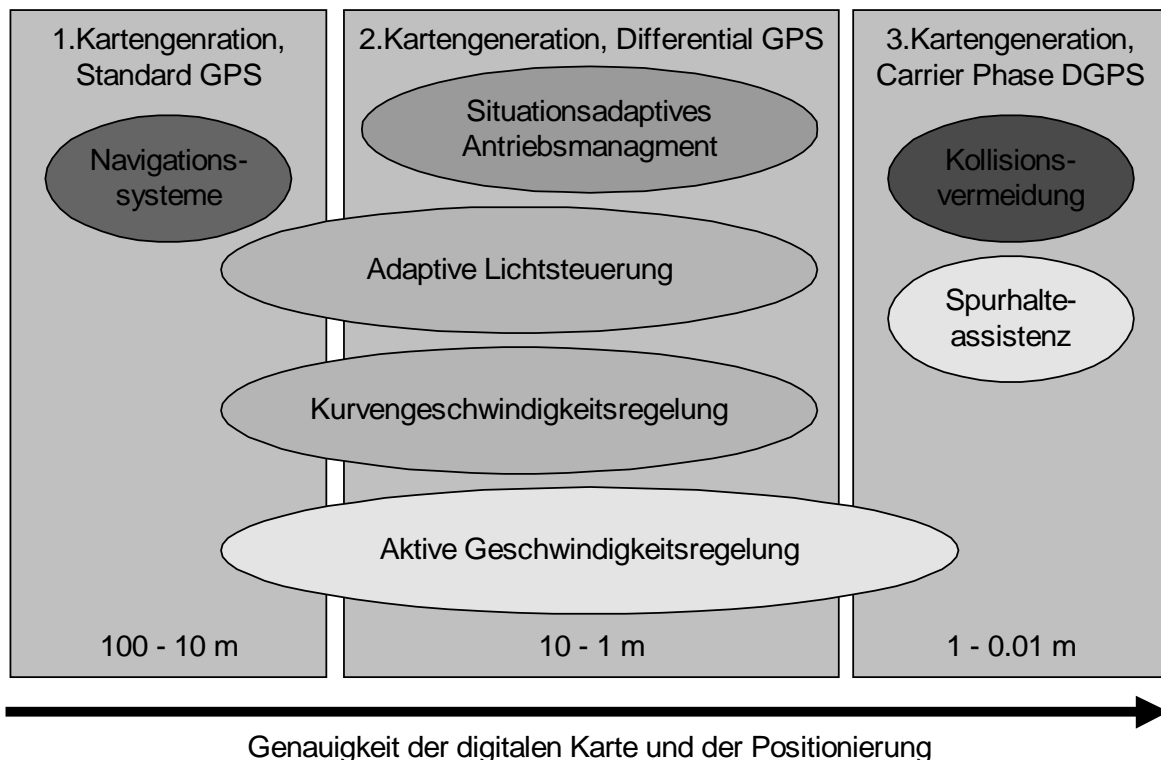


Abbildung 7-2: Übersicht der Anwendungen

Um die Längsregelungsanwendung auf ihre Gebrauchstauglichkeit zu untersuchen, wurden im Rahmen dieser Arbeit Testfahrten mit einer kleinen Anzahl von Versuchspersonen durchgeführt und diese anschließend mittels eines standardisierten Fragebogens befragt. Dabei sollte die Wirksamkeit unter realen Fahrbedingungen untersucht werden. Die Befragung bzw. die Testfahrten dienten dabei als Voruntersuchung für eine eventuell spätere umfassendere Testreihe mit einer größeren Stichprobe an Versuchspersonen und längeren Testfahrten. Im Vordergrund dieser Bewertung standen dabei die Fragen zur Akzeptanz der Geschwindigkeitsregelung - insbesondere hinsichtlich der Geschwindigkeitsregelung über das aktive Gaspedal - und einer angemessenen Informationsdarstellung der Systemzustände über das optische Display im Tacho.

Die Ergebnisse des Versuchs zeigten, dass die Versuchspersonen im Schnitt langsamer fahren als ohne System, ohne dies jedoch als störend zu empfinden. Das System hilft also, einen gleichmäßigeren Fahrstil einzuhalten. Die Informationsdarstellung über das aktive Gaspedal erhielt dabei sehr positive Bewertungen. Die Abstimmung der dargestellten Kräfte im Gaspedal sollte jedoch noch besser angepasst werden. Bei der Informationsdarstellung im Tacho waren sich die Versuchspersonen eher uneinig. Hier müsste noch ein durchgängigeres Konzept entwickelt werden. Schließlich sahen die Versuchspersonen die Anwendung als sinnvolle und konsequente Erweiterung bestehender Fahrerassistenzsystem an.

7.2. Ausblick

Im Zuge des Kommunikationszeitalters sind in naher Zukunft Online-Datenbanken vorstellbar, die kontinuierlich Korrekturen der digitalen Karte an das Fahrzeug übermitteln sowie aktuelle Informationen über Staus, Baustellen usw. liefern. Die Daten können dabei über zusätzliche Dienste auf den Radiofrequenzen (RDS) oder über DAB ins Auto übertragen werden. Dabei befindet sich im Fahrzeug nach wie vor eine digitale Karte mit den Basisdaten (statische Daten), die durch die Zentrale Datenbank ergänzt wird (siehe Abbildung 7-3).

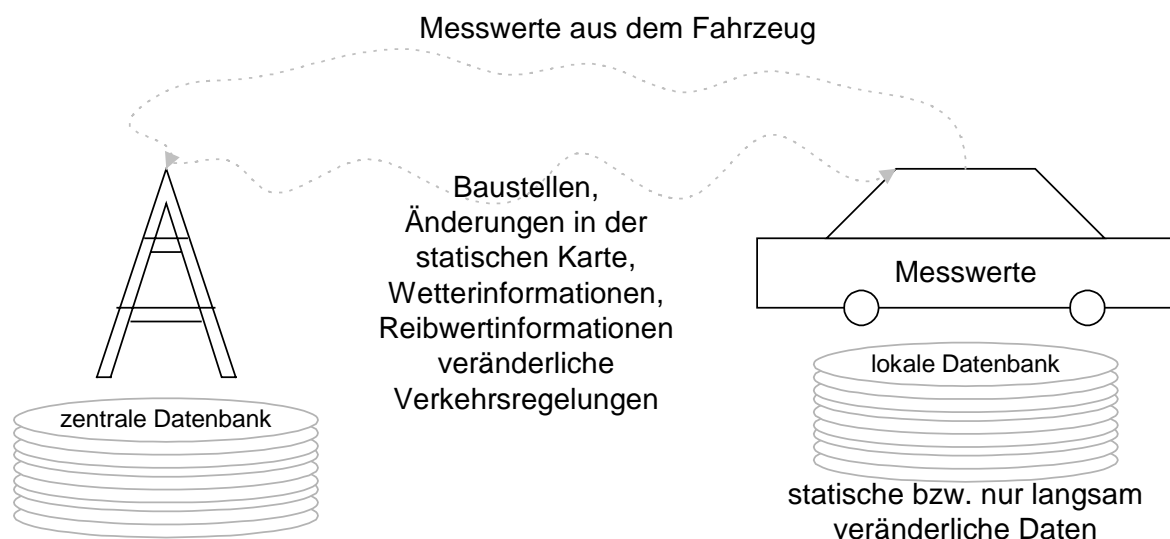


Abbildung 7-3: Online Datenbanken

Auf dem Rückweg können gleichzeitig Daten vom Fahrzeug zurück übertragen werden. Diese Daten können unmittelbar zur Erweiterung und Korrektur der zentralen Datenbank verwendet werden und würden so sämtlichen Verkehrsteilnehmer zur Verfügung stehen. Aus den Messungen zur Geometrie können so eventuelle Baustellen erkannt werden bzw. aus den gefahrenen Geschwindigkeiten auf Stau oder Gefahrstellen geschlossen werden. Prinzipiell kann jeder im Fahrzeug befindliche Sensor zur Umgebungserfassung wertvolle Informationen für die zentrale Datenbank und somit für den Folgeverkehr liefern. Die Daten aus dem Fahrzeug können auch jeweils gesammelt versendet werden, wenn das Fahrzeug wieder in der heimischen Garage steht. Dabei könnten auch kostengünstige Festnetzleitungen Verwendung finden. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der digitalen Karten würde so stark gesteigert. Gerade unter finanziellen Aspekten liegt in der automatischen Sammlung durch sehr viele Fahrzeuge ein großes Potential. Die heutigen digitalen Karten wurden zumeist in mühevoller Kleinarbeit aus Papierlandkarten erstellt. Mit diesen hier beschriebenen Erweiterungen könnten heute digitale Karten relativ kostengünstig auf die in der Arbeit beschriebenen Anforderungen gehoben werden.

Bei entsprechenden Bandbreiten könnte sogar komplett auf die lokale Datenbank verzichtet werden. Die Daten würden einfach für die geplante Strecke und einer kleinen Umgebung von der zentralen Datenbank bezogen. Die Übermittlung von veränderlichen Verkehrsregelungen ist ein weiterer wichtiger Punkt für die online-Erweiterungen. Insbesondere Geschwindigkeitsbeschränkungen von elektronischen Schildern sind eine unerlässliche Information zur Übernahme der Längsregelung. Vorstellbar wäre hier auch eine lokale Kommunikationseinrichtung für die unmittelbare Umgebung einer solchen Verkehrseinrichtung. Ähnliche Kommunikationseinrichtungen könnten auch den aktuellen Status von Verkehrsampeln übermitteln. Zwar richten sich Verkehrsampeln nach vorgegebenen Schaltzeiten, können diese aber in einem Bereich je nach Verkehrslage anpassen. Die notwendigen Eingangsgrößen erhalten die Ampelanlagen dabei aus Induktionsschleifen o.ä. Zur vollständigen Beurteilung der Straßeneigenschaften können zusätzlich Beschaffenheit und Art des Straßenbelages übermittelt werden. So wäre eine Berechnung des Reibwertes in einem beliebigen Vorausschaubereich möglich. Sowohl der Antrieb des Fahrzeuges als auch die Geschwindigkeit können so rechtzeitig angepasst werden. Ebenfalls könnten heftige Lenkbewegungen in diesem Bereich stärker gedämpft werden.

Im Bereich der Anwendungen für das in dieser Arbeit beschriebene Datenbanksystem können beinahe alle Fahrerassistanzanwendungen davon profitieren. Alle Assistenzsysteme müssen ihre Umgebung in irgendeiner Form erfassen. Je vollständiger die Beschreibung dabei ist, desto besser kann das System reagieren. Einige weitere Anwendungen sind dabei: virtuelle Sicht, DSC, Stop & Go Assistenz, Spurhalteunterstützung, Spurwechselassistent, Überholassistent, Kollisionswarnung, Kollisionsvermeidung und schließlich automatisches Fahren.

Literaturverzeichnis

- [Braess, Reichart, 1995] Braess, H.H., Reichart G., "Vision des intelligenten Automobils auf intelligenter Straße?", *ATZ* 97, Nr. 4 und 6, 1995
- [Bramer, Siffling, 1990] Bramer K., Siffling G., *Stochastische Grundlagen des Kalman-Bucy-Filters*, 1990
- [Brannolte, Holz, 1983] Brannolte U., Holz S., "Simulation des Verkehrsablaufs auf Landstraßen – Modellerweiterung-", *Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik*, Heft 402, 1983
- [Chaloupka, 1998] Chaloupka, C. et al., „Auswirkungen neuer Technologien im Fahrzeug auf das Fahrverhalten“, *Berichte der BAST Mensch und Sicherheit*, Heft M84. Bergisch Gladbach: BAST., 1998
- [Dickmanns, 1998] Dickmanns D., *Rahmensystem für visuelle Wahrnehmung veränderlicher Szenen durch Computer*, Shaker Verlag, 1998
- [Hamberger, 1999] Hamberger W., *Verfahren zur Ermittlung und Anwendung von prädikativen Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung*, VDI Fortschrittsbericht, Nr. 371 Reihe 12, 1999
- [Haschkamp, 1996] Haschkamp P., *Kartengestützte Fahrgeschwindigkeitsregelung beim Kraftfahrzeug und ihre Integration in die Adaptive Abstandsregelung*, RCS, 1996
- [Hibi, 1996] Hibi T., „Vision based extraction and recognition of road sign region from natural colour image, by using HSL and Co-Ordinates transformation“, *Isata Proceedings*, 1996
- [Hoffmann-Wellenhof, Lichtenegger, Collins, 1992] B. Hoffmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and J.Collins, *GPS Theory and Practice*, Springer-Verlag, Wien New York, 1992
- [Kaplan, 1996] Kaplan Elliot D., *Understanding GPS Principles and Applications*, Artech House Publishers, Boston London, 1996
- [Kockelke, Steinbrecher, 1987] Kockelke W., Steinbrecher J., „Fahrerverhaltensuntersuchungen zur Verkehrssicherheit im Bereich von Ortseinfahrten“, *Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Bereich Unfallforschung, 1987
- [Köppel, Bock, 1979] Köppel G., Bock H., "Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kurvigkeit", *Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik*, Heft 269, 1979
- [Krebs, Damianoff, 1983] Krebs H.G., Damianoff N., "Geschwindigkeitsverhalten bei Gefahrzeichen, in Kurven und an Stellen mit Geschwindigkeitbeschränkung", *Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik*, Heft 380, 1983

[Löwenau, 1998] Löwenau J., Bernasch J., Rieker H., Venhovens P., Huber J., Huhn W., Reich F., "Adaptive Light Control – A New Light Concept Controlled by Vehicle Dynamics and Navigation", *SAE 980007*, 1998

[Naab, 2000] Naab K., "Automatisierung im Straßenverkehr", *Automatisierungstechnik*, 5/2000, 2000

[Naab, 1998] Naab K., "Heading Control – Ein System zur Fahrerunterstützung bei der Spurhaltung", *Haus der Technik*, Essen, 1998

[Sekine 1995] Sekine H., Tamura K., Asanuma N., Sato M., "A Study of Self-Reliant Conering Speed Control System", *The 14th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Munich, Nr. 94-S3-0-05, 1995

[Tanaka, 1990] Tanaka J., Nobuta H., Itoh T., Tsunoda S., "Navigation System with Map-Matching Method", *SAE 900471*, 1990

[Venhovens, Naab, 1998] Venhovens P., Naab K., "Vehicle Dynamics Estimation Using Kalman Filters", *Proceedings of the 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)*, 1998

[Wandke & Rötting, 1998] Wandke H., Rötting M., "Arbeitskreis: Akzeptanz und Validierung", in Willumeit, H.-P. & Kolrep, H. (Hrsg.), "Wohin führen Unterstützungssysteme?", *Entscheidungshilfe und Assistenz in Mensch-Maschine-Systemen*, Sinzheim: Pro Universitate Verlag, 1998, S. 339-348

[Wevers, 1999] Kees Wevers et al., "Integratin of Driver Support Systems, the IN-ARTE Project", *ITS' 99 World Conference on Intelligent Transport Systems*, 1999

allgemeine Literatur

[Elsner, 1994] *Der Elsner, Handbuch für Straßen und Verkehrswesen*, Otto Elsner Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 1994

[RAS-L,N] *Richtlinien für die Anlage von Straßen*

Anhang

A. Befragung

A.1. Fragebogen

Name: _____

Geschlecht: m/w

Alter: _____

Führerschein seit: _____

Gefahrene km pro Jahr: _____

Anteil (%) Autobahn: _____

Privatfahrzeug: _____

Nur für BMW-Mitarbeiter:

Abteilung: _____ Aufgabengebiet (Ausbildung): _____

Schätzen Sie Ihren eigenen Fahrstil ein:**Langsam**
 nie/sehr selten selten manchmal häufig sehr häufig/immer
Sportlich
 nie/sehr selten selten manchmal häufig sehr häufig/immer
Zügig-aktiv
 nie/sehr selten selten manchmal häufig sehr häufig/immer
Zurückhaltend
 nie/sehr selten selten manchmal häufig sehr häufig/immer
Rasant
 nie/sehr selten selten manchmal häufig sehr häufig/immer
Gleitend-beherrscht
 nie/sehr selten selten manchmal häufig sehr häufig/immer

Systembeschreibung

Das System berechnet auf der Grundlage von Sensorinformationen eine situationsangepasste Geschwindigkeit und wird als Fahrerassistenz zur automatischen Geschwindigkeitsregelung bei folgenden Situationen eingesetzt:

- ⇒ Änderung der gesetzlichen Geschwindigkeit
- ⇒ Kurven
- ⇒ eingeschränkte Sichtweiten

Der Fahrer kann mit einem Parameter eine Überschreitung bzw. Unterschreitung der gesetzlichen Geschwindigkeit angeben und somit das Regelungsverhalten des Systems beeinflussen. Für den Versuch ist dieser Parameter auf eine Überschreitung von 10 km/h eingestellt. D.h. innerhalb einer Stadt lässt das System 60 km/h statt der vorgeschriebenen 50 km/h zu.

Bei Überschreiten dieser Wunschgeschwindigkeit wird Ihre Ist-Geschwindigkeit durch das System automatisch geregelt.

Das Überschreiten dieser Wunschgeschwindigkeit wird Ihnen durch einen veränderten Druckpunkt am Gaspedal (aktives Gaspedal) und gegebenenfalls einer Bremsung mitgeteilt (ähnlich wie bei der Abstandsregelung auf ein vorausfahrendes Objekt).

Während der Testfahrt sollen Sie folgende Punkte beachten:

1. Sie sind jederzeit für Ihr Fahrzeug verantwortlich. Das System ist ausschliesslich als Fahrerassistenz vorgesehen!
2. Selbstverständlich hat die Straßenverkehrsordnung immer Vorrang!
3. Versuchen Sie soweit wie möglich Ihren gewohnten Fahrstil beizubehalten!

Mit den folgenden Fragen wollen wir von Ihnen wissen, wie Sie die **Geschwindigkeitsregelung** durch das System "**erfahren**" haben:

Beim Abbremsen **durch das System**:
wie empfinden Sie die Bremsbeschleunigung?

zu schwach <input type="checkbox"/>	angemessen <input type="checkbox"/>	zu stark <input type="checkbox"/>
--	--	--------------------------------------

Beim **eigenen** Beschleunigen:
wie empfinden Sie den Druckpunkt am Gaspedal?

zu schwach <input type="checkbox"/>	angemessen <input type="checkbox"/>	zu stark <input type="checkbox"/>
--	--	--------------------------------------

Wie empfinden Sie die vom System geregelte Geschwindigkeit:

a) in den Kurven

zu langsam <input type="checkbox"/>	angemessen <input type="checkbox"/>	zu schnell <input type="checkbox"/>
--	--	--

b) bei unübersichtlichem Straßenverlauf

zu langsam <input type="checkbox"/>	angemessen <input type="checkbox"/>	zu schnell <input type="checkbox"/>
--	--	--

c) am Ortsanfang

zu langsam <input type="checkbox"/>	angemessen <input type="checkbox"/>	zu schnell <input type="checkbox"/>
--	--	--

d) während der Ortsdurchfahrt

zu langsam <input type="checkbox"/>	angemessen <input type="checkbox"/>	zu schnell <input type="checkbox"/>
--	--	--

e) am Ortsende

zu langsam <input type="checkbox"/>	angemessen <input type="checkbox"/>	zu schnell <input type="checkbox"/>
--	--	--

War für Sie in allen Fahrsituationen klar, in welchem Zustand sich das System befindet?

nein <input type="checkbox"/>	ja <input type="checkbox"/>
----------------------------------	--------------------------------

In welchen Fahrsituationen war Ihnen der Systemzustand **nicht** klar:

Hat das System in allen Fahrsituationen gleich verhalten?

nein <input type="checkbox"/>	ja <input type="checkbox"/>
----------------------------------	--------------------------------

In welcher Fahrsituation hat sich das System **anders** verhalten:

Gab es Fahrsituationen, in denen Sie sich unwohl gefühlt haben?

nein <input type="checkbox"/>	ja <input type="checkbox"/>
----------------------------------	--------------------------------

Zu starkes Bremsen in: _____

Zu **hohe** Geschwindigkeit in: _____

Zu **niedrige** Geschwindigkeit in: _____

Sie haben soeben in einer kurzen Testfahrt das System in verschiedenen Situationen getestet. Im folgenden sollen Sie die **Eignung des Systems** beurteilen.

Unter Eignung verstehen wir,:

- 1) daß das System leicht zu nutzen ist, d.h. inwieweit das System vom Fahrer so verwendet werden kann, daß es die vorgesehenen Funktionen angemessen erfüllt (**Gebrauchstauglichkeit**); **und gleichzeitig**
- 2) daß das System verkehrssicher ist, d.h. daß die Aufmerksamkeit, die der Fahrer dem Fahrerassistenzsystem widmen muß, mit den Erfordernissen der jeweiligen Verkehrssituation vereinbar bleibt (**Verkehrssicherheit**).

Uns interessiert Ihre Meinung bezüglich der Eignung spezifischer Aspekte des Systems:

- ⇒ Das **aktive Gaspedal**
- ⇒ Den Informationsgehalt der **Rückmeldungen** über das aktive Gaspedal
- ⇒ Die Informationsdarstellung der Systemzustände im **Tachometer**

Geben Sie bitte immer zuerst Ihre Note ab, danach eventuelle Anmerkungen!

1. Das aktive Gaspedal

Gebrauchstauglichkeit	→	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 15%;">sehr gut</td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;">ungenügend</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td></td> </tr> </table>	sehr gut						ungenügend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1	2	3	4	5	6	
sehr gut						ungenügend																	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																	
1	2	3	4	5	6																		
Verkehrssicherheit	→	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 15%;">sehr gut</td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;">ungenügend</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td></td> </tr> </table>	sehr gut						ungenügend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1	2	3	4	5	6	
sehr gut						ungenügend																	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																	
1	2	3	4	5	6																		
		↓																					

Zur Gebrauchstauglichkeit:

Zur Verkehrssicherheit:

2 Der Informationsgehalt der Rückmeldungen über das aktive Gaspedal

Gebrauchstauglichkeit	→	<table border="1"><tr><td colspan="4">sehr gut</td><td colspan="2">ungenügend</td></tr><tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr></table>	sehr gut				ungenügend		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1	2	3	4	5	6
sehr gut				ungenügend																
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>															
1	2	3	4	5	6															
Verkehrssicherheit	→	<table border="1"><tr><td colspan="4">sehr gut</td><td colspan="2">ungenügend</td></tr><tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr></table>	sehr gut				ungenügend		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1	2	3	4	5	6
sehr gut				ungenügend																
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>															
1	2	3	4	5	6															

↓

Zur Gebrauchstauglichkeit:

Zur Verkehrssicherheit:

3. Die Informationsdarstellung der Systemzustände im Tachometer

Gebrauchstauglichkeit	→	<table border="1"><tr><td colspan="4">sehr gut</td><td colspan="2">ungenügend</td></tr><tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr></table>	sehr gut				ungenügend		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1	2	3	4	5	6
sehr gut				ungenügend																
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>															
1	2	3	4	5	6															
Verkehrssicherheit	→	<table border="1"><tr><td colspan="4">sehr gut</td><td colspan="2">ungenügend</td></tr><tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr></table>	sehr gut				ungenügend		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1	2	3	4	5	6
sehr gut				ungenügend																
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>															
1	2	3	4	5	6															

↓

Zur Gebrauchstauglichkeit:

Zur Verkehrssicherheit:

Bei den abschließenden **8 Fragen** interessiert uns, wie das *System auf Sie wirkt* und *wie das System Ihr Fahren beeinflusst*. Versuchen Sie in den folgenden Fragen immer zuerst *das System als Ganzes* mit einem Rating zu beurteilen, eventuelle Details können Sie als Bemerkungen notieren!

Trifft eine Frage Ihrer Meinung nach nicht auf das System zu, kreuzen Sie dies im entsprechenden Feld an und gehen Sie bitte zur nächsten Frage!

1) In welchem Ausmaß mussten Sie sich auf Informationen des Systems konzentrieren?

Sehr schwach						sehr stark	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	2	3	4	5	6	7	

↓

2) Wurden die Informationen durch das System für Sie zum richtigen Zeitpunkt dargeboten?

Trifft nicht zu

Sehr exakt						sehr ungenau	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	2	3	4	5	6	7	

↓

3) Fühlten Sie sich durch das System unter Zeitdruck gesetzt (z.B. durch Anweisungen, Feedback)?

Trifft nicht zu

Überhaupt nicht						total	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	2	3	4	5	6	7	

↓

4) Waren die durch das System dargebotenen Informationen verständlich?

Sehr gut						sehr schlecht	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	2	3	4	5	6	7	

↓

5) *Wie stark hat Sie die Nutzung von Informationen durch das System von den jeweiligen Fahraufgaben abgelenkt?*

Sehr gering						sehr stark
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	2	3	4	5	6	7

6) *Wie reagiert das System auf mögliche Fehler von Ihrer Seite?*

Trifft nicht zu

Sehr gut						sehr schlecht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	2	3	4	5	6	7

7) *Wurde Ihr gewohnter Fahrstil durch die Nutzung des Systems beeinflusst?*

Sehr positiv						sehr negativ
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	2	3	4	5	6	7

8) *Hat die Nutzung der durch das System dargebotenen Informationen Ihr Fahrerleben beeinflusst?*

Sehr positiv						sehr negativ
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	2	3	4	5	6	7

Schätzen Sie Ihren eigenen Fahrstil mit dem System ein:

Langsam <input type="checkbox"/> nie/sehr selten	<input type="checkbox"/> selten	<input type="checkbox"/> manchmal	<input type="checkbox"/> häufig	<input type="checkbox"/> sehr häufig/immer
Sportlich <input type="checkbox"/> nie/sehr selten	<input type="checkbox"/> selten	<input type="checkbox"/> manchmal	<input type="checkbox"/> häufig	<input type="checkbox"/> sehr häufig/immer
Zügig-aktiv <input type="checkbox"/> nie/sehr selten	<input type="checkbox"/> selten	<input type="checkbox"/> manchmal	<input type="checkbox"/> häufig	<input type="checkbox"/> sehr häufig/immer
Zurückhaltend <input type="checkbox"/> nie/sehr selten	<input type="checkbox"/> selten	<input type="checkbox"/> manchmal	<input type="checkbox"/> häufig	<input type="checkbox"/> sehr häufig/immer
Rasant <input type="checkbox"/> nie/sehr selten	<input type="checkbox"/> selten	<input type="checkbox"/> manchmal	<input type="checkbox"/> häufig	<input type="checkbox"/> sehr häufig/immer
Gleitend-beherrscht <input type="checkbox"/> nie/sehr selten	<input type="checkbox"/> selten	<input type="checkbox"/> manchmal	<input type="checkbox"/> häufig	<input type="checkbox"/> sehr häufig/immer

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

A.2. Kommentare der Versuchspersonen

Vp	Systemzustand: Transparenz	Systemzustand: Konsistenz	"unwohl gefühlt..."
1	Gewöhnungsphase, Übergänge nicht immer klar	unterschiedliche Dynamik (?) in Kurven	
4	Beim Ausfahren aus Abbiegesituationen liegt der Gaspedaldruckpunkt zu nahen am Fuß (zu stark!)		
5	Druckpunkt nach Abbiegen		Zu hohe Geschwindigkeit nach Ortsausfahrt mit Kuppe Zu niedrige Geschwindigkeit nach Abbiegen
6		Stop an Kreuzung/Einfahrt und dann beschleunigen	
7		Bei sensorbedingten Fahregelungen, entspricht teilweise nicht der Erwartungshaltung	
8	Viele Funktionen auf einmal und wenig Fahrerfahrung damit		Zu hohe Geschwindigkeit am Ortseingang Zu niedrige Geschwindigkeit beim Abbiegen
9		Gleichzeitig Kurve und Geschwindigkeitsbegrenzung war Priorität nicht klar	Zu hohe Geschwindigkeit am Ortseingang
10			Zu hohe Geschw. in unübersichtlichen Kurven
11	Anzeigekonzept mit ACC nicht immer durchschaubar: vor allem beim Kurvenfahren hinter einem Auto: gelb oder nicht gelb?	Es gab eine oder zwei Kurven, wo v zu hoch oder zu niedrig war	Zu hohe Geschw. in scharfer Kurve Zu niedrige Geschw. beim Verlassen einer Kurve
12		Kurvengeschw./Querbeschl. Nicht immer passend	Zu hohe v in versehentlich überdrückten Kurven Zu Niedrige v in Kurven mit großem Radius
13			Zu hohe Geschw. bei engen Kurven im Ort Zu niedrige v bei übersichtlichen Ortsausfahrten (vorausfahrende Fz schneller!)
14			Ortsausfahrt: v viel zu früh zu hoch Manchmal (situationsabhängig) 70 statt 60 km/h angenehmer

Aktives Gaspedal

Vp	Gebrauchstauglichkeit	Verkehrssicherheit
1	Die mechanische Abstimmung (Kraftverlauf) müsste weichere Übergänge zulassen, so dass das Feedback an den Fahrer transparenter wird	Nach der Lernphase führt das System zu einer entspannteren Fahrweise
2	Der rechte Fuß ist "aufgeräumt", so dass ein Eingriff jederzeit problemlos erfolgen kann	Besser als ACC, da Fuß vom Gas = Fzg wird langsamer Aufmerksamkeit des Fahrers bleibt erhalten und wird immer aktiviert durch Druckpunktverstellung
7	Prinzipiell gute Hilfe, wenn die haptische Rückmeldung deutlich verbessert wird. Kraftrampen evtl. der Fahrsituation anpassen, die Umweltinformation hierfür liegen im Prinzip vor	
8		Abbiegen übertreten braucht viel Kraft!
9	Aufbau Gegendruck ist manchmal etwas zögerlich	Stärkerer Gegendruck nötig bei zu schnellem Einfahren in Orte
12	Verfeinerung der Geschwindigkeitsvorgabe	Druckpunkt ggf. schwächer beim Überholen
13	Der Druckpunkt ist zu stark. Die starken Schwankungen aufgrund des Gangwechsels stören	Aktives Gaspedal suggeriert eine hohe Kenntnis über die Verkehrsszene, die nicht gegeben ist
14	Evtl. Übergänge im aktiven Gaspedal anstatt ein/aus (z.B. vor Kurven) Manchmal Einbremsen nicht entsprechend	

Informationsgehalt der Rückmeldungen über das aktive Gaspedal

Vp	Gebrauchstauglichkeit	Verkehrssicherheit
1	Kraftabstimmung müsste geändert werden	Positiv: Fahrer bekommt ohne Sichtkontakt Informationen über die aktuelle Umgebung (Ortseinfahrten)
2	Insbesondere Druckpunktverschiebung Richtung höherer Geschwindigkeit gut; in die andere Richtung vielleicht etwas zu schwach	
7	Aufgrund der schlechten Haptik ist die G. stark eingeschränkt (hohe Kräfte beim Überdrücken und halten). Unruhige Regelvorgänge bei Druckpunktänderung	Teilweise hoher Regelaufwand beim Beschleunigen (Zeitverzug!)
8	Für Normalfahrer viel zu viel Info (als Entwicklungswerkzeug i.O.)	Lenkt ziemlich ab
9	Falls Fuß nicht auf dem Pedal ist, merkt man den Bremsengriff des Systems relativ spät	Differenzierungsmöglichkeit der Signale bei unterschiedlichen Gefährdungspotentialen fehlt
10		Druckpunkt war teilweise sehr hart
11	Nur bei Folgefahren zu nervös	Übertreten zu schwer. Probleme beim Überholen (evtl. über Blinker Druckpunkt wegnehmen)
13	Intuitive Rückmeldung Zu starke Rückmeldung bei Gangwechsel	Spiegelt zu viel Wissen wider. Man verlässt sich zu stark auf die Geschwindigkeitsempfehlung

Informationsdarstellung der Systemzustände im Tachometer

Vp	Gebrauchstauglichkeit	Verkehrssicherheit
1	Evtl. Überstrahlung bei Nacht (viele LEDs), Gewöhnungsphase	Evtl. wird der Fahrer durch die dynamischen Informationen zu stark abgelenkt Würde sich mit Serien-ACC schlecht kombinieren lassen (wegen Übernahmeaufforderung)
2	Nach Erklärung zur Bedeutung der Farben, etc. leicht zu verstehen. Gut ablesbar	Tacho kann ohne große Aufmerksamkeit quasi im Hintergrund gelesen werden.
5		Wenn die Aufmerksamkeit des Fahrers gefordert ist (Abbiegen, Ort) schaut man nicht auf den Tacho!
6	LED-Anzeige muß verstanden werden!	
7	Info gut dargestellt und Infogehalt transparent	Info hilfreich beim Fahren
9	Anzeige ist überfrachtet, grün und gelb der LEDs ist schwer unterscheidbar	
11	Modi Operandi nicht immer eindeutig: weniger Info wäre vielleicht besser	Kann zu viel ablenken
12	"Entwicklungswerkzeug"	"Tannenbaum"-Tacho eher störend Ausfall ggf. deutlicher anzeigen
13	Die LEDs sind zu hell, man wird dadurch abgelenkt	

Abschlußfragen

Vp	1) Konzentration auf System
1	<i>Sehr schwach:</i> Notwendige Infos durch aktives Gaspedal, ansonsten schon mehr Blickkontakte zum Kombi, aber nur unwesentlich mehr als bei normaler ACC-Fahrt
2	<i>Schwach:</i> Anfangs etwas stärker, später nicht mehr
9	<i>Eher schwach:</i> Grund für Gegendruckabbau im Ort, sofern man das Ortsende-Schild noch gar nicht sah, war nicht nachzuvollziehen

Vp	2) Zeitpunkt Information
2	<i>Eher exakt:</i> leider viel Folgefahrt
9	<i>Eher exakt:</i> Ortseinfahrt zu spät, Ortsausfahrt teilweise zu früh, Geschwindigkeitsbegrenzung während Kurvenfahrt zu früh
12	<i>Exakt:</i> selten etwas zu spät

Vp	3) Zeitdruck durch System
1	<i>Überhaupt nicht:</i> ich empfinde hier keine Bevormundung durch das System

Vp	4) Infos verständlich
4	<i>Eher gut:</i> man merkt eine gewisse Vorsorge-Funktion, auch falls nicht immer eine direkte Proportionalität der Reaktion zur späteren Auslösebedingung besteht
11	<i>Eher gut:</i> nicht immer eindeutig: mittleres bis starkes Schwanken des Druckpunktes beim Hinterherfahren. Beim Anfahren muß Pedal kräftig übertreten werden.

Vp	5) Ablenkung durch System
11	<i>Gering:</i> nur bei uneindeutiger Rückmeldung

Vp	6) Fehlermanagement des Systems
4	<i>Trifft nicht zu:</i> ist von Fahr- und Bedienfehlern unabhängig
6	<i>Sehr gut:</i> wichtig bei Geschwindigkeitsbegrenzungen
8	<i>Trifft nicht zu:</i> Fahrer macht keine Fehler, er entscheidet anders als das System. Er muß es auch verantworten
9	<i>Weder/noch:</i> zu geringe Abhängigkeit der Gegendruck- bzw. Verzögerungsfunktion von dem "Feherausmaß"
12	<i>Eher gut:</i> bei versehentlichem Überdrücken abgeschwächte (keine?) Rückmeldung

Vp	7) Beeinflussung Fahrstil
1	<i>Positiv:</i> ruhige gelassene Fahrweise
2:	<i>Eher positiv:</i> gar nicht, eher positiv
4	<i>Positiv:</i> in Richtung "angemessene Fahrweise"
8	<i>Eher negativ:</i> man wird nachlässig (Verkehrsschilder!), System gibt ja acht!
10	<i>Eher positiv:</i> rücksichtsvoller in Ortsschaften
12	<i>Positiv:</i> langsamer
13	<i>Eher positiv:</i> mit dem System bin ich wesentlich gleichmäßiger und langsamer gefahren

Vp	8) Beeinflussung Fahrerleben
8	<i>Eher negativ:</i> System zu komfort-orientiert, wäre sportlicher gefahren
9	<i>Positiv:</i> Die Funktionalität bzgl. Kurvengeschwindigkeitsbegrenzung vermittelt den Eindruck, vorausschauender fahren zu können
12	<i>Weder/noch:</i> z.Teil etwas lahm
13	<i>Eher positiv:</i> durch das langsamere Fahren habe ich mich mehr auf die Landschaft und den Beifahrer konzentrieren können

