

Automobile Zukunft

Hauptseminar Realzeit-Computersysteme
Sommersemester 2004

Seminarband

Automobile Zukunft

Seminarband

Ausgeführt am Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme
Technische Universität München
Prof. Dr.-Ing. Georg Färber

Hauptseminar Realzeit-Computersysteme
Sommersemester 2004

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Von der Fahrassistenz zum kognitiven Automobil | 3 |
| 2.1 Einleitung | 4 |
| 2.1.1 Ziele von Fahrerassistenzsystemen | 4 |
| 2.1.2 Kategorisierungsmöglichkeiten | 4 |
| 2.2 Fahrerassistenzsysteme von heute | 5 |
| 2.2.1 Fahrerassistenzsysteme im Bereich Komfort | 5 |
| 2.2.2 Fahrerassistenzsysteme im Bereich Sicherheit | 6 |
| 2.3 Entwicklungstrends | 7 |
| 2.3.1 Komfortbereich | 7 |
| 2.3.2 Sicherheit | 8 |
| 2.4 Roadmap | 9 |
| 2.5 Ausblick - Langfristige Visionen | 11 |
| 2.5.1 Das sensitive und kognitive Fahrzeug | 11 |
| 2.5.2 Autonomes Fahren: Akzeptanzprognosen und Anwendungsbereiche | 12 |
| 2.6 Zusammenfassung | 12 |
| 3 Alternative Antriebe | 17 |
| 3.1 Einleitung | 18 |
| 3.2 Motivation | 18 |
| 3.2.1 Umweltprobleme | 18 |
| 3.2.2 Gesundheitsprobleme | 20 |
| 3.2.3 Ressourcenknappheit und steigender Verbrauch | 21 |
| 3.2.4 Preisentwicklung und Politische Abhängigkeit | 22 |
| 3.3 Verbrauchsoptimierter ULEV-Standard | 22 |
| 3.4 Gasantriebe | 23 |
| 3.4.1 Technik | 24 |
| 3.4.2 Bivalente und Monovalente Gasfahrzeuge | 25 |
| 3.4.3 Erdgasfahrzeuge | 26 |
| 3.4.4 Autogasfahrzeuge | 26 |
| 3.4.5 Das Wasserstoffauto | 26 |
| 3.4.6 Biogas | 27 |
| 3.4.7 Das Aircar | 28 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.5 | Biomasse | 29 |
| 3.5.1 | Biogas | 30 |
| 3.5.2 | Pflanzenöle | 30 |
| 3.5.3 | Biodiesel | 30 |
| 3.6 | Hybridantriebe | 31 |
| 3.7 | Zusammenfassung | 33 |
| 4 | Fahrzeugsensorik (I): Radar, Lidar, Ultraschall und Video | 39 |
| 4.1 | Einleitung | 40 |
| 4.2 | Physikalische Messprinzipien | 41 |
| 4.2.1 | Laufzeitmessung | 41 |
| 4.2.2 | Dopplereffekt | 41 |
| 4.3 | RADAR (RAdio-Detection-And-Ranging) | 42 |
| 4.3.1 | Fernbereichsradar | 42 |
| 4.3.2 | Nahbereichsradar | 43 |
| 4.4 | LIDAR (LIGht-Detection-And-Ranging) | 44 |
| 4.5 | Ultraschall | 45 |
| 4.6 | Infrarot | 46 |
| 4.6.1 | Fernbereich FIR (Far-Infrared-Radiation) | 46 |
| 4.6.2 | Nahbereich NIR (Near-Infrared-Radiation) | 47 |
| 4.7 | Video | 48 |
| 4.8 | Zusammenfassung | 48 |
| 5 | Bildverarbeitung im Fahrzeug | 53 |
| 5.1 | Einleitung | 54 |
| 5.2 | Kamermerkmale | 54 |
| 5.2.1 | CCD (Charged Coupled Devices) Sensoren | 54 |
| 5.2.2 | CMOS (Complementary Metal Oxid Semiconductor) Sensoren | 55 |
| 5.3 | Bildverarbeitende Fahrassistenzsysteme | 56 |
| 5.3.1 | Rückfahrkamera als Einparkhilfe | 56 |
| 5.3.2 | Insassenerkennung | 57 |
| 5.3.3 | Fahraufmerksamkeitsassistent | 58 |
| 5.3.4 | Erkennung von Straßenschildern | 58 |
| 5.3.5 | Überwachung des toten Winkels | 58 |
| 5.3.6 | Stop and Go Assistent | 59 |
| 5.3.7 | Lane Departure Warning LDW, Lane Keeping Support LKS, Spurwechselassistent SWA | 59 |
| 5.4 | Funktionsweise visueller Sensorik am Beispiel LDW | 60 |
| 5.5 | Zusammenfassung und Ausblick | 63 |
| 6 | Fahrzeugsensorik (II): GPS, Galileo, Inertialsensoren und Co. | 67 |
| 6.1 | Global Navigation Satellite System (GNSS) | 68 |
| 6.1.1 | Prinzipien | 68 |
| 6.1.2 | Global Positioning System (GPS) | 69 |
| 6.1.3 | Differenziales GPS (D-GPS) | 71 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.1.4 | Galileo | 71 |
| 6.1.5 | Anwendungen | 72 |
| 6.2 | Inertialsensoren | 72 |
| 6.2.1 | Radsensoren | 73 |
| 6.2.2 | Beschleunigungssensoren | 75 |
| 6.2.3 | Kreisel | 77 |
| 6.2.4 | Anwendungen | 79 |
| 6.3 | Zusammenfassung | 80 |
| 7 | Digitale Karten und Routenplanung | 83 |
| 7.1 | Einführung | 84 |
| 7.2 | Digitale Karten | 85 |
| 7.2.1 | Geschichtliche Entwicklung digitaler Karten | 85 |
| 7.2.2 | Grundlagen zur Speicherform digitaler Karten | 86 |
| 7.2.3 | Aktuell treibende Kräfte und heutiger Datenbestand | 88 |
| 7.2.4 | Erfassung und Digitalisierung | 88 |
| 7.2.5 | Problematiken digitaler Karten | 89 |
| 7.3 | Navigation und Routenplanung | 90 |
| 7.3.1 | Lokalisierung und Map-Matching | 90 |
| 7.3.2 | Routenplanung | 93 |
| 7.4 | Digitale Karten und Routenplanung: Schlussbemerkung | 95 |
| 8 | X-by-Wire im Fahrzeug | 99 |
| 8.1 | Einleitung | 100 |
| 8.1.1 | Warum X-by-Wire | 100 |
| 8.1.2 | Definition | 100 |
| 8.1.3 | EHS | 100 |
| 8.1.4 | EMS | 101 |
| 8.1.5 | Vorteile | 101 |
| 8.1.6 | Nachteile | 101 |
| 8.2 | Einzelsysteme | 102 |
| 8.2.1 | Steer-by-Wire | 102 |
| 8.2.2 | Brake-by-Wire | 104 |
| 8.2.3 | Throttle-by-Wire | 107 |
| 8.2.4 | Gear/Shift-by-Wire | 109 |
| 8.3 | Drive-by-Wire | 111 |
| 8.3.1 | Heute | 111 |
| 8.3.2 | Zukunft von Drive-by-Wire-Systemen | 112 |
| 8.4 | Entwicklung und Zukunft | 112 |
| 9 | Fahreroptimierte Mensch-Maschine-Schnittstelle | 117 |
| 9.1 | Einleitung | 118 |
| 9.2 | Die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) | 118 |
| 9.2.1 | Was ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle? | 118 |
| 9.2.2 | Modalitäten der MMS | 119 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 9.3 | Entwicklung einer MMS | 120 |
| 9.3.1 | Ziele der Entwickler | 121 |
| 9.3.2 | Aufgaben der Entwickler | 122 |
| 9.3.3 | Bewertungsrichtlinien für die MMS | 124 |
| 9.4 | Umsetzung | 126 |
| 9.4.1 | Moderne Ansätze | 126 |
| 9.4.2 | Neue Technologien | 128 |
| 9.5 | Zusammenfassung | 131 |
| 9.6 | Ausblick | 131 |
| 10 | Verkehrsflußmodellierung: Ziele und Techniken | 135 |
| 10.1 | Motivation | 136 |
| 10.2 | optimierbare Projekte | 136 |
| 10.3 | Verkehrszustände | 137 |
| 10.4 | Wie entsteht ein Stau? | 137 |
| 10.5 | Phasenverlauf | 138 |
| 10.6 | Meßmethoden | 139 |
| 10.7 | Verkehrsflußmodelle | 140 |
| 10.7.1 | Makroskopisches Verkehrsflußmodell | 141 |
| 10.7.2 | Mikroskopisches Verkehrsflußmodell | 142 |
| 10.8 | Schluß | 146 |
| 11 | Dynamische Verkehrsleitsysteme | 149 |
| 11.1 | Einleitung | 150 |
| 11.2 | Schematischer Aufbau eines Verkehrsleitsystems | 151 |
| 11.3 | Sensorik | 151 |
| 11.3.1 | Statische Sensoren | 152 |
| 11.3.2 | Mobile Sensoren | 155 |
| 11.4 | Medien | 156 |
| 11.4.1 | Wechselschilder | 156 |
| 11.4.2 | Funkbasierte Medien | 157 |
| 11.5 | Verarbeitung | 158 |
| 11.6 | Beispiele | 159 |
| 11.6.1 | Verkehrs-Management-Zentrale Berlin | 159 |
| 11.6.2 | Traffic Dialog System (TDS) | 159 |
| 12 | Mautsysteme | 163 |
| 12.1 | Einleitung | 164 |
| 12.1.1 | Ziele einer Maut | 164 |
| 12.1.2 | Generelle Mautarten | 164 |
| 12.1.3 | Moderne Anforderungen an ein Mautsystem | 165 |
| 12.2 | City-Maut in London | 166 |
| 12.2.1 | Die Ausgangslage | 166 |
| 12.2.2 | Die technische Lösung | 167 |
| 12.2.3 | Der Zugang | 167 |

| | |
|--|------------|
| 12.2.4 Der Erfolg | 167 |
| 12.3 LKW-Maut in Deutschland | 168 |
| 12.3.1 Einleitung | 168 |
| 12.3.2 Die Theorie | 168 |
| 12.3.3 Problem 1: Der Zugang | 169 |
| 12.3.4 Problem 2: GPS | 169 |
| 12.3.5 Problem 3: Die Kontrolle | 170 |
| 12.3.6 Problem 4: Rechtliche Probleme und Datenschutz | 172 |
| 12.3.7 Ausblick und Ursachenforschung | 172 |
| 12.3.8 Ein Alternatives System: LKW-Maut in Österreich | 174 |
| 12.3.9 Bilder und Grafiken | 174 |
| 13 Die Zukunft des Individualverkehrs: Konzepte und Chancen | 181 |
| 13.1 Einleitung | 182 |
| 13.2 Entwicklungen | 182 |
| 13.2.1 Fahrzeugbestand | 182 |
| 13.2.2 Treibstoffverbrauchs | 183 |
| 13.2.3 Regenerative Energien | 184 |
| 13.2.4 Emissionen | 184 |
| 13.2.5 Bevölkerungsentwicklung | 185 |
| 13.3 Konzepte | 186 |
| 13.3.1 Gesetzgeber | 187 |
| 13.3.2 Wirtschaft | 188 |
| 13.4 Chancen | 189 |

Kapitel 1

Einleitung

Dieser Seminarband entstand im Rahmen der Lehrveranstaltung „Hauptseminar Realzeit-Computer-Systeme“ im Sommersemester 2004. Die Arbeiten erscheinen inhaltlich so, wie sie von den Studenten abgegeben worden sind.

Kapitel 2

Von der Fahrassistenz zum kognitiven Automobil

Über den Autor

Till Heinrich studiert zur Zeit im 12. Semester Elektro- und Informationstechnik an der TU München.

2.1 Einleitung

Die Fahrassistenz ist ein Thema mit langer Tradition im Automobilbau. Wir alle kennen Urassistenzsysteme wie elektrische Scheibenwaschanlage, elektrisch aktiverter Anlasser, Automatikgetriebe, ect.. Fahrassistenzsysteme erhalten in Zeiten immer dichter werdenden Verkehrs bei gleichzeitigem Wunsch nach sinkenden Unfallszahlen einen immer höheren Stellenwert. Schlagwörter wie ESP, ACC, PDC, usw. werden zunehmend zu gewichtigen Verkaufargumenten der Automobilhersteller.

Diese Seminararbeit soll ein wenig Licht in den Abkürzungsdschungel bei bereits existierenden Fahrerassistenzsystemen bringen, außerdem die kurz- und mittelfristig zu erwartenden Entwicklungstrends beleuchten und schließlich einen Ausblick in die Zukunft wagen.

2.1.1 Ziele von Fahrerassistenzsystemen

Fahrerassistenzsysteme haben unterschiedliche Zielsetzungen und Aufgaben. Sie sollen Defizite bei der Aufnahme von relevanten Fahrerinformationen beseitigen. Weiterhin sollen sie helfen Fehlhandlungen des Fahrers zu vermeiden. Treten dennoch Fahrfehler auf, sollen deren Folgen gemindert werden. Ein weitere Aufgabe ist außerdem, die Beanspruchung des Fahrers durch Über- oder Unterforderung abzubauen.

[Lan] All diese Ziele dienen dazu den Fahrspaß und die Sicherheit des Autolenkers zu erhöhen und sollen nicht zuletzt dazu beitragen, das ehrgeizige Ziel der Europäischen Kommission, nämlich bis zum Jahr 2010 die Zahl der Verkehrstoten im EU-Raum um 50 zu reduzieren, zu erfüllen.

2.1.2 Kategorisierungsmöglichkeiten

Fahrerassistenzsysteme lassen sich in unterschiedliche Gruppen oder Kategorien einteilen. Eine klare Zuordnung ist jedoch bei den meisten Applikationen nicht möglich, d.h. viele Assistenzsysteme gehören mehreren Kategorien gleichzeitig an.

Die erste Einteilungsmöglichkeit wäre die nach Komfort und Sicherheit. Beim Begriff Sicherheit wird außerdem zwischen aktiver Sicherheit, also der Unfallvermeidung dienend, und passiver Sicherheit, also die Unfallfolgen mindernd, unterschieden. Der Übergang zwischen Komfort und Sicherheit ist fließend, so rechnet man z.B. eine ACC (Adaptive Cruise Control, siehe unten) mit 0.2g Verzögerung den Komfortsystemen zu, ab einem Wert von 1g oder mehr gilt sie als Sicherheitssystem [Fre]. Die nächste Möglichkeit der

Kategorisierung wäre die Unterscheidung nach Navigation, Führung und Eingriff. Wählt man den Automatisierungsgrad als Kriterium, so bezeichnet man die Systeme als informierend, automatisch agierend, autonom intervenierend oder autonom. Außerdem muß schließlich noch zwischen High- und Low-Response Systemen unterschieden werden.

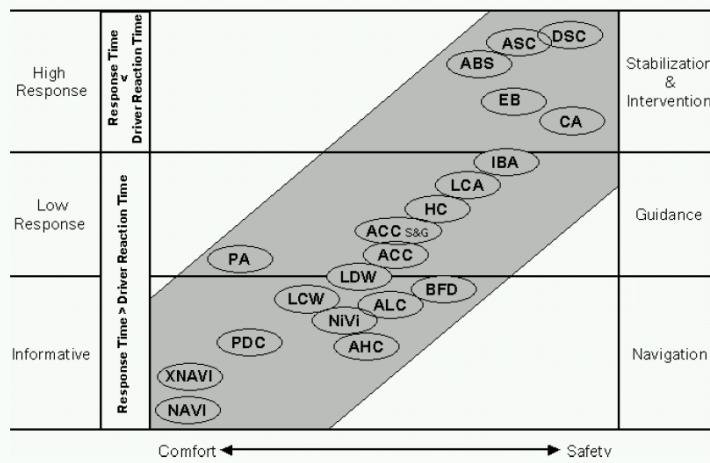


Abbildung 2.1: Klassifizierung von FAS, Quelle: Freymann

2.2 Fahrerassistenzsysteme von heute

2.2.1 Fahrerassistenzsysteme in Bereich Komfort

Entlastung des Fahrers bei Fahrzeuglängsführung

Die erste Gruppe von Fahrassistentensystemen im Bereich Komfort bildet jene, die den Fahrer bei der Aufgabe der Fahrzeuglängsführung entlastet. Dies sind definitionsgemäß automatisch agierende Low Response-Systeme.

Den prominentesten Vertreter stellt die Cruise Control (CC), oder auch Tempomat genannt, dar, der dafür sorgt, daß das Fahrzeug konstant auf einer wählbaren Geschwindigkeit gehalten wird.

Die Weiterentwicklung davon ist die Adaptive Cruise Control (ACC). Wie bei einer konventionellen Geschwindigkeitsregelanlage gibt der Fahrer hier seinen Tempowunsch - bis maximal 180 km/h - vor. ACC hält nun auf freier Strecke dieses Wunschtempo konstant. Darüber hinaus kann der Fahrer innerhalb dergesetzlichen Grenzen den Wunschabstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug eingeben. Nähert sich nun sein Fahrzeug einem langsameren Auto auf der eigenen Fahrspur, erkennt ACC den sich verringernden Abstand und reduziert die Fahrgeschwindigkeit durch Eingriffe ins Motormanagement und durch Bremsen mit maximal 0,2 bis 0,3 g, bis der vorgewählte Abstand erreicht wird. Ist die Fahrspur wieder frei, beschleunigt ACC wieder auf das vormals gewählte Wunschtempo.

Reicht die von der ACC geleistete Verzögerung nicht aus, weil zum Beispiel ein Auto plötzlich einschert, fordert ACC den Fahrer durch akustische Signale auf, selbst zusätzlich zu bremsen. Sinkt die Geschwindigkeit verkehrsbedingt unter 30 km/h, schaltet sich ACC ab und signalisiert dies ebenfalls mit einem akustischen Signal. Dabei wird der Fahrer in keiner Weise bevormundet. Er kann das System jederzeit durch Gasgeben überstimmen oder durch Tastendruck bzw. Bremsen abschalten. Der Fahrer bleibt immer verantwortlicher Herr über sein Fahrzeug.

Informierende und warnende Systeme

Die Aufgabe der informierenden und warnenden Systeme ist die Entlastung des Fahrers von ablenkenden Nebentätigkeiten und die Bereitstellung von warnenden Hinweisen.

Prominente Vertreter dieser Gruppe sind das Navigationssystem (NAVI), das dem Fahrer die Routenplanung abnimmt und ihn durch Abbiegehinweise zum Zielort führt. Außerdem die Parking Distance Control (PDC), die den Fahrer beim Einparken unterstützt, indem sie durch Ultraschallmessung erkennt, wenn sich die Stoßstangen zu weit nähern.

Auch zu dieser Kategorie kann man das Lane Departure Warning (LDW) zählen, das schon als Sonderausstattung für LKWs auf dem Markt verfügbar ist. Diese Assistenzfunktion erkennt bei vorhandenen Fahrbahnbegrenzungslien durch im Fahrzeug integrierte Kameras die Position innerhalb einer Fahrspur. Weicht der Wagen von der Ideallinie zu stark ab, warnt das System den Fahrer akustisch vor dem Verlassen der Straße. Da laut einer Analyse der Volkswagen Unfallforschung 18 Prozent aller Unfälle darauf zurückzuführen sind, dass der Fahrer von der Straße abkommt, ist Lane Departure Warning natürlich auch ein Sicherheitssystem.

2.2.2 Fahrerassistenzsysteme im Bereich Sicherheit

aktive Sicherheit

Fahrerassistenzsysteme in der Kategorie aktive Sicherheit haben die Aufgabe Unfälle zu verhindern. Sie sind autonom intervenierend, das heißt, daß sie gegebenenfalls ins Motormanagement oder den Bremsablauf eingreifen, jedoch nur so punktuell, daß die Kontrolle über das Fahrzeug und damit auch die Verantwortung stets beim Fahrer bleibt. Sie tun das mit einer Reaktionszeit, die kürzer als die des Menschen ist, weswegen sie auch als High-Response-Systeme bezeichnet werden.

Die erste eingeführte Applikation dieser Art war das Anti-Blockier System (ABS). Weiterhin wären hier zu nennen die Antriebsschlupfkontrolle (ASC), das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP oder DSC), das starkem Über- oder Untersteuern entgegenwirkt, die elektronische Bremkraftverteilung (EBV), oder auch das aktive Dämpfungssystem (ADS). Das Active Power Steering (APS) ist eine Kombination aus ESP und elektrischer Servolenkung (EPS) und beinhaltet einen μ -split-Assistenten, der ein zusätzliches Lenkmoment bei Bremsung auf unterschiedlichen Reibwerten bereitstellt.

Der Bremsassistent (BA) sorgt für eine Verkürzung des Anhalteweges, indem sofort die

volle Bremsleistung zur Verfügung gestellt wird, sobald eine Notbremssituation durch die Geschwindigkeit, mit der das Bremspedal gedrückt wird, erkannt wird. Er ist für jene Fahrer gedacht, die das Pedal zwar schnell aber nicht energisch genug betätigen.

passive Sicherheit

Zu den passiven Sicherheitsassistenzfunktionen zählen definitionsgemäß jene, die dafür sorgen, die Schwere eines Unfalles zu reduzieren, wenn dieser unvermeidbar ist. Die wichtigsten Applikationen in dieser Sparte sind der Airbag, der Gurtstraffer, oder auch die Ausrichtung der Sitze in eine für einen Crash günstige Position.

2.3 Entwicklungstrends

2.3.1 Komfortbereich

Die Richtung, in die die Entwicklung gehen wird, ist zumindest im Komfortbereich relativ klar abzusehen. Es sind hier zwei Trends erkennbar, die im Folgenden beschrieben werden:

Verbesserung der Informations- und Kommunikationstechnik

Der erste der oben erwähnten Trends wäre die Verbesserung bzw. die stärkere Integrierung der Informationstechnik. Dies beinhaltet grundsätzlich eine stärkere Vernetzung von Fahrer, Fahrzeug und Fahrumgebung.

So ist beispielsweise eine signifikante Verbesserung des Navigationskartenmaterials zu erwarten, nämlich durch Miteinbeziehung von Geschwindigkeitsbegrenzungen, gefährlichen Kurven, Steigungen, Strassenschilderhinweisen, usw.

Anwendungsmöglichkeiten dafür wären zum einen der Curve Speed Assistant (CSA), also ein System, das nach Auswertung der Karte Geschwindigkeiten vorschlägt, um einen vorausliegenden Streckenabschnitt sicher und komfortabel zu befahren. Hierbei könnte noch neben dem gewünschten Fahrstil zwischen den Modi Warnmodus, Geschwindigkeitsempfehlung, oder Einregelung gewählt werden.

Zum anderen wäre auch eine Adaptive Light Control (ALC) denkbar, die für eine dynamische Kurvenausleuchtung sorgt, indem die GPS (oder Galileo)-Positionsdaten zusammen mit dem Kurvenverlauf des Kartenmaterials ausgewertet werden.

Absehbar ist auch, daß das derzeit statisch auf CD-Rom gespeicherte Kartenmaterial künftig von einem Zentralserver abgerufen wird, natürlich inhaltlich auf tages- oder minutenaktuellem Stand.

Als eine ebenfalls vielversprechende Technologie wird die Ad-Hoc Kommunikation gesehen. Hierbei wird, sobald Notwendigkeit dafür besteht, eine Funkinformation abgesetzt, z.B. falls die Sensorik auf einen Unfall hindeutet, was bei Airbagauslösung oder hoher Querbeschleunigung der Fall wäre. Die anderen Fahrzeuge im näheren Umfeld wären

nach Empfang der Aussendung lokal vor der Unfallgefahr gewarnt. Natürlich wäre Ad-Hoc-Funkkontakt nicht nur zwischen den Fahrzeugen untereinander, sondern auch zu Stadtportalen, Verkehrszeichen, usw. denkbar und praktikabel.

Unterstützung bei Querführung (Heading Control)

Nachdem man sagen kann, daß die automatische Fahrzeuglängsführung technisch praktisch gemeistert ist, geht ein weiterer Trend nun in Richtung Beherrschung der Querführung, die im Vergleich zur Längsführung eine grössere Herausforderung darstellt, weil die Systemreaktionszeiten deutlich kürzer sind und komplexere Fahrsituationen auftreten können. Diese Maßnahme erscheint sehr sinnvoll, denn laut ADAC sind 30 Prozent aller Unfälle mit Personenschaden auf einen Fehler bei der Querführung zurückzuführen.

Eine Voraussetzung für ein Gelingen dieses Vorhabens ist eine zuverlässige Lane Detection, also Spurerkennung, auch auf komplexer strukturierten Verkehrswegen wie z.B. Landstraßen oder innerstädtischen Straßen.

Konkrete Applikationen der Querführung wäre z.B. der Lane Keeping Support, also ein System, das den Fahrer bei seiner Aufgabe, die Spur zu halten, unterstützt. Hierbei würden die Lenkmomente so beeinflusst, dass es für den Fahrer den geringsten Kraftaufwand darstellt, innerhalb seiner Fahrspur zu fahren. Wie der Fahrer heute ein Fahrzeug mit dem Lenkrad fast kraftfrei geradeaus steuert, werden die Fahrzeuge mit LKS in Zukunft auch in der Kurve fast kraftfrei zu steuern sein - ähnlich einem Fahrzeug, das Spurrollen folgt.

Eine weitere denkbare Anwendung ist ein Lane Change Support bzw. Assistant (LCS, LCA). Die Spurwechselunterstützung (LCS) würde mittels Radarsensoren Fremdfahrzeuge oder andere Objekte im rückwärtigen und benachbarten Bereich des Fahrzeugs erkennen. Objekte im toten Winkel des Sichtfeldes im Rückspiegel würden ebenfalls erkannt, und der Fahrer vor diesen gewarnt.

Der Assistent (LCA) würde nicht nur einen gefahrlosen Spurwechsel signalisieren, sondern diesen dann sogar automatisch durchführen.

2.3.2 Sicherheit

Wohin der Trend im Bereich Sicherheit führt lässt sich weniger genau prädizieren als in der Komfortsparte. Vollautonome Eingriffe in die Fahrzeugführung sind technisch noch längst nicht in Serienreife machbar, nur autonom intervenierende. Der Grund hierfür ist die derzeit noch fehlende zuverlässige Fahrumgebungserfassung und Situationsinterpretation, außerdem würde sich auch eine rechtliche Problematik ergeben.

Deshalb ist kurz- und mittelfristig im Serieneinsatz nur mit sicherheitsunterstützenden Systemen auf Informations- und Führungsebene zu rechnen wie z.B RDS (Reduced Stopping Distance).

Dabei handelt es sich um einen Bremsassistent kombiniert mit Abstandsradar, der übrigens auch bei ausgeschaltetem ACC funktioniert. Sobald die Sensorik eine kritische Abstandssituation erkennt, sorgt das System durch Vorfüllen der Bremsanlage dafür, daß das

Fahrzeug beim anschließenden Bremsvorgang seine volle Bremsleistung wesentlich früher entfaltet. Im Ergebnis kann damit ein Unfall entweder ganz vermieden oder zumindest die Aufprallenergie um bis zu 50 Prozent reduziert werden. Speziell für kleine Fahrzeuge mit kurzen Crashzonen stellt diese zusätzliche Funktion eine segensreiche Erweiterung der Sicherheitsausstattung dar. Der Unterschied zu anderen Systemen wie ABS, ASC ect. ist, dass hier die Aktion vom Fahrer eingeleitet, und dann vom System perfektioniert wird, was auch rechtlich am ehesten durchsetzbar ist.

Natürlich wird auch an vollautonomen Systemen geforscht, so arbeitet z.B. Audi an einer Automatischen Notbremse (ANB).[Hol] Kommt die ANB zu dem Ergebnis, daß durch Bremseingriff die Folgen eines bevorstehenden Unfalls vermindert werden können, löst sie eine Vollbremsung aus und reduziert somit die Schwere des Unfalls. Da hier physikalisch der Unfall unausweichlich ist, handelt es sich um ein passives Sicherheitssystem.

Ein aktive Variante davon wäre dann ein Collision Avoidance System (CA), das autonom eine Bremsung einleitet und gleichzeitig versucht dem Hindernis auszuweichen.

An dieser Stelle wird auch die rechtliche Problematik von aktiven vollautonomen Sicherheitsassistenzfunktionen ersichtlich: Man stelle sich den Fall vor, ein Fahrzeug führt nach dem Auftreten eines Hindernisses eine autonome Notbremsung durch, wodurch auch ein größerer Unfall vermieden werden kann. Aufgrund der nassen, rutschigen Fahrbahn kommt es aber trotzdem zu einem kleinen Blechschaden. Der Fahrer behauptet nun, er hätte sowohl Unfall als auch Blechschaden vermeiden können, indem er beschleunigt hätte und dadurch dem Hindernis ausgewichen wäre. Ein Rechtsstreit mit ungewissem Ausgang zwischen Fahrer und Hersteller der Assistenzfunktion ist hier vorprogrammiert. Solange also keine klaren juristischen Richtlinien geschaffen sind, würde schon allein daran die Markteinführung neuer komplexer Sicherheitsfunktionen scheitern.

2.4 Roadmap

Ergänzend zu den bisher genannten Trends sollen nun noch ein paar weitere Fahrerassistenzsysteme aufgezählt werden, die uns in den nächsten Jahren begegnen werden.

Laut Continental Temic [Sch] 2005 mit der Markeinführung von LDW und LKS für PKWs zu rechnen.

Frost und Sullivan zufolge werden 2006 Night Vision- und Headup Display-Technologien, also Nachtsichtunterstützung und Informationseinblendung auf die Windschutzscheibe[Abe], auf dem europäischen Markt erwartet. Im gleichen Jahr ist außerdem die Einführung von ACC stop and go, also der Erweiterung von CC in den unteren Geschwindigkeitsbereich bis hin zum Stillstand, angedacht.

Eine zum jetzigen Zeitpunkt eher gewagte und spekulative Voraussage ist die von Continental Temic für 2007 bzw. 2008 erwartete Machbarkeit von Verkehrsschild- und Fußgängererkennung.

Einige weitere Funktionen, auf die sich die Autofahrer in aller Welt freuen dürfen, sollen hier ebenfalls genannt werden:



Abbildung 2.2: HUD, Quelle: BMW AG



Abbildung 2.3: Night Vision, Quelle: Daimler Chrysler

- Der vollautomatische Parkassistent:

Im Vorbeifahren werden die Dimensionen der Parklücke sowie mögliche Hindernisse erfasst. Nach dem Auswerten der Sensordaten berechnet das System automatisch den idealen Weg zum Parken des Autos. Im Folgenden startet der Fahrer per Knopfdruck die Einparkassistenz; das Auto fädelt im Rückwärtsgang in die Parkfläche ein.

- Fahrerabsichterkennung

z.B. durch Blickrichtungserkennung um Zeitvorsprung vor der Handlungsinitiierung des Fahrers zu gewinnen.

- Fahrerstatuserkennung:

Bis zu 25 Prozent der tödlichen Unfälle im Straßenverkehr sind auf Müdigkeit zurückzuführen. Das von der Volkswagen Konzernforschung entwickelte System der Aufmerksamkeitskontrolle (AMK) will die Gefahr der Unaufmerksamkeit eliminieren. Eine Kamera erfasst permanent die Lidschlagdauer und -frequenz. Der Fahrer wird bei der Gefahr der Übermüdung frühzeitig auf eine zwingend notwendige Ruhepause hingewiesen.

- Brake Force Display (BFD):

Ändern der Fläche und Lichtstärke der Bremsleuchten in Abhängigkeit von der tatsächlichen Verzögerung. Der Hinterherfahrende kann so eine Vollbremsung von einer leichten Bremsung unterscheiden.

2.5 Ausblick - Langfristige Visionen

2.5.1 Das sensitive und kognitive Fahrzeug

Nachdem im letzten Abschnitt die Dinge in kurz- und mittelfristiger Sichtweise betrachtet wurden, soll jetzt noch auf die langfristigen Aspekte eingegangen werden. Generell kann man sagen, daß es langfristig zwei Zustände gibt, die im Sinne der Forschung angestrebt werden: Das Wunschauto der Zukunft ist sowohl sensitiv als auch kognitiv.

Das sensitive Fahrzeug, also ein die Umwelt in ihrer Gesamtheit wahrnehmendes Fahrzeug, wird einerseits eine verbesserte Sensorik erfordern, andererseits wird kein Weg an der Technik der Sensordatenfusion vorbeiführen. In den Fahrerassistenzsystemen von heute basiert jede Applikation auf ihren eigenen, teilweise redundanten, Sensoren, die das Umfeld beobachten. Ziel ist es, aus den fusionierten Sensordaten eine Umfeldbeschreibung zu erzeugen, die für die einzelnen Fahrerassistenzapplikationen relevant, aber nicht spezifisch für eine bestimmte Anwendung ist [Kae]. Dieses fusionierte System wäre einerseits ökonomisch effizienter, andererseits könnte das Blickfeld der einzelnen Sensoren, und damit die Sicherheit und Präzision der Schätzung erhöht werden.

Die Entwicklung eines kognitiven Automobils, also eines Fahrzeugs, das Situationen erkennt und Entscheidungen trifft, die denen des menschlichen Handelns nahe kommt, stellt wohl die grösste Herausforderung und komplexeste Aufgabe dar.

Die Forschung auf diesem Gebiet neigt zu zwei verschiedenen Strategien:

- Beschränkung auf einfache Teilaufgaben, die unter eingeschränkten Bedingungen mit einem einfachen technischen System zu beherrschen, aber vom Leistungsniveau des Menschen weit entfernt sind
- eine langfristige Entwicklungsstrategie, die stets das Leistungsniveau des Menschen im Auge hat und deshalb relativ komplex angelegt sein muss, aber erst relativ spät zu einem Marktprodukt führen kann.

Die westliche Industrie tendiert mit ihrem kurzen Entwicklungshorizont eher zur ersten Lösung. Ein Forschungszentrum, das seinen Schwerpunkt auf die zweite Strategie gelegt hat, ist an der Universität der Bundeswehr München beherbergt, unter der Leitung von Prof. Dickmanns. Sein Ansatz für die Entwicklung eines kognitiven Fahrzeugs basiert, sehr grob zusammengefasst, auf folgenden Punkten:

1. Die visuelle Umgebungserfassung soll die des Wirbeltierauges immitieren: gefordert wird eine foveal - periphere Wahrnehmungsfähigkeit mit schneller, aktiver Blickrichtungssteuerung, statt vieler hochauflösender statischer Kameras.
2. Objekterkennung geschieht durch Merkmalsextraktion, bzw. Schätzverfahren. Objekte werden durch ihren Zustandsvektor repräsentiert und in der dynamischen Objektdatenbank (DOB) gespeichert.
3. Die Wissensdarstellung erfolgt in einem Szenenbaum, wobei Objekte die Knoten bilden.

4. Es existiert ein Missionsplan, also eine Liste von Missionselementen, die abgearbeitet wird. Missionselemente sind Tasks, die unter Abschätzung der eigenen Verhaltensfähigkeit eingehalten werden können (z.B. Sollgeschwindigkeit).
5. Unter Situationserfassung versteht man die Beurteilung aller Objekte im Szenenbaum bezüglich der eigenen Missionsdurchführung inklusive der zu erwartenden nahen Zukunft.

Das Hauptproblem bei der Umsetzung des Konzeptes ist zur Zeit noch die mangelnde Rechnerleistung. Prof. Dickmanns rechnet mit der Verfügbarkeit von ausreichenden Kapazitäten in ungefähr 10 Jahren.

2.5.2 Autonomes Fahren: Akzeptanzprognosen und Anwendungsbereiche

Das Thema „Autonomes Fahren“ ist seit dem Ende der 80er Jahre Forschungsgebiet zahlreicher Institute weltweit. Schon seit ca. 15 Jahren ist es mit relativ geringem Rechenaufwand in seiner einfachsten Form, also unter günstigen Umgebungs - und Beleuchtungsbedingungen auf gut strukturierten Straßen, realisierbar.

1994 fuhren zwei Common European Demonstrator CED-Fahrzeuge im Rahmen des EUREKA-Projektes „Prometheus“ autonom im dreispurigen Verkehr bei Paris [Dic]. Sowohl das Fahren im Konvoi als auch der selbst entschiedene Spurwechsel wurde mit Passagieren an Bord demonstriert.

1997 wurde erstmals in Echtzeit eine Fahrspur- und Relativlageerkennung mit nur einem Intel-Pentium PC erreicht.

Das exponentielle Wachstum der Rechenleistung ist die Grundlage dafür, daß in absehbarer Zeit autonomes Fahren technisch auch unter natürlichen Bedingungen im Individualverkehr möglich sein wird. Experten sind jedoch einhellig der Meinung, daß diese Art der Fahrzeugführung auf öffentlichen Straßen aus Akzeptanzgründen keine Zukunft hat. Der Durchschnittsautofahrer ist nämlich nicht bereit, die Verantwortung komplett abzugeben, bzw. sich bevormunden zu lassen.

Mögliche Anwendungsbereiche werden deshalb eher in Nischen wie beim Gefahrenguttransport, auf dem Fabrik- oder Hafengelände, in der Mülldeponie usw. gesehen.

Daß auch die Automobilindustrie der Sache eher skeptisch gegenübersteht, zeigt die Aussage von Günter Reichart, Leiter Fahrzeug- und Verkehrsorschung BMW:

„Diese Art der Fortbewegung bedeutet für den Fahrer 99 Prozent Langeweile und zu 1 Prozent panische Angst vor einer Fehlfunktion.“

2.6 Zusammenfassung

Fahrerassistenzsysteme sind aus der heutigen Automobillandschaft nicht mehr wegzudenken. Sie lassen sich in verschiedene Gruppen einteilen, wie z.B. in Systeme für Navigation,

Führung und Eingriff oder Komfort- und Sicherheitssysteme.

Die wichtigsten Komfortsysteme sind CC, ACC, NAVI und PDC. Die relevantesten aktiven Sicherheitssysteme sind ABS, ASC, ESP, ADS, APS, bei den passiven sind Airbag, Gurtstraffer und Sitzpositionsaustrichtung zu nennen.

Der Entwicklungstrend in der Sparte Komfortfahrerassistenzsysteme ist zum einen die stärkere Integration der Informationstechnik, z.B. durch Verwendung von Ad-Hoc-Kommunikation, zum anderen die Beherrschung der Fahrzeugquerführung.

Im Bereich Sicherheit ist kurz- und mittelfristig vor allem mit der Entwicklung von sicherheitsunterstützenden Applikationen, wie z.B. RDS, zu rechnen. Die Markteinführung von Systemen, die vollautonom in die Fahrzeugführung eingreifen, ist derzeit noch nicht absehbar, nicht zuletzt aus rechtlichen Gründen.

Wagt man den Blick in die Zukunft, sieht man einerseits, daß eine Menge Potential in der Technik der Sensordatenfusion steckt, und daß andererseits an neuen komplexen Konzepten, die langfristig den Anspruch der Umsetzung eines kognitiven Fahrzeugs haben, mit Nachdruck geforscht wird. Der begrenzende Faktor ist z.Z. noch die mangelnde Rechenleistung.

Anhang: Abkürzungen

| | |
|-----|---|
| ABS | Antiblockiersystem |
| ACC | Adaptive Cruise Control |
| ADS | Adaptives Dämpfersystem |
| AFS | Aktive Fahrwerksstabilisierung |
| ALC | Adaptive Light Control |
| AMK | Aufmerksamkeitskontrolle |
| ANB | Automatische Notbremse |
| ASR | Antriebsschlupfregelung |
| BAS | Brake Assist System bzw. Bremsassistent |
| BFD | Brake Force Display |
| BKV | Bremskraftverstärker |
| CAS | Collision Avoidance System |
| CC | Cruise Control |
| CSA | Curve Speed Assistant |
| DSC | Dynamic Stability Control |
| EBV | Elektronische Bremskraftverteilung |
| EDC | Electronic Damping Control |
| EPS | Electric Power Steering |
| ESD | Elektronisches Sperrdifferential |
| ESP | Elektronisches Stabilitäts Programm |
| FAS | Fahrerassistenzsystem |
| GPS | Global Positioning System |
| HUD | Head Up Display |
| LDW | Lane Departure Warning |
| LCA | Lane Change Assistant |
| LCS | Lane Change Support |
| LKS | Lane Keeping Support |
| NV | Night Vision |
| PA | Park Assist |
| PDC | Park Distance Control |
| RDS | Reduced Stopping Distance |
| TC | Traction Control |

Literaturverzeichnis

- [Abe] Dr. H Abel, G. Meier-Arendt: Zukünftige Fahrerinformationssysteme im Kraftfahrzeug - Der Beitrag des HMI zur informatorischen Fahrassistenz.
- [Dic] Ernst Dieter Dickmanns: Vision: Von Assistenz zum autonomen Fahren.
- [Fre] Prof. Dr. R. Freymann, BMW Group: Möglichkeiten und Grenzen von Fahrassistenz und aktiven Sicherheitssystemen.
- [Hol] V. von Holt, Dr. M.Maurer: Aktive Sicherheitssysteme mit maschineller Wahrnehmung - Anforderungen, Potentiale und Einführungshemmnisse.
- [Kae] N. Kaempfchen, Fuerstenberg, Dietmayer: Ein Sensorfusionssystem für automotive Sicherheits- und Komfortapplikationen.
- [Kno] P.Knoll: Das sensitive Fahrzeug.
- [Kop] Dr. M.Kopf, Dr. J.Steinle: Bausteine zur Entwicklung eines Systems der aktiven Sicherheit.
- [Kos] Timo Kosch: Den Horizont erweitern: Vorausschauende Systeme durch Ad-Hoc Vernetzung.
- [Lan] Prof. Dr.-Ing. K. Langwieder: Sicherheitsgewinn durch ESP - Internationale Erfahrung aus Realunfällen.
- [Sch] M. Schamberger, G.Gedult: Fahrassistenz zur Erhöhung von Komfort und Sicherheit.

Kapitel 3

Alternative Antriebe

Über den Autor

Martin Ruß studiert zurzeit im 12. Semester Elektro- und Informationstechnik an der TU München.

3.1 Einleitung

Von den ersten Automobilen bis hin zu den modernsten Rennwagen ist ein wesentliches Merkmal geblieben: die Verbrennungsmotoren. Das Prinzip der Verbrennungsmotoren in Automobilen geht auf Etienne Lenoir (1860: erster Gasmotor), Nikolaus Otto (1876: erster Benzimotor) und Rudolf Diesel (1892: erster Dieselmotor) zurück und ist damit über 140 Jahre alt.

Insgesamt sind gegenwärtig in Deutschland etwa 44 Mio. Pkw zugelassen, davon 37,4 Mio. mit Otto- und 6,4 Mio. mit Dieselmotoren [1]. Damit einher gehen Umweltbelastungen, durch krebserregende Stoffe, Smog, Lärmbelästigung oder der Treibhauseffekt. Daneben werfen der Verbrauch an wertvollen und nicht wiedergewinnbaren Rohstoffen, wie Öl oder Gas die Frage auf ob es nicht bessere Alternativen gibt, Autos anzutreiben. Die Bemühungen der Autokonzerne wie sparsame Motorsteuerungen, Motormanagement, leichtere und aerodynamischere Karosserien, verbesserte Reifen, Abgasreinigung (KAT) etc. werden die prinzipbehafteten Nachteile nicht vollständig kompensieren können und gehen am Kern des Problems vorbei. Kurzfristig können ein deutlich geringer Verbrauch und strengere Abgasnormen die Probleme lindern. Langfristig ist aber ein Technologiewechsel, weg vom Primärenergieträger Erdöl nötig.

3.2 Motivation

3.2.1 Umweltpolitische

Es ist eine Differenzierung zwischen den allgemein durch den Individualverkehr und den explizit durch die Verbrennungsmotoren verursachten Umweltbelastungen nötig.

Die Abgase von Verbrennungsmotoren sind ein Gemisch einiger hundert verschiedener Substanzen, deren Zusammensetzung und Menge je nach Motortyp und Kraftstoff variieren (siehe Abb. 3.1). Emittierte Schadstoffe wie CO, CO₂, Kohlenwasserstoffe (NMVOC), NO_x, SO_x, Ruß, Schwebstaub (PM-10), etc. sind einzeln schon umweltgefährdend und ergeben gemeinsam einen Schadstoff-Cocktail der Mensch, Tier und Pflanzenwelt, Gebäude und selbst das Weltklima schädigt. Durch Sonneneinstrahlung werden fast alle Bestandteile dieses Cocktails in aggressive Fotooxidantien, die für den Sommersmogs verantwortlich

sind, umgewandelt, oder verstärken die Bildung des bodennahen Ozons, welches direkt gesundheitsschädlich ist.

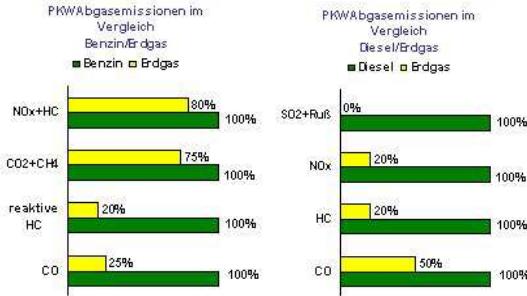


Abbildung 3.1: Relative Abgaszahlen von Benzin bzw. Diesel bzgl. Erdgas; [2]

Dank verschärfter EU-Grenzwertnormen gehen die Emissionen einzelner PKWs zurück (siehe Abb. 3.2).

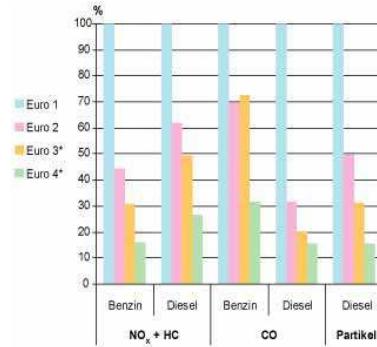


Abbildung 3.2: Entwicklung der europäischen Grenzwerte für Otto- & Diesel-Pkws; [3]

Gleichzeitig steigen weltweit die Neuzulassungen und die Fahrleistungen an, was einen Teil der Luft-Verbesserungen wieder aufhebt (siehe Abb. 3.3 & Abb. 3.4)

Der Einbau von Filtern, verbessertes Motormanagement, etc. haben auf den CO₂ Ausstoß nur geringen Einfluss. Der hohe Flottenverbrauch und die geringe Akzeptanz der Kunden für verbrauchsoptimierte Fahrzeuge (ULEV-Standard = Ultra Low Emission Vehicle Standard oder EURO4-Standard) sind die Ursachen für den geringen Rückgang (siehe ULEV). Berücksichtigt man daneben das erhöhte Verkehrsaufkommen, so werden die CO₂ Emissionen und ihre Auswirkungen auf das Weltklima in Summe weiter zunehmen.

Neben dem Verbrauch der Kraftstoffe, sind auch deren Bereitstellung und die Entsorgung von Ölprodukten aus ökologischer Sicht bedenklich. Bei der Förderung, Herstellung und dem Transport kommt es immer wieder zu verheerenden Unfällen, was die Verseuchung ganzer Land- und Seegebiete zur Folge hat. Die Reinigung und der finanzielle Ausfall z.B. der Fischer, der Tourismusindustrie, etc. kosten Milliarden. Die langfristigen Schäden auf das gesamten Ökosystem sind aber weit gravierender als bisher angenommen. Das ausgelaufene Öl wirkt nicht nur ein paar Tage lang akut toxisch, erstickend und verklebend.

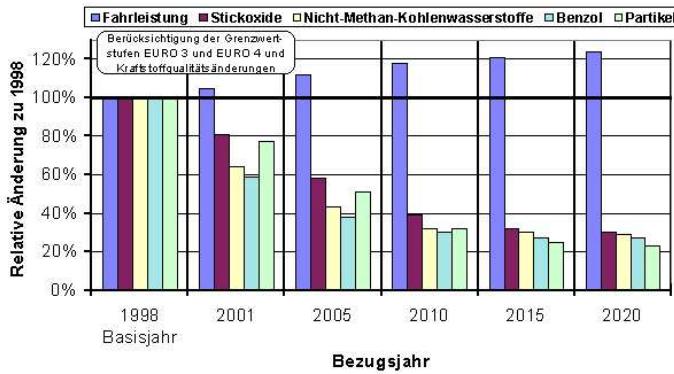


Abbildung 3.3: Entwicklung der Fahrleistungen & Emissionen des gesamten Straßenverkehrs; [4]

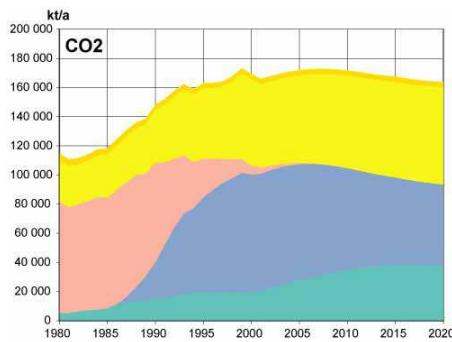


Abbildung 3.4: Kfz-Emissionen in Deutschland mit dem Verkehrsemissionsmodell TREMOD; [4]

Selbst in geringen Mengen schwächt es über Jahre hinweg einzelne Spezies und vernichtet ganze Ökotope [5].

3.2.2 Gesundheitsprobleme

Die genannten Abgase erhöhen das Krebs- und Allergierisiko und greifen die empfindlichen Atemwege an. Gerade der steigende Anteil der Dieselfahrzeuge und die damit emittierten Rußpartikel sind eine Gefahr für die Gesundheit. Laut einer Studie des Bundesumweltamtes [6] sterben jährlich 14000 Menschen an den Folgeerkrankungen inhalierter Rußpartikel. Betroffen von den Belastungen sind vor allem Fußgänger und hierbei bevorzugt Kinder und alte Menschen. So fordern ozonbedingte Herz- und Kreislaufbeschwerden jeden Sommer bis zu 4000 Menschenleben in Deutschland. Daneben treten Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit und Unwohlsein auf (Quelle: Heidelberger Umwelt- und Prognose-Instituts (UPI), [7]) Das Wohlempfinden der Menschen wird durch Lärm- und Geruchsbelastigungen besonders in Ballungszentren noch weiter vermindert und führt zu subjektiven Stresssymptomen, wie Konzentrationsschwächen, Abgeschlagenheit oder Gereiztheit und psychosomatischen Krankheiten.

3.2.3 Ressourcenknappheit und steigender Verbrauch

Die verbleibenden Ressourcen, die technischen und wirtschaftlichen Reserven, die Entwicklung der Weltwirtschaft und das Konsumentenverhalten sind statistisch unsichere Größen. Dennoch lässt sich aus ihnen ein Trend zur Verknappung ablesen, der sich im Zeitmaßstab verschieben mag (siehe Abb. 3.5).

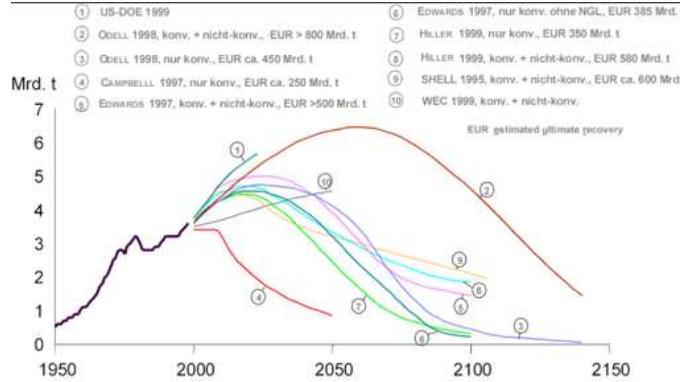


Abbildung 3.5: Auswahl verschiedener Prognosen für die Erdölproduktion; [8]

Angesehene Erdölgeologen wie Colin J. Campbell schätzen, dass schon gegen Ende unseres Jahrzehnts die jährliche Weltölproduktion bei 25 Milliarden Barrel ihren Höchststand erreichen und danach wegen beginnender Erschöpfung der Vorräte bis 2050 auf rund ein Viertel abfallen wird (siehe Abb. 3.6) [5].

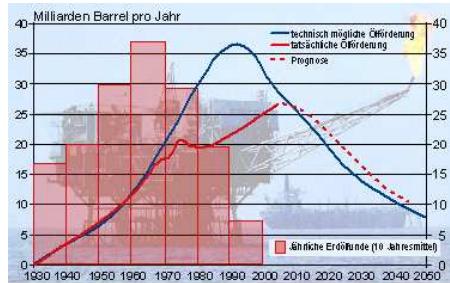


Abbildung 3.6: Erdöl: Funde & Produktion; [9]

Selbst Vertreter der Erdölindustrie räumen mittlerweile ein, dass Neuerschließungen nur ein Viertel dessen ersetzen, was die Welt pro Jahr konsumiert und dass bei einem jährlichen Weltbedarf von 30 Milliarden Barrel die gesicherten Vorräte nur noch vierzig Jahren reichen werden. Bis zum Jahr 2012 ist sogar mit einer Steigerung des Bedarfs von 50% zu rechnen, was den Zeithorizont auf dreißig Jahre schrumpfen ließe (siehe Abb.3.7) [5].

Bei der Gewinnung von Arzneimitteln, Düngemitteln, Nahrungsmitteln, Kunststoffen, Baustoffen, Farben und Textilien wird Erdöl als Ausgangsstoff benötigt. Dies ist ein weiterer Grund um möglichst bald auf Ersatzenergieträger umzusteigen.

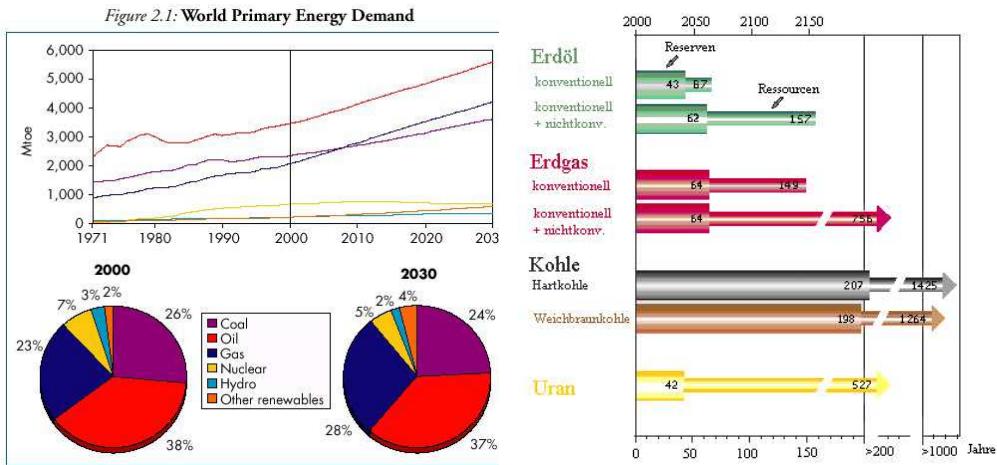


Abbildung 3.7: Primärenergieträger: Verbrauch & Reichweite; [10], [11]

3.2.4 Preisentwicklung und Politische Abhängigkeit

In dem Maße, in dem die Energiequellen versiegen, wird auch der Preisdruck und die politische Abhängigkeit zunehmen (siehe Abb. 3.8) [12], [13], [14].

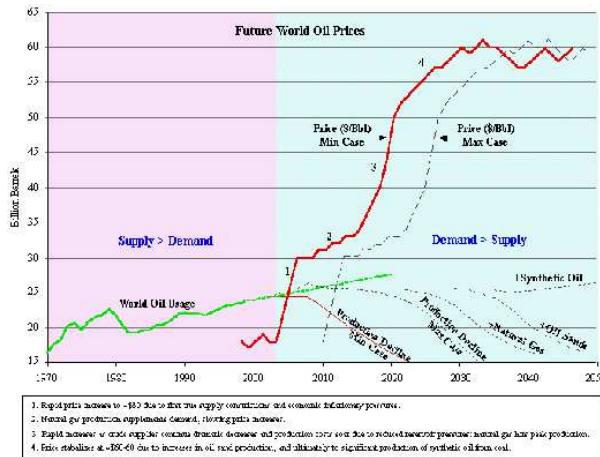
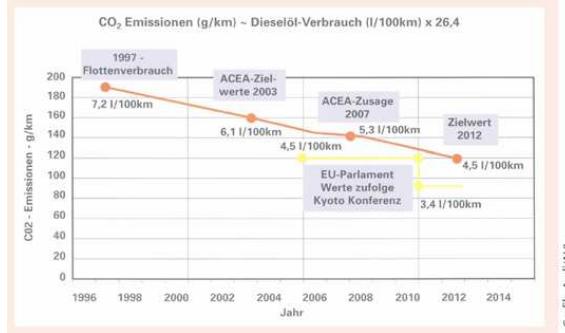


Abbildung 3.8: Prognose des Ölpreises bis 2050; [12]

3.3 Verbrauchsoptimierter ULEV-Standard

Die Einführung von Emissionsstandards in der EU, Kalifornien, Japan etc. führt zu einer steten Reduzierung des Abgasausstoßes. Da die Normen immer strenger gefasst werden, reduzieren sich allmählich auch der Verbrauch und damit die CO₂ Emissionen. Hierzu tragen Otto/Dieselmotoren nach ULEV-Standard (Ultra Low Emission Vehicle Standard) oder EURO4 bei (siehe Abb. 3.9) [4], [15]-[19].

Abbildung 3.9: Europäisches CO₂-Szenario für PKW; [19]

Fahrzeuge mit konventioneller Benzin- bzw. Dieseltechnologie nach dem ULEV-Standard erreichen durch weiterentwickeltes Motormanagement, neu gestaltete Abgasanlagen und Katalysatoren, verbesserte Filter immer niedrigere Abgaswerte. Motorfremde Maßnahmen wie Leichtbau zur Gewichtsreduzierung, Verbesserungen der Aerodynamik und des Rollwiderstandes zur Verringerung der Fahrwiderstände machen die nächste Generation von PKWs noch effizienter und damit umweltfreundlicher (siehe Abb. 3.10).

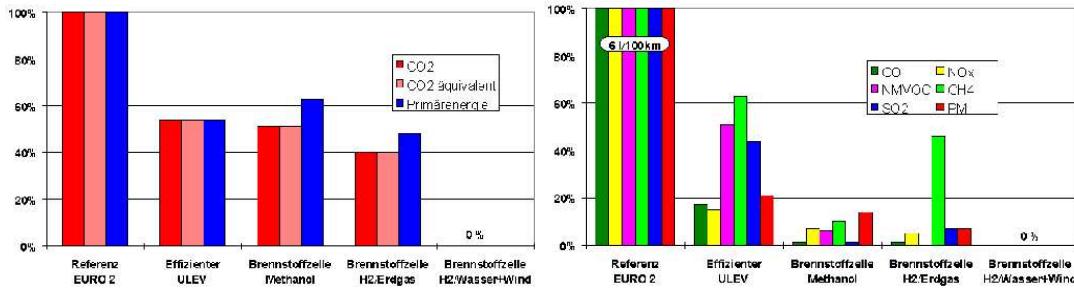


Abbildung 3.10: Emissionen im Vergleich zum Euro2 inkl. Kraftstoffherstellung; [4]

Weitere Entwicklungsstufen sind SULEV, EURO5 oder das 1-Liter Auto von VW. Spritsparende ULEVs sind momentan die günstigste Lösung zur Vermeidung von CO₂ (siehe Abb. 3.11).

3.4 Gasantriebe

Gasantriebe erfreuen sich immer größerer Beliebtheit. Mitte 2001 waren insgesamt etwa 20000 Gasfahrzeuge in Deutschland zugelassen. Man unterscheidet zwischen Auto- bzw. Flüssiggas und Erdgasmodellen. Unter günstigen Rahmenbedingungen werden nach Einschätzung des Bundesverbandes der Deutschen Gas- und Wasserwirtschaft bis 2010 rund 500.000 Erdgasfahrzeuge hierzulande zugelassen sein. Ende 2020 könnte diese Zahl auf 4,5 Millionen angewachsen sein (zehn Prozent des Gesamtmarktes). Dies würde das Kohlendioxid-Aufkommen jährlich um fünf Millionen Tonnen verringern [1].

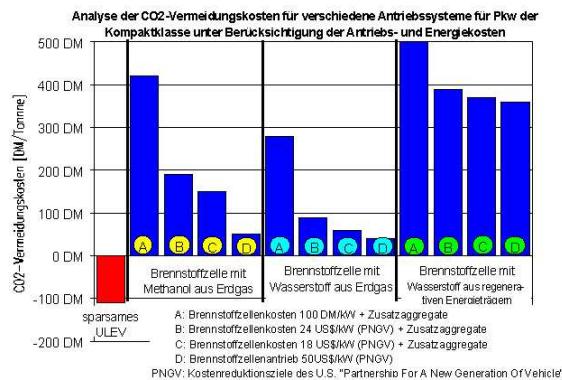


Abbildung 3.11: CO₂ Vermeidungskosten unter Berücksichtigung der Antriebs- & Energiekosten; [4]

Gasfahrzeuge allgemein besitzen bessere Abgaswerte bzgl. Otto-/Dieselmotoren (siehe Abb. 3.1) und sind kostengünstiger als Benzin und Dieselmotoren (siehe Abb. 3.12).

| Kraftstoffkosten-Vergleichsrechner | | | | | |
|------------------------------------|------------------------|--|------------|------------|----------------|
| Fahrstrecke | 25000 km (max. 999999) | Geben Sie die zutreffenden Werte in die weißen Felder ein. | | | |
| Kraftstoff | Benzin | Super | Diesel | Biodiesel | Erdgas L (CNG) |
| Preis | 1,20 €/l | 1,21 €/l | 0,97 €/l | 0,84 €/l | 0,63 €/kg |
| Verbrauch 100 km | 9 l | 9 l | 7 l | 7,7 l | 7 kg |
| Kosten je km* | 0,108 €/km | 0,109 €/km | 0,068 €/km | 0,065 €/km | 0,044 €/km |
| Kosten gesamt** | 2.700,00 € | 2.722,50 € | 1.697,50 € | 1.617,00 € | 1.102,50 € |
| mit Gas gespart | 1.597,50 € | 1.620,00 € | 595,00 € | 514,50 € | |
| Ersparnis % | 59,17 % | 59,50 % | 35,05 % | 31,82 % | |

Abbildung 3.12: Kraftstoffkosten-Vergleichsrechner; [20]

Gasbetriebene Motoren laufen deutlich leiser und haben wegen der sauberen Verbrennung eine längere Lebensdauer.

3.4.1 Technik

Technologisch sind Gasantriebe sehr ähnlich. Unterschiede bestehen vor allem in der Speicherung des Treibstoffs. Wird von Flüssiggas- oder auch Erdgas-Motoren gesprochen, handelt es sich in der Regel um umgerüstete Otto-Motoren. Bei der Umrüstung bleibt der Motor selber weitestgehend unverändert. Es werden lediglich einige zusätzliche Komponenten eingebaut. Die am Markt vorhandenen Gas-Systeme lassen sich unterteilen in Venturi-Systeme (selbstansaugende Systeme) und in Einspritz-Systeme unterschiedlicher Entwicklungsstufen. Der grundsätzliche Aufbau sieht vor, dass ein Verdampfer bzw. Druckregler das aus dem Tank in flüssiger Form geleitete Autogas in einen gasförmigen Zustand überführt. Gleichzeitig wird dieses Gas auf den für die Gemischbildung notwendigen Druck reduziert. Moderne Autogas-Systeme ähneln prinzipiell einer Benzin-Einspritzanlage und erfassen zur Regelung der Gemischbildung eine Vielzahl von Motor-Kenngrößen. Sie führen dabei das Gas mit Überdruck in separaten Leitungen direkt bis vor die Einlass-Ventile der einzelnen Zylinder. Ein Mikroprozessor regelt den Autogas-Antrieb

und stellt so eine schadstoffarme und wirkungsoptimierte Verbrennung im Motor sicher. Im Gegensatz zu Gasphase-Einspritzsystemen entfällt bei Flüssigphase-Einspritzsystemen die Verdampfer-Einrichtung. Bei diesen Anlagen sichert eine im Autogas-Tank installierte Pumpe in Verbindung mit einem Druckregler einen konstanten Druck der Flüssigphase vor den elektromechanischen Einspritzdüsen (siehe Abb. 3.13) [1], [21].

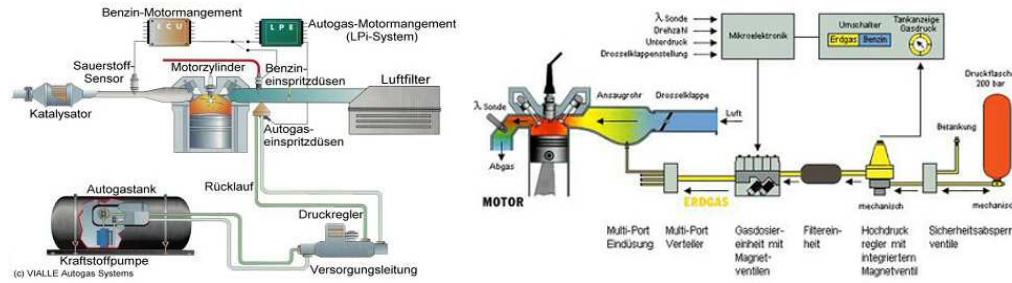


Abbildung 3.13: Technik: Autogas & Erdgas; [21]

3.4.2 Bivalente und Monovalente Gasfahrzeuge

Gasfahrzeuge werden in zwei verschiedenen Versionen angeboten: bivalent oder monovalent. Die nachträgliche Umrüstung von Otto-Motoren ist meist bivalent (siehe Abb. 3.14).

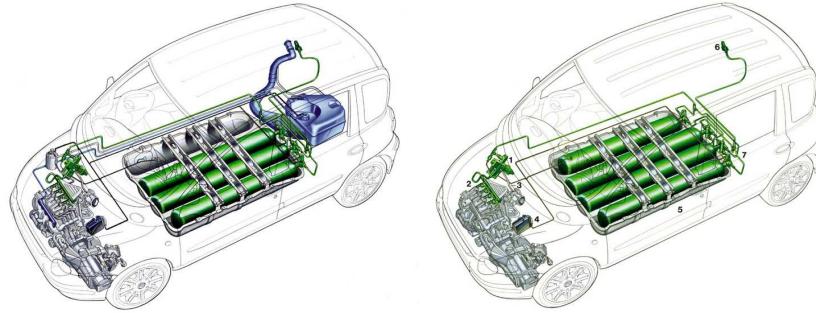


Abbildung 3.14: Fiat Multipla2002: Bipower & Blupower; [22]

Bivalente Fahrzeuge können sowohl mit Gas als auch mit Benzin fahren. Ist der Gasvorrat erschöpft, schaltet der Motor während der Fahrt automatisch auf Benzinantrieb um. Der Fahrer merkt davon nichts. Durch die beiden Tanks erhöhen sich die Reichweite des Fahrzeugs und die Tankstellenverfügbarkeit beträchtlich. Die für den Benzinbetrieb optimierte Auslegung wirkt sich nachteilig auf die Leistung, den Verbrauch und das Abgasverhalten aus. Weitere Mankos sind der zusätzliche Platzbedarf und die Gewichtszunahme.

Monovalente Fahrzeuge sind ausschließlich für den Betrieb mit Gas ausgelegt oder haben wie der Opel Zafira 1.6 CNG einen Nottank mit bis zu 15 Litern Benzin, was eine Zusatzreichweite von ca. 150 km ergibt. Gasoptimiertes Motormanagement macht monovalente

Antriebe wirtschaftlicher, schadstoffärmer und führt zu einer längeren Lebensdauer. Der Nur-Gasbetrieb birgt Einbußen in der Reichweite (Opel Zafira 1.6 CNB ca. 350 km + 150 km) und in der Tankstellenverfügbarkeit in sich [23].

3.4.3 Erdgasfahrzeuge

Erdgas (CNG = Compressed Natural Gas) besteht größtenteils aus Kohlenwasserstoffen (z. B. Methan, Ethan, Propan und Butan) sowie u. a. Kohlendioxid, Stickstoff und Schwefelwasserstoff. Der hohe Methangehalt von über 90% führt zu schweren und voluminösen Tanks, da sich Erdgas erst ab 200 Bar verflüssigt. Gleichzeitig ermöglicht er aber den reibunglosen Betrieb von Biogas, das ebenso hauptsächlich aus Methan besteht [23].

3.4.4 Autogasfahrzeuge

Auto-/Flüssiggas (LPG = Liquified Petrol Gas) entsteht als Nebenprodukt bei der Rohöl- und Erdgasförderung und ist ein Gemisch aus Propan und Butan. Da es bereits bei 6-8 Bar flüssig wird, können kleinere und leichte Tanks eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil gegenüber Erdgas ist die höhere Reichweite von bis zu 600 Km [23].

3.4.5 Das Wasserstoffauto

Wasserstoffautos gehören zur Klasse der Zero Emission Vehicles (ZEV), da bei der Oxidation von Wasserstoff nur Wasser entsteht und Wirkungsgrade von bis zu 60% erzielt werden können.

Wie der Kreislauf in Abb. verdeutlicht, kann Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen hergestellt werden (siehe Abb. 3.15).

Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor

Wasserstoff-Verbrennungsmotor ist dem Erdgas-Motor sehr ähnlich, allerdings können Gesamtwirkungsgrade bis 50% erzielt werden (siehe Erdgas). Die Leistungsdaten sind hervorragend.

Einen ersten Schritt in diese Richtung stellt die BMW Group jetzt in dem bivalent betriebenen 12-Zylinder Konzept-Motor des BMW 745h vor: Der zukunftsweisende Zwölfzylindermotor wird bivalent betrieben, er läuft also sowohl mit Wasserstoff als auch mit Benzin. Aus einem Hubraum von sechs Litern schöpft er eine Leistung von mehr als 170 kW (231 PS) bei 5 500/min. Sein maximales Drehmoment von 337 Nm erreicht er schon bei 2 000/min. Erste 745h mit Wasserstoffantrieb sollen im aktuellen Lebenszyklus (also in den nächsten 2 Jahren) des aktuellen 7ers verfügbar sein (siehe Abb. 3.16) [26].

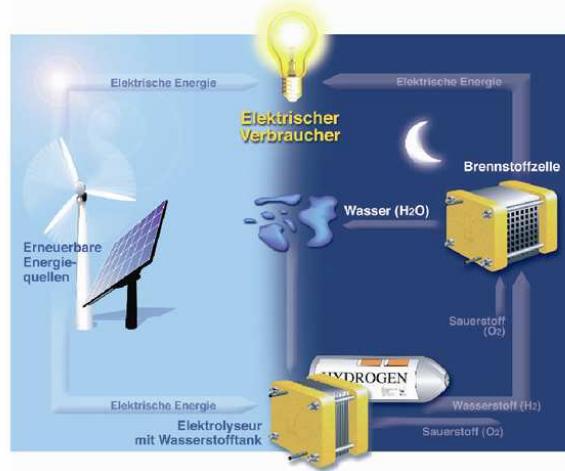


Abbildung 3.15: Wasserstoffkreislauf; [24], [25]

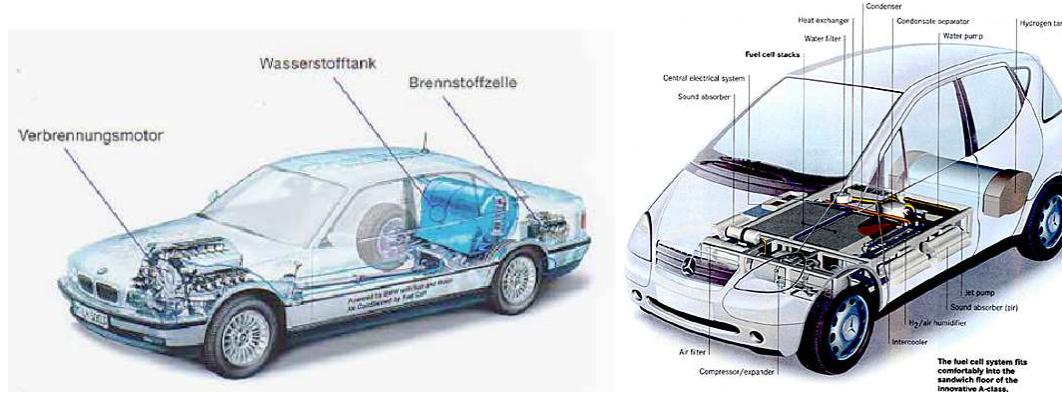


Abbildung 3.16: Wasserstofffahrzeuge: mit Verbrennungsmotor (BMW 745h) & mit Brennstoffzelle (Mercedes Necar); [26], [27]

Die Brennstoffzelle

Ein anderes Konzept verwendet DaimlerChrysler in der Necar-Entwicklung. Der Brennstoffzellenantrieb ist komplett im Sandwichboden einer A-Klasse untergebracht. Bis zur Serienreife werden 2-5 Jahre vergehen.

Die Leistungsdaten sind mit einer Höchstgeschwindigkeit von 145 km/h und einer Reichweite von 450 Kilometern schlechter als beim Wasserstoffverbrennungsmotor. Der Wirkungsgrad dürfte hingegen bei rund 60% und damit 10% höher liegen (siehe Abb. 3.16) [27].

3.4.6 Biogas

Siehe Erdgas und Biomasse

3.4.7 Das Aircar

Guy Nègre, der Entwickler des Pressluftmotors, war als Ingenieur in der Formel1 tätig. Dort wird Kompressorluft schon lange zum Starten der Boliden verwendet.

Der erste Preßluft-Kolbenmotor der Welt von MDI ist ein Zwei-Zylinder-Boxer (siehe Abb. 3.17).

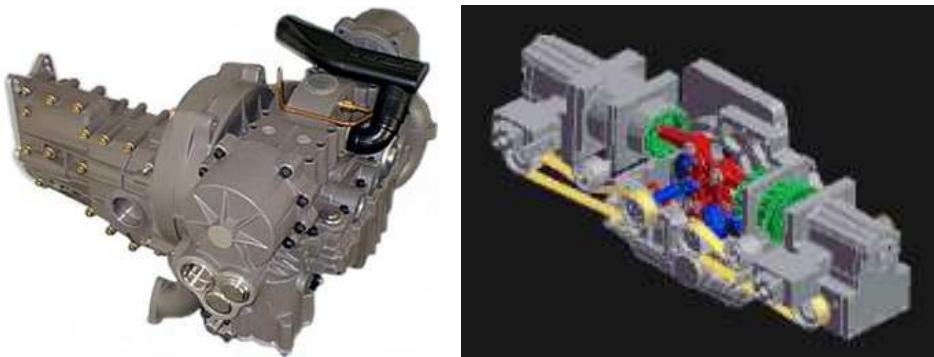


Abbildung 3.17: MDI-Motor EV3 mit Kupplung und Getriebe; [28]-[30]

Die Einlasskammer [intake chamber] ist über den Ansaugtrakt mit der Außenluft verbunden. Einlassventile [Chamber inlet valve] regeln die Luftzufuhr und sperren während der Verdichtung [compression] den Rückstrom in den Ansaugtrakt. Über einen relativ großen Verdichtungskanal ist die Einlasskammer mit der Zündkammer [combustion chamber] verbunden. Die Zündkammer ist kugelförmig ausgebildet und bleibt hinsichtlich ihres Volumens konstant. In ihr münden der Einspritzkanal für die Pressluft [air injector]. Außerdem ist die Zündkammer über einen relativ schmalen Ausdehnungskanal mit der Ausdehnungskammer [expansion chamber] verbunden. Ein Auslassventil [Transfer valve] verhindert während des Ausstoßens der Abgase den Rückstrom in die Zündkammer. In der Ansaug- und Verdichtungsphase wird Außenluft über die Abwärtsbewegung des Verdichtungskolbens [intake and compression piston] angesaugt und durch die Aufwärtsbewegung des Kolbens in der Zündkammer auf 20 bar komprimiert. Dabei erhitzt sich die Luft auf etwa 400 °C. Im oberen Totpunkt wird aus den Tanks mit 40 bar und normaler Temperatur eine kleine Menge Pressluft in die Zündkammer eingespritzt. Die Temperatur- und Druckunterschiede führen zur Expansion, das Auslassventil wird geöffnet und die Luft kann in die Ausdehnungskammer entweichen. Dadurch treibt sie den Ausdehnungs- und Auspuffkolben [expansion and exhaust piston] nach unten und dreht die Kurbelwelle. Durch die Aufwärtsbewegung des Kolbens wird die gebrauchte Luft ausgestoßen (siehe Abb. 3.18) [29].

Da keine Explosionen und nur wenig Hitze entstehen, kann eine bescheinigte Laufleistung des Motors von 5 Millionen Kilometern erzielt werden [30].

Das Prinzip ist mittlerweile so ausgereift, dass die Aircar AG folgende Flotte ab dem 05.05.2005 anbieten möchte (Anmeldung zur Probefahrt am 16.07.2004 unter: cfo@aircars.ch) (siehe Abb. 3.19). Der Einstiegspreis für dieses Zero Emission Vehicle (ZEV) liegt bei

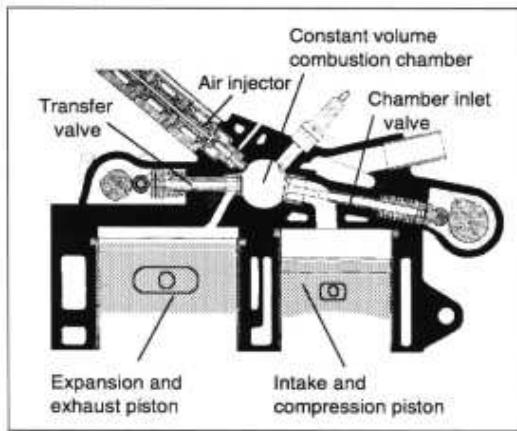


Abbildung 3.18: Pressluftmotor: Schnitt durch einen Zylinder; [29]

15000 EUR. Der 200 km weit reichende Tank, kann für günstige 1,50 EUR pro 100 km an speziellen Presslufttankstellen oder für 2,38 EUR elektronisch gefüllt werden. Die Leistungsdaten (Höchstgeschwindigkeit: 110 km/h, Beschleunigung 0-100 km/h: 15 s) sind für Stadt- bzw. Landfahrten geeignet [30].



Abbildung 3.19: Aircar AG: Flotte an Pressluftautos; [30]

3.5 Biomasse

Biomasse-Treibstoffe bestehen aus nachwachsenden Ausgangsstoffen wie, Ölpflanzen, z.B. der Raps oder die Ölpalme, Holz, Stroh, Tierabfällen und organischen Substanzen z.B. Pflanzen oder Klärschlamm. Gewinnung und Verwertung sind ein geschlossener CO₂ Kreislauf, d.h. es wurde der Atmosphäre genau soviel CO₂ entnommen, wie bei der Verbrennung frei wird (siehe Abb. 3.20).

Zur Bereitstellung der Kraftstoffe dienen einfache Prozesse, wie das Pressen von Pflanzenölen oder Anaerobe mikrobiologische Prozesse (Gärung) zur Methangewinnung, aber auch komplizierte Syntheseverfahren z.B. zur Herstellung von Bio-Benzin und biochemische Reaktionen (z.B. TCP: Thermal Conversion Process) [21], [31]-[34].

3.5.1 Biogas

Biogase haben einen hohen Methananteil und können deshalb in Erdgasmotoren oder in spez. Brennstoffzellen zur Stromgewinnung genutzt werden.

3.5.2 Pflanzenöle

Pflanzenöle besitzen eine hohe Viskosität. Um Ablagerungen und Belastungen des Motors vorzubeugen und die Zündwilligkeit im Winter zu gewährleisten müssen Serienpkws entweder mit speziellen Pflanzenöl-antrieben (z.B. von Elsbett) ausgestattet oder umgerüstet werden. Der Umbau der Dieselaggregate ist meist bivalent, d.h. es kann im laufenden Betrieb zwischen Pflanzenöl- oder Dieselspeisung umgeschaltet werden. Die Verringerung der Viskosität geschieht durch Erwärmung, entweder mit Hilfe von Wärmeübertrager, die vom Motorkühlwasser durchflossen werden oder durch das elektrische Beheizen des Pflanzenöls. Alternativ können der Motor und die Einspritzanlage umgerüstet werden.

Pflanzenölmotoren kann Öl aus Recycling-Kreisläufen zugeführt werden (siehe Abb. 3.20).



Abbildung 3.20: Pflanzölkreislauf mit Recycling; [33]

3.5.3 Biodiesel

Im Gegensatz zu Pflanzenölen sind bereits jetzt deutschlandweit mehr als 3 Millionen Fahrzeuge ohne Umrüstung biodiesel-tauglich. Augrund der hohen Reinigungswirkung von Biodiesel ist bei der erstmaligen Umstellung nach einigen Tankfüllungen der Kraftstofffilter zu wechseln. Additive verhindern das Ausflocken und machen ihn nach CFPP bis zu -20°C winterfest bzgl. Verstopfungen an Filter, Kraftstoffleitungen, etc. [32].

Die Herstellung (Umesterung von Rapsöl mit ca. 10% Methanol) benötigt allerdings Prozesswärme und es entstehen dabei ungereinigtes Glycerin und giftige Nebenprodukte im Waschwasser [34]. Niedrige Emissionen (siehe Abb. 3.21), der geschlossenen Energieträgern kompensieren obige Nachteile. Die Tankstellenverfügbarkeit ist mit 1800 Tank-

stellen deutschlandweit sogar besser als bei den Gasalternativen. Preiserhöhungen, durch Verknappung der Rohstoffe oder Steuererhöhungen sind nicht zu erwarten [32].

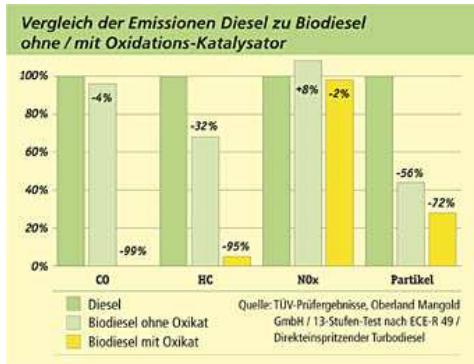


Abbildung 3.21: TÜV-Prüfergebnisse, Oberland Mangold GmbH; [32]

3.6 Hybridantriebe

In Hybridfahrzeugen kommen Benzin- und Elektromotor gleichzeitig zum Einsatz. Sich daraus ergebende Synergieeffekte resultieren in geringerem Verbrauch und günstigeren Schadstoffbilanzen.

Am Hybrid kommt keiner vorbei. Beim zweiten ADAC-EcoTest wurden 113 Fahrzeuge vom Kleinstwagen bis zur Oberklasse auf ihre Umweltverträglichkeit untersucht. Nur knapp verfehlten dabei der Toyota Prius 1.5 Hybrid mit 89 Punkten und der Honda Civic 1.3 Dsi IMA Hybrid (83) die 90 Punkte-Hürde für fünf Umweltsterne [35].

Neben der klassischen Benzin-Elektro Lösung sind andere Mischformen (Bivalente Antriebe) je nach Einsatzgebiet denkbar: Benzin/Diesel - Gas (Gasmotor bzw. Brennstoffzelle), Benzin/Diesel - Bio (z.B. Rapsöl, Bio-Gas, etc.) , Benzin/Diesel - Pressluft, Gas - Elektro (Brennstoffzelle - Solar), Preßluft - Elektro ... (siehe Abb. 3.22).

Man unterscheidet 2 verschiedene Bauweisen von Hybridfahrzeugen. Bei **seriellen** Hybridfahrzeugen kann nur der Elektromotor ein Moment auf die Räder übertragen. Der Benzinmotor arbeitet möglichst in seinem optimalen Drehzahlbereich (von ca. 2000-3500 rpm) und treibt den Generator zur Stromversorgung an. Bei **parallelen** Hybridfahrzeugen können je nach Betriebsstrategie Elektromotor und Benzin einzeln oder gemeinsam ein Moment auf die Räder übertragen. Die Kombination aus beiden sind **leistungsverzweigte** Hybrid-Antriebe.

Zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs sowie der Emissionen und zur Gewährleistung ausreichender Leistung, Reichweite, Betriebssicherheit und des Komforts werden **Betriebs-**

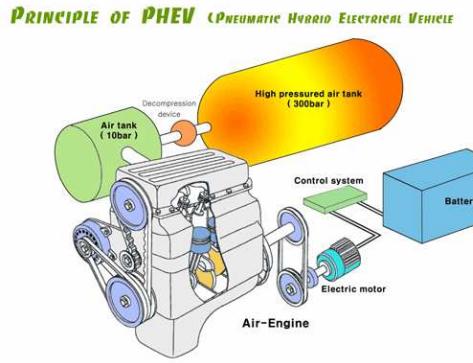


Abbildung 3.22: Pressluft-Elektro-Hybridantrieb; [38]

strategien (BCS: Baseline Control Strategy) verwendet. Die Betriebsstrategie definiert in Abhängigkeit des Fahrerwunsches und ausgewählter Systemgrößen den optimalen Betriebszustand, sowie die logische und zeitliche Abfolge der Betriebszustände und bestimmt damit z.B. wie die Momentenquellen verteilt werden. Realisiert werden diese z.B. über Kennlinien. Die Umschaltung zwischen den Betriebszuständen findet im laufenden Betrieb (Schaltzeit kleiner 500ms) über stufenlose Getriebe statt [38]. So ergibt sich je nach Fahrsituation und Fahrzeug (hier Honda Insight und Toyota Prius) ein anderer Energiefluss.

Anfahren: der Benzинmotor arbeitet im niedrigen Drehzahlbereich uneffizient, daher kommt die Energie bevorzugt aus der Batterie (siehe Abb. 3.23) [38].

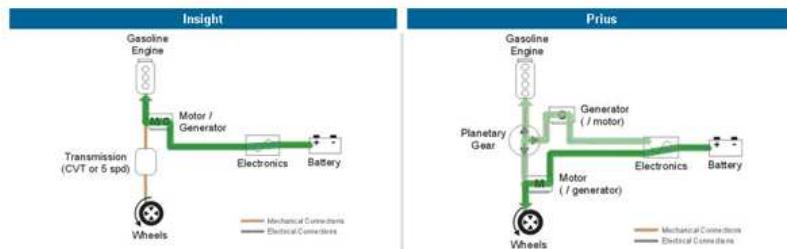


Abbildung 3.23: Hybridantrieb: Energieflüsse beim Anfahren; [38]

Beschleunigen: beide Motoren arbeiten gleichzeitig (Boost-Betrieb) (siehe Abb. 3.24) [38].

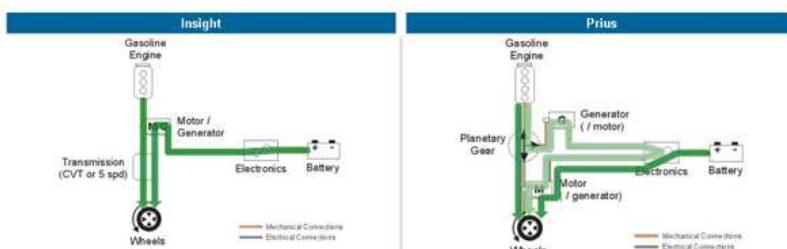


Abbildung 3.24: Hybridantrieb: Energieflüsse beim Beschleunigen; [38]

Konstante Geschwindigkeit: Durch Lastpunktanhebung arbeitet der Verbrennungsmotor immer in seinem idealen Drehzahlbereich. Die nicht benötigte mech. Energie des Verbrennungsmotors wird über den Generator in der Batterie gespeichert. Der Prius führt für das Laden überschüssige Energie des Generators an den E-Motor (siehe Abb. 3.25) ab [38].

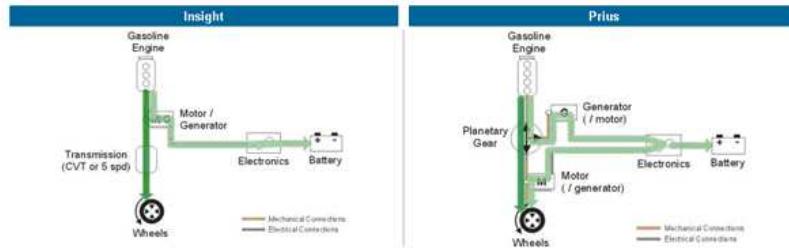


Abbildung 3.25: Hybridantrieb: Energieflüsse bei konstanter Fahrt; [38]

Bremsen: Die Bremsenergie wird zurück gewonnen und in der Batterie gespeichert (siehe Abb. 3.26) [38].

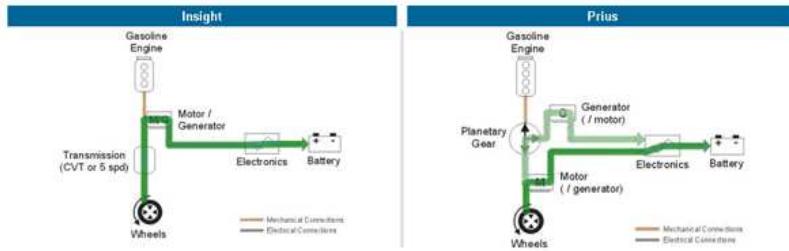


Abbildung 3.26: Hybridantrieb: Energieflüsse beim Bremsen; [38]

3.7 Zusammenfassung

Nach dem heutigen Stand der Technik und den zukünftigen absehbaren Entwicklungen ergeben sich für die Forschung und Industrie folgende Prämissen: Alle alternativen Antriebe benötigen weiterhin Primärenergie. Es scheint daher sinnvoll, die Bemühungen nicht auf die Entwicklung moderner Motoren zu beschränken. Um eine langfristige Verbesserung bewirken zu können, sollte die Energieversorgung ganz auf regenerative Energie umgestellt werden. Bereits entwickelte und einsetzbare Systeme erleichtern den Übergang. Die Serienreife von Gas und Hybirdantriebe ermöglicht dem Verbraucher bereits zum jetzigen Zeitpunkt umweltgerechtes Fahren. Für die Forschung sind die Daten und Ergebnisse der bereits eingesetzten alternativen Antriebe eine Wissensbasis für die weitere Entwicklung. Durch die Auswertung dieser Daten gewinnt sie Know-How das unersetztbar für die wirklich innovativen und alternativen Antriebe der Zukunft ist. Zu nennen wäre hier beispielweise das Know-How zur Speicherung von Wasserstoff, das beim Einsatz von

Gas-Autos bereits jetzt erworben werden kann. Oder die Entwicklung von leistungsstarker Elektronik bzw. Stromspeichermöglichkeiten, die momentan in Hybridautos erprobt und später in Brennstoffzellenautos verwendet werden können. Um Technologiesprünge für den Endverbraucher anziehend zu machen und damit die Markteinführung von neuen Produkten zu erleichtern, empfehlen sich ebenfalls Hybridlösungen, aus denen später die vollwertigen Motoren reifen.

Literaturverzeichnis

[1] Energieportal24 [2004-07-01]:

http://www.energieportal24.de/erdgas_fluessiggas_fluessiggas_fahrzeug-technik.php

[2] Gaz de France [2004-07-01]:

<http://www.gazdefrance.de/content/umwelt/erdgasfahrzeuge/>

[3] Landesanstalt für Umweltschutz (Baden-Württemberg) [2004-07-01]:

<http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt2/umweltdaten2003>

[4] Bundesumweltamt [2004-07-01]:

<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/brennstoffzelle.htm>

[5] Michael Springer, *Katastrophe in Raten*, in:

Spektrum der Wissenschaft, Bd. 7, 2004, S. 19-22.

[6] Philip Grassmann, *Feilschen um Filter*, in:

Süddeutsche Zeitung, 2004-07-06, S. 1.

[7] Die Welt [2004-07-01]:

<http://www.welt.de/daten/1999/07/08/0708ws120666.htm>

[8] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, *Das Erdöl im 21. Jahrhundert - Mangel oder Überfluß?* [2004-07-01]:

http://www.bgr.de/b11/erdoel_keh.htm#tabb2

<http://www.bgr.de/b11/abb2.htm>

[9] Colin Campbell [1998]: *Das Ende des billigen Öls*

<http://www.energiekrise.de>

[10] IAE-Studie [2002]: *Welt-Energie-Ausblick 2002*

http://www.iea.org/newsroom/wea2002_highlights.pdf

- [11] Lehrstuhl für Physik der LMU-München [2004-07-01]:
http://www.physik.uni-muenchen.de/leifphysik/web_ph10/umwelttechnik/13statistik/reichweite.htm
- [12] REXplore [2004-07-01]:
http://www.betterworld.com/getrealist/article.php?story=20040214014558571
- [13] BP, Statistical Review of World Energy 2004 [2004-07-01]:
http://www.bp.com
- [14] World Oil Market and Oil Price Chronologies: 1970 - 2003 [2004-07-01]:
http://www.eia.doe.gov/cabs/chron.html
- [15] Honda [2004-07-01]:
http://www.honda.com/
- [16] Mazda [2004-07-01]: *Mazda6 MPS-Konzeptfahrzeug*
http://www.mazda.com
http://www.mazda6-forum.de.vu
http://www.motor-talk.de/t27512/f202/s/thread.html
- [17] Hyundai [2004-07-01]: *Concept Cars: ULEV*
http://www.hyundai.com.au/company-concept-ULEV.asp
- [18] Volkswagen AG [2004-07-01]: *das erste 1-Liter-Auto der Welt*
http://www.volkswagen.de
http://www.volkswagen-umwelt.de/buster/buster.asp?i=_content/wissen_303.asp
http://www.learnline.de/angebote/automobil/info/weniger0.htm
- [19] Österreichische Gesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [2004-07-01]: *Die neue Verkehrspolitik*
http://www.gsv.co.at/doku/verkehrspolitik.pdf
- [20] Elcats [2004-07-01]: *Kraftstoffkosten-Vergleichsrechner*
http://www.elcats.de
- [21] Adac [2004-07-01]: *Alternative Kraftstoffe*
http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Kraftstoffe_Umwelt/Alternative_Kraftstoffe/Erdgas
http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Kraftstoffe_Umwelt/Alternative_Kraftstoffe/Autogas
http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Kraftstoffe_Umwelt/Alternative_Kraftstoffe/Biodiesel

- [22] Fiat [2004-07-01]: *Multipla 2002*
http://www.fiat.com/cgi-bin/pbrand.dll/FIAT-COM/showroom/showroom.jsp
- [23] Opel [2004-07-01]: *Opel Zafira 1.6 CNB, CNG*
http://www.opel.de
- [24] Howstuffworks [2004-07-01]:
http://auto.howstuffworks.com/hydrogen-economy.htm http://auto.howstuffworks.com/fuel-cell.htm
- [25] Umweltdialog.de [2004-07-01]:
http://www.umweltdialog.de
- [26] BMW [2004-07-01]: *BMW 745h*
http://www.7er.com/cleanenergy
http://www.bmwgroup.com/scienceclub
- [27] Mercedes-Benz [2004-07-01]: *Necar*
http://www.mercedes-benz.com/com/d/home/innovation/laboratory/index.html
http://www.daimlerchrysler.com/dccom/
www.sandiegometro.com/ 1999/sep/coverstory.html
- [28] Motor Developpement International sa [2004-07-01]:
http://www mdi.lu
- [29] Bildungsserver NRW [2004-07-01]: *Luftauto*
http://www.learn-line.nrw.de/angebote/automobil/info/mdi_mot.htm
- [30] Luftauto [2004-07-01]:
http://www.aircars.de
http://www.theaircar.ch
http://www.luftauto.ch
- [31] TCP Changing World Technologies [2004-07-01]: *Thermal Conversion Process*
http://www.changingworldtech.com
- [32] Biodiesel.de [2004-07-01]:
http://www.biodiesel.de
- [33] Biodrive [2004-07-01]:
http://www.biodrive.ch

- [34] Dipl.-Ing. O. Falk, Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Meyer-Pittroff:
Anlagenkonzept für die dezentrale Herstellung von Biodiesel; Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie
<http://www.wzw.tum.de/blm/leu/skripten/manuskript%20banz.pdf>
- [35] Adac [2004-07-01]: *EcoTest 2004*
http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Kraftstoffe_Umwelt/EcoTest
- [36] Toyota [2004-07-01]: *Prius 2003*
<http://www.toyota.de/showroom/prius2003>
- [37] Howstuffworks [2004-07-01]: *Hybrid-Car*
<http://auto.howstuffworks.com/hybrid-car.htm>
- [38] Energine [2004-07-01]: *PHEV*
<http://www.energine.com/eng>
- [39] Manuel Singer:
Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge; Hauptseminar 2002 am Lehrstuhl für elektrische Antriebe, TU-München.

Kapitel 4

Fahrzeugsensorik (I): Radar, Lidar, Ultraschall und Video

Über den Autor

Daniel Grundl studiert zur Zeit im 10. Semester Elektro- und Informationstechnik mit Schwerpunkt Mikromechatronik an der TU München.

4.1 Einleitung

Eine der wichtigsten Aufgaben eines Fahrzeugführers besteht darin, stets den Fahrweg und die Fahrzeugumgebung zu beobachten. Ziel ist dabei gefährliche Situation für sich selbst, das Fahrzeug und andere Verkehrsteilnehmer zu erkennen, entsprechend darauf zu reagieren und somit Unfälle und Schäden zu verhindern.

Die vorwiegend visuelle Wahrnehmung des Menschen seiner Umgebung ist jedoch in ihrer Leistungsfähigkeit eingeschränkt durch ...

- ... Blickrichtung/-feld: Keine gleichzeitige Beobachtung der Umgebung vor, hinter, links und rechts des Fahrzeugs möglich.
- ... Beleuchtungs- und Witterungsverhältnisse: Dämmerung, Blendung, Nebel, Regen usw.
- ... Reizüberlastung: Müdigkeit

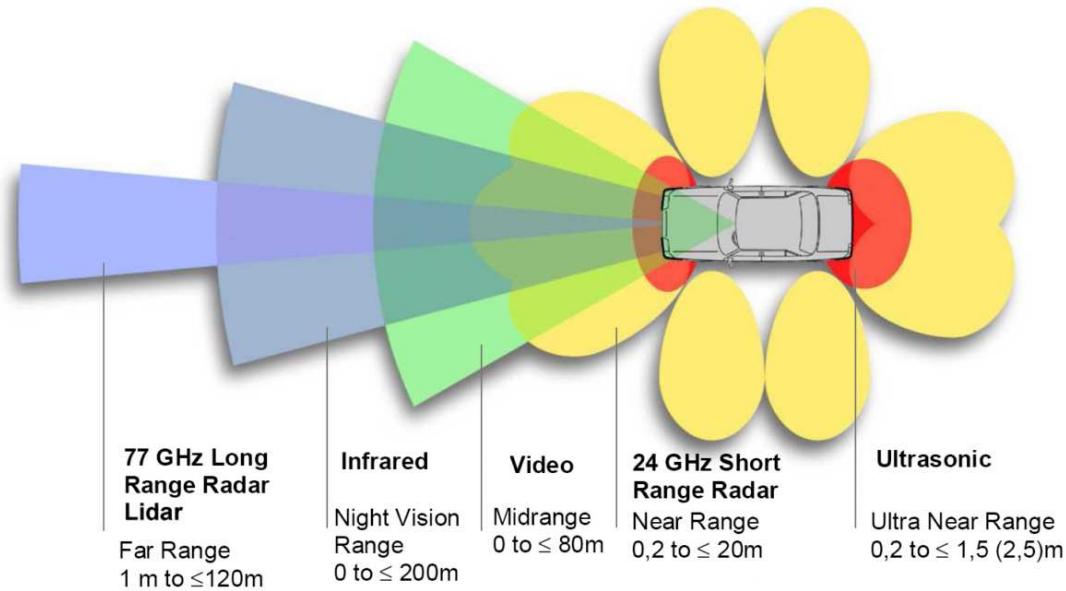


Abbildung 4.1: Sensorarten und Reichweite [Kno03]

Diese Einschränkungen legen Nahe, dem Fahrzeugführer mit Hilfe von Assistenzsystemen

zusätzliche Informationen zur Verfügung zu stellen, oder ihm Aufgaben bei der Fahrzeugführung abzunehmen.

Solche Assistenzsysteme benötigen Sensoren, um die Umgebung „wahrnehmen“ zu können. Zur Abtastung der Fahrzeugumgebung stehen verschiedene Sensorarten mit unterschiedlichen Eigenschaften (Reichweite, Auflösung, Messmethoden, usw.) zur Verfügung (Abb. 4.1).

Im Folgenden wird kurz auf die verwendeten physikalischen Messprinzipien eingegangen. Anschließend werden die einzelnen Sensorarten genauer beschrieben.

4.2 Physikalische Messprinzipien

4.2.1 Laufzeitmessung

Bei der Laufzeitmessung wird eine spezifische Wellenfront in Richtung des zu detektierenden Objekts ausgesendet, dort zurückreflektiert und am Sendeort wieder detektiert. Nun wird die Zeit von der Aussendung t_0 bis zur Reflexion und dem Wiedereintreffen im Sendeort t_1 gemessen. Die gemessene Zeit ist direkt proportional zum Abstand des Objekts (Abb. 4.2).

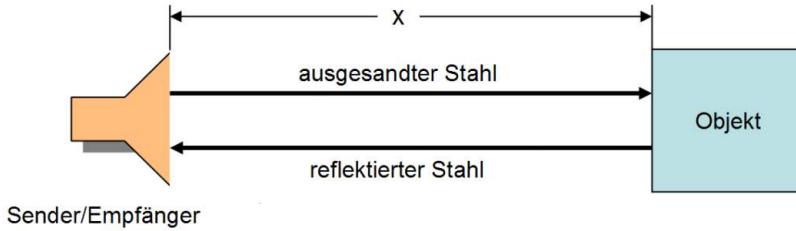


Abbildung 4.2: Prinzip der Laufzeitmessung

Mittels der Ausbreitungsgeschwindigkeit v der Wellen und der gemessenen Laufzeit $\Delta t = t_1 - t_0$ kann der Abstand x mit $x = v \frac{\Delta t}{2}$ berechnet werden.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt von der Wellenart (Schall, elektromagnetisch Wellen) und dem Ausbreitungsmedium (z.B. Luft) ab.

$$v_{Schall,Luft} = 330 \text{ m/s}$$

$$v_{Licht,Luft} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

4.2.2 Dopplereffekt

Der Dopplereffekt dient dazu die Geschwindigkeit eines Objekts relativ zum Beobachter (Fahrzeug) zu messen. Es werden, wie bei der Laufzeitmessung, Wellenfronten ausgesendet

und die Frequenzänderung des reflektierten Strahls gemessen, die Rückschlüsse auf die Relativgeschwindigkeit des Objekts zulässt.

Entfernt sich ein Objekt vom Beobachter, werden die Wellenfronten auseinander gezogen und die Frequenz verringert sich (Abb. 4.3, Beobachter 2). Analog erhöht sich die Frequenz, wenn sich ein Objekt dem Beobachter nähert (Abb. 4.3, Beobachter 1).

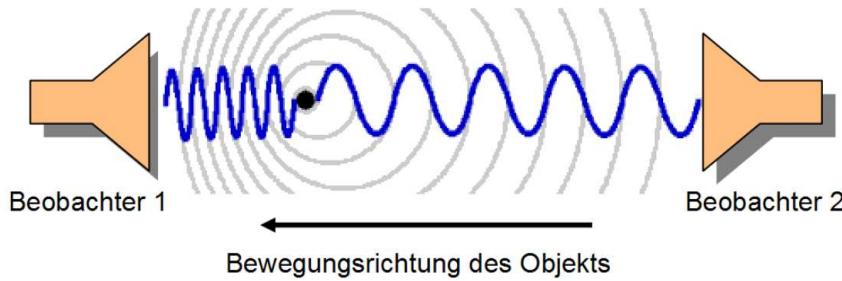


Abbildung 4.3: Dopplereffekt

Die Relativgeschwindigkeit v_{rel} lässt sich aus der gesendeten Frequenz f_S und der reflektierten Frequenz f_R mit folgender Gleichung berechnen $v_{rel} = \frac{1}{2} \left(\frac{f_R}{f_S} - 1 \right) \cdot c$ [Bir95].

Diese Gleichung gilt nur bei $v_{rel} \ll c$. Negative Geschwindigkeitswerte stehen für eine Entfernung des Objekts vom Beobachter, positive für eine Annäherung.

4.3 RADAR (RAdio-Detection-And-Ranging)

Hier gibt es zwei Arten von Radarsensoren, das Fernbereichs- und das Nahbereichsradar. Beide arbeiten nach den gleichen Messprinzipien. Der Dopplereffekt wird zur Messung der Relativgeschwindigkeit und der Laufzeitunterschied zur Messung des Abstandes von Objekten in der Fahrzeugumgebung angewendet. Die Objekte werden als Punktbewegungen eines Reflexionszentrums detektiert.

Klare Vorteile von Radarsensoren sind die Unabhängigkeit von den Wetterbedingungen und die direkte Messung von Abstand und Relativgeschwindigkeit. Ein Nachteil ist jedoch, dass die Objekte nur als Punkte erfasst werden, und dadurch keine Abbildung ähnlich dem menschlichen Sehen ermöglichen (wie z.B. Video).

4.3.1 Fernbereichsradar

Das Fernbereichsradar erfasst die Relativgeschwindigkeit und den Abstand von Objekten vor dem Fahrzeug in einem Abstand von 2 bis 120m. Die Radarkeule hat einen Öffnungswinkel von bis zu $\pm 4^\circ$ und die verwendete Frequenz beträgt 77 GHz [Kno03]. Die Objektausdehnung kann i. a. nicht detektiert werden.

Fernbereichsradar befindet sich bereits seit 2001 in Serie und wird bei dem ACC Assistenzsystem (Adaptive Cruise Control) bei Fahrzeugen der Oberklasse von BMW, Mercedes und VW eingesetzt. ACC wird zur Zeit aber nur bei Geschwindigkeiten über 30 km/h angewandt, da die Erfassung im Nahbereich zu ungenau ist und dadurch eine „Stop-and-Go“-Funktion noch nicht möglich ist.

4.3.2 Nahbereichsradar

Zur Detektierung von Abstand und Relativgeschwindigkeit von Objekten im Nahbereich des Fahrzeuges kommt das Nahbereichsradar zum Einsatz. Es hat eine Reichweite von 0,25 bis 20m mit einer Genauigkeit von $\pm 2\text{cm}$. Die Öffnungswinkel sind im Vergleich zum Fernbereichsradar, mit $\pm 45^\circ$ horizontal und $\pm 15^\circ$ vertikal, um einiges größer und können mit dielektrischen Linsen variiert werden. Der Mittelwert der abgestrahlten Leistung ist mit unter 1mW sehr gering [Kno03].

Mit Hilfe des Nahbereichsradars können sehr genaue Informationen über die nähere Umgebung gewonnen werden, mit diesen zusätzliche Assistenzsystem wie ...

- ... Einpark- und Rückfahrhilfen
- ... Überwachung des Totenwinkels
- ... Pre-Crash-Detaktion
- ... Erweiterung von ACC im Nahbereich um LSF (low-speed-following) und Stop-and-Go Funktion.

realisiert werden können (Abb. 4.4).

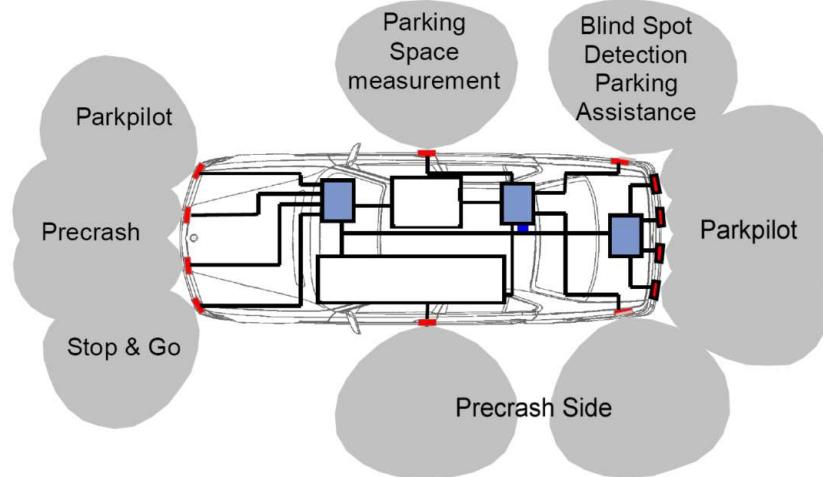


Abbildung 4.4: Nahbereichsradar: mögl. Assistenzsysteme [Kno03]

Das Nahbereichsradar befindet sich zur Zeit noch nicht im Einsatz, da in Europa noch die nötige Frequenzzulassung fehlt. In den USA wurde die entsprechende Zulassung bereits 2002 erteilt.

4.4 LIDAR (Light-Detection-And-Ranging)

Lidar wird hier am Beispiel des Laserscanners ALASCA der Firma IBEO vorgestellt [web].

Der verwendete Laser hat die Laserklasse 1 und ist somit augensicher. Seine Wellenlänge liegt mit ca. 1000nm im Infrarotbereich und ist dadurch für das menschliche Auge nicht sichtbar. Die Winkelauflösung beträgt $0,25^\circ$ und die Reichweite 100m, mit einer Genauigkeit von $\pm 3\text{cm}$.

Der Scanner kann horizontal einen Bereich von 270° mit einer Scannfrequenz von 10 bis 40 Hz erfassen. Der vertikale Öffnungswinkel beträgt $3,2^\circ$ und ist in vier Ebenen unterteilt (Abb. 4.5 links). Der System basiert auf dem Messprinzip der Lichtpulslaufzeitmessung, mit der der Abstand zu Objekten gemessen werden kann. Die Lichtpulse werden mit einer Frequenz von 14,4kHz ausgesendet [KCF04][Für03].

Vorteile von Lidar sind das hohe Auflösungsvermögen, bedingt durch die kleine Wellenlänge des Lasers, die direkte Abstandsmessung und Messung der Objektausdehnung durch Hard- und Softwareunterstützung.

Zu den Nachteilen dieses Systems gehören die bedingte Unabhängigkeit von der Witterung und die Reflexionspunkte basierende Abbildungen, die nicht dem Menschlichen Sehen entsprechen (Abb. 4.5).

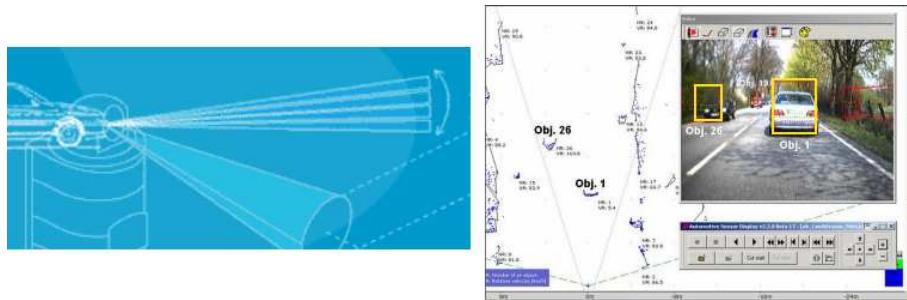


Abbildung 4.5: LIDAR:Scanner und Objekterfassung [web]

Da wegen dem Prinzip der Lichtpulslaufzeitmessung nur der Abstand eines Objektes direkt zur Verfügung steht, ist eine hard- und softwareabhängige Aufbereitung der Daten nötig, um Zugang zur Geschwindigkeit und Ausdehnung von Objekten zu bekommen.

Objekte können durch ihren spezifischen Absorptions-, Reflexions- und diffusen Streuungsgrad erfasst werden. Ist ein Objekt erfasst kann die Ausdehnung und die Geschwindigkeit durch Vergleichen der gemessenen Reflexionspunkte berechnet werden (Abb. 4.5 rechts). Diese Daten könnten z.B. für ein Pre-Crash-System verwendet werden. Hierzu ist

| Klasse | Länge[m] | Breite[m] | Geschw.[km/h] |
|----------------|-----------|-----------|------------------|
| LKW | 5,5 - 20 | 2,1 - 2,9 | <120 |
| PKW | 2,7 - 5,5 | 1,0 - 2,1 | <250 |
| Motor-/Fahrrad | <2,1 | <1,5 | <250 |
| Fußgänger | <1,5 | <1,0 | 2-40 |
| Unbekannt kein | <1,5 | <1,0 | <2 |
| Unbekannt groß | >20 | >2,9 | Ohne Betrachtung |

Tabelle 4.1: Lidar: Objektklassifizierung [Für03]

es aber noch nötig die Objekte in Objektklassen abhängig von Abmessung und Geschwindigkeit einzuteilen, um eventuelle Gefahrensituation richtig zu bewerten (Tab. 4.1).

Das System ist sehr kompakt und witterfest. Es kann einfach im Kühlergrill oder in der Stoßstange eines Fahrzeuges montiert werden.

4.5 Ultraschall

Ultraschall wird zur Erfassung der näheren Umgebung um das Fahrzeug eingesetzt (Abb. 4.6). Seine Reichweite ist in Luft sehr eingeschränkt, und kann daher nur im Nahbereich von 0,2 bis 1,5m eingesetzt werden. Für zukünftige Systeme ist eine Erweiterung auf 2,5m geplant.

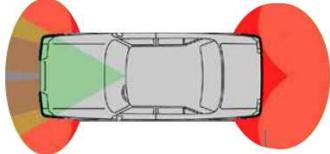


Abbildung 4.6: Ultraschall: Erfassungsbereiche [Kno03]

Die Ausbreitung von Ultraschall, findet, wie der Name schon sagt, nur in Schallgeschwindigkeit (330m/s in Luft) statt, und ist somit um ein Vielfaches langsamer als die Lichtgeschwindigkeit (300.000km/s in Luft), mit der die anderen, hier vorgestellten Sensoren, arbeiten. Die verwendete Frequenz beträgt ca. 50kHz.

Die Erzeugung findet mittels Piezoelementen, die gleichzeitig auch Empfänger sind statt. Das Piezoelement arbeitet abwechselnd als Sender und Empfänger. Als Messprinzip kommt wieder die Laufzeitmessung zum Einsatz, mit dem der Abstand zum Objekt direkt gemessen werden kann.

Vorteile von Ultraschall sind die geringen Beugungseffekte, die geradlinige Ausbreitung und der einfache Sender/Empfängeraufbau. Durch die oben bereits erwähnte Nachteile

wie kurze Reichweite in Luft und der relative großen Wellenlänge, welche eine niedriges Auflösungsvermögen bedingt, kann Ultraschall nur direkt in der Fahrzeug Umgebung und bei niedrigen Geschwindigkeiten (<20km/h) eingesetzt werden.

Wegen der geringen Produktionskosten und dem einfachen Einbau, z.B. in Stoßstangen, werden ultraschallbasierende Einpark- und Rückfahrhilfen bereits von vielen Fahrzeugherstellern in großen Stückzahlen verbaut. Ultraschall ist die meistverbreitete Sensorart, der hier vorgestellten Sensoren.

4.6 Infrarot

Infrarotkameras werden bekanntlich beim Militär als Nachtsichtgeräte verwendet. Mit ihnen wird die Wärmestrahlung von Körpern, ähnlich wie bei einer Kamera im sichtbaren Bereich, bildlich dargestellt (Abb. 4.7 oben). Je Heller ein Objekt erscheint, desto mehr Wärme strahlt es ab. Die Wellenlänge der Infrarotstrahlung befindet sich über der Wellenlänge von sichtbaren rotem Licht bei 0,8 bis 1000 μ m.

Da Infrarotkameras auf Wärmeabstrahlung von Körpern reagieren, sind ihre Aufnahmen beleuchtungsunabhängig. Ein weiterer Vorteil der Infrarotstrahlung ist die Witterungsunabhängigkeit. Diese Vorteile führen dazu, dass Infrarotkameras bei Dämmerung, Nacht, Regen, Nebel und Schnee immer ein klares Bild von der Umgebung liefern. Diese Bilder könnten dann via HUD (Head-Up-Display) dem Fahrer zur Verfügung gestellt werden, und dieser kann dann eventuelle Gefahrensituation früher erkennen und schneller darauf entsprechend reagieren (Abb. 4.7 oben).

Des Weiteren können die Bilder mit vorhandener Bildverarbeitungssoftware aus dem sichtbaren Bereich aufbereitet und für Assistenzsystem (z.B. halten der Fahrspur) verwenden werden. Diese Bildverarbeitungen sind jedoch noch sehr hardware- und softwareaufwendig.

Es gibt, ähnlich wie beim Radar, zwei Arten von Sensoren, Fernbereichs- und Nahbereichsinfrarot, die wiederum verschiedenen Eigenschaften aufweisen.

4.6.1 Fernbereich FIR (Far-Infrared-Radiation)

Das FIR detektiert Infrarotstrahlung der Wellenlänge von 7000 bis 12000nm mit einer Reichweite von 0 bis 200m. Diese Reichweite würde den Sichtbereich bei einer Nachtfahrt im Gegensatz zum Aufblendlicht ca. verdreifachen (Abb. 4.7 unten).

Ein großer Vorteil von FIR ist, dass keine aktive Ausleuchtung nötig ist, sondern die emittierte Wärmestrahlung der Objekte genügt.

Die Detektortechnologie von FIR war bis vor Kurzem noch sehr aufwendig, es war eine Kühlung auf ca. -200°C nötig. Aus diesem Grund kam FIR nur überwiegend im militärischen Bereich zum Einsatz. Durch neue Detektortechnologien wie z.B. Mikrobolometer,

die ohne Kühlung auskommen, wird FIR jetzt auch für den zivilen Bereich verfügbar. Die Optik von FIR besteht aus Germanium oder speziellem Tex-Glass.

FIR ist seit 2000 auf dem Markt, und wird z.B. bei Cadillac als HUD angeboten. Die Auflösung zur Zeit verfügbarer FIR-Kameras beträgt 320x240 Pixel (QVGA). [Kno03]

4.6.2 Nahbereich NIR (Near-Infrared-Radiation)

NIR arbeitet im Gegensatz zu FIR zusätzlich mit aktiver Ausleuchtung der Umgebung. Es wird Infrarotstrahlung in der Nähe des sichtbaren Bereich mit einer Wellenlänge von 800 bis 1100nm detektiert. Für die aktive Ausleuchtung werden Halogenscheinwerfer verwendet, die ein Spektrum von 380 bis 2000nm, mit einem Maximum zwischen 900 und 1000nm, aufweisen.

Zur Ausnutzung dieses Maximums werden Silizium Sensoren verwendet, die Strahlung der Wellenlänge von 400 bis 1100nm detektieren können. Dadurch deckt NIR den sichtbaren und den unteren Infrarotbereich ab, und kombiniert diese in der Darstellung. Durch diese Kombination, steigt die Reichweite bei schlechten Witterungsbedingungen und schlechten Helligkeitsverhältnissen, kommt aber mit 0 bis 80m (zukünftig 100m) nicht an die von FIR ran.

Ein Vorteil von NIR gegenüber FIR ist, dass auch nicht wärmestrahlende Objekte, wie Straßenlinien, detektierbar sind.

NIR ist kurz vor der Markteinführung. Die verfügbaren Kameras haben eine Auflösung von 640X480 Pixel (VGA). [Kno03]

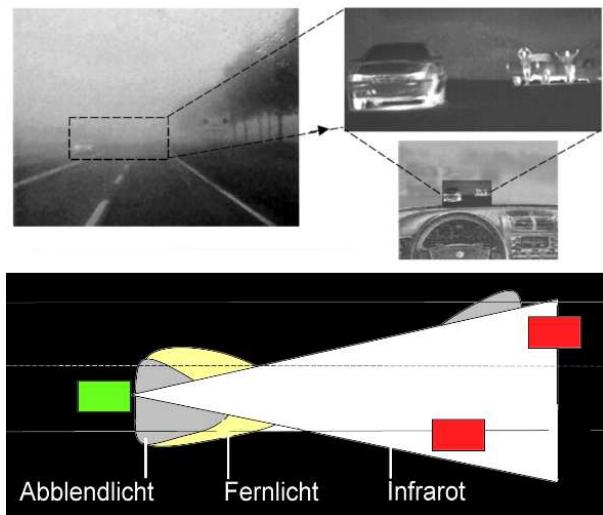


Abbildung 4.7: Infrarotaufnahme und -reichweite [Kno03]

4.7 Video

Video ist der Wahrnehmung des menschlichen Auges am ähnlichsten, da es das sichtbare Licht (Wellenlänge 380nm bis 780nm) darstellt. Durch diese Darstellung kann das Bild dem Fahrer, ohne großen Aufwand, direkt zu Verfügung gestellt werden (z.B. Rückfahrrhilfe). Leider ist Video, genau wie das menschliche Auge, sehr Witterungs- und Helligkeitsabhängig.

Die Videodaten liefern keine direkten Messwerte wie Abstand und Relativgeschwindigkeit von Objekten. Diese Werte können nur durch erheblichen Hard- und Softwareaufwand mit entsprechender Bildverarbeitung zur Verfügung gestellt werden. Diese Voraussetzungen sind zur Zeit leider noch nicht erfüllt.

Für Video stehen aktuell zwei Sensorarten, CCD (Charg-Coupled-Device) und HDRC (High-Dynamic-Range-CMOS) zur Verfügung. CCD-Sensoren werden in herkömmlichen Digitalkameras eingesetzt und sind in der Helligkeits- und Kontrastdynamik den HDRC-Sensoren wesentlich unterlegen (Abb. 4.8). Bei extremen Helligkeitsunterschied, hier Ausfahrt aus einem Tunnel, ist bei einer CCD-Aufnahme fast nichts zu erkennen, während bei einer HDRC-Aufnahme deutliche Konturen der Straße und der anderen Fahrzeuge zu erkennen sind. Aufgrund dieses Dynamikvorteil wird sich hier die HDRC-Technologie behaupten. [Kno03]

Genauere Informationen über Videosystem, Videoverarbeitung und videobasierende Assistenzsystem werden explizit im nächsten Beitrag behandelt.

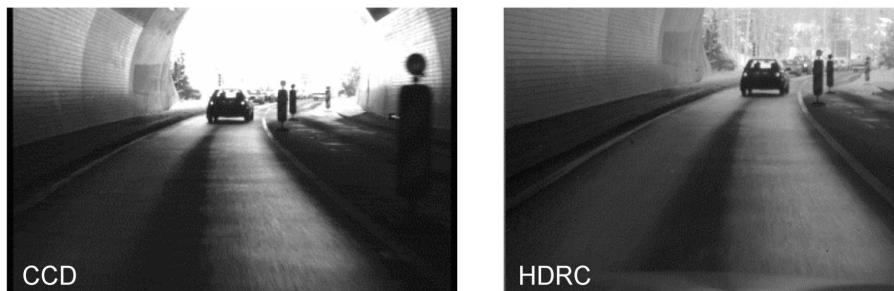


Abbildung 4.8: Vergleich von CCD und HDRC [Kno03]

4.8 Zusammenfassung

Durch die Vielzahl an zur Verfügung stehenden Sensoren zur Erfassung der Fahrzeugumgebung und der verstärkten Nachfrage nach mehr Sicherheit und Komfort, werden in nahere Zukunft immer mehr Assistenzsystem zur Verfügung stehen.

Einer der nächsten großen Schritte wird die Einführung des Nahbereichsradsars sein, das den kompletten Nahbereich des Fahrzeuges abdecken wird, und dadurch zusätzliche Assistenzsystem, wie Pre-Crash und ACC-LSF+StopAndGo, möglich macht.

Infrarotsensoren, sowie Radar können einen wesentlichen Teil zur Unfallvermeidung bei schlechten Sicht- und Witterungsverhältnissen beitragen.

Sehr vielversprechend sind auch die HDRC-Video-Sensoren, die mit entsprechender Hard- und Software den Assistenzsystem eine Vielzahl an zusätzlichen Information liefern können.

Jedoch darf nicht außer Acht gelassen werden, dass mit steigender Sensorzahl und Fusion der gewonnenen Daten für verschiedene Assistenzsystem, die Komplexität und die Fehleranfälligkeit enorm steigt.

Die Nachfrage nach mehr Sicherheit durch Assistenzsysteme bieten ökonomisch gesehen ein großes Potential. Dies darf aber aufgrund von Wettbewerb und Konkurrenzkampf, nicht auf die leichte Schulter genommen werden.

Im Großen und Ganzen werden die vorgestellten Sensoren den „virtuellen Sicherheitsgurt“ um das Fahrzeug komplettieren, den Fahrer mit zusätzliche Informationen versorgen, oder Aufgaben abnehmen, und so den Straßenverkehr sicherer machen.

Literaturverzeichnis

- [Bir95] Stefan Birner. Der Dopplereffekt - Facharbeit, 1995. <http://www.stefan-birner.de/a2803/doppler.html#4>.
- [Für03] Lages Ulrich; Mario Brumm; Kay Ch. Fürstenberg. Objekterkennung in Pre-Crash-Phasen unter Verwendung von Laserscannern. Technischer Bericht, IBEO Automobile Sensor GmbH, Universität Ulm, 2003.
<http://www.mrm.e-technik.uni-ulm.de/homepage/fuerstenberg/fuerstenberg.htm>
<http://www.ibeo-as.de>.
- [KCF04] Klaus Dietmayer Kay Ch. Fürstenberg;. Fahrzeugumfeldsensisierung mit mehrzeiligen Laserscannern. Technischer Bericht, Universität Ulm, Department of Measurement, 2004.
<http://www.mrm.e-technik.uni-ulm.de/homepage/fuerstenberg/fuerstenberg.htm>.
- [Kno03] Werner Uhler; Hans-Joerg Marthony; Peter M. Knoll. Driver Assitance Systems for Safety and Comfort. Technischer Bericht, Robert Bosch GmbH, Driver Assitance Systems Leonberg, Germany, 2003.
http://www.edel-eu.org/archive/documents/Driver_Assistance_Systems.pdf.
- [web] <http://www.ibeo-as.de>, <http://www.alasca.info>.

Kapitel 5

Bildverarbeitung im Fahrzeug

Über den Autor

Markus Koban studiert zur Zeit im 8. Semester Elektro- und Informationstechnik an der TU München.

5.1 Einleitung

Die Fähigkeit, die Umwelt visuell aufnehmen zu können, bietet so viele Vorteile, dass fast alle sich bewegenden Lebewesen im Laufe der Evolution einen Sehsinn entwickelt haben. Wieso können Autos aber bis jetzt noch nicht sehen? [Dic02]

Mit der wachsenden Leistung bildverarbeitender Systeme ist es immer besser möglich, Autos mit einem „Sehsinn“ auszustatten. Dadurch sollen vor allem Fahreffizienz, -komfort und -sicherheit erhöht werden. Ein hohes Potenzial für moderne Fahrassistenz- und Sicherheitssysteme bietet unter den Umfeldsensoren (z.B. Infrarot, Lidar, Radar, Ultraschall) die Videokamera.

Sie hat dort ihre Vorteile, wo andere Sensoren Nachteile haben. Das seitliche Auflösungsvermögen ist viel besser als z.B. bei einem Radarsensor. Dies ist u.a. wichtig bei der Detektion zweier nebeneinander fahrender Fahrzeuge.

Je nach Anwendungsfall werden Einzelbilder oder Bildsequenzen ausgewertet. Dabei erhöht sich die Komplexität von der einfachen Darstellung des Bildes über Objektdetektion, Verfolgung und Klassifizierung von Objekten bis hin zur Interpretation von Szenen. In Kapitel 5.2 dieser Arbeit möchte ich bedeutende Merkmale verschiedener Kamerasensoren diskutieren. Danach werden in Kapitel 5.3 einige visuelle Fahrassistenzsysteme vorgestellt. Darüberhinaus werde ich auf die wichtige Problematik der Fahrspurerkennung in Kapitel 5.4 eingehen.

5.2 Kamermerkmale

Es gibt zwei weit verbreitete Arten von Digitalkamerasensoren, die ich im folgenden vorstellen möchte.

5.2.1 CCD (Charged Coupled Devices) Sensoren

In jeder Photodiode dieses Sensoryps werden durch den Einfall von Licht Elektronen erzeugt. Diese werden in sogenannten „Ladungspools“ gesammelt. Die Ladungspools können nur eine maximale Anzahl von Elektronen speichern, wodurch die Dynamik der Kamera begrenzt wird. Die Zahl der gebildeten Elektronen ist linear zum einfallenden Licht. Trifft zu viel Licht auf eine Photodiode, kann die Speicherkapazität der Ladungspools überschritten werden. Diesen Effekt nennt man „Blooming“. Dabei fließen überschüssige Elektronen zu den Ladungspools angrenzender Pixel. [Rat01] In Abbildung 5.1 kann

man den Bloomingeffekt beobachten, der durch das helle Licht der Scheinwerfer ausgelöst wurde.



Abbildung 5.1: CCD-Aufnahme [Win03]

Dadurch ist eine weitere Bildverarbeitung für Automotiv-Zwecke nicht mehr ausreichend möglich. Deshalb werden in Kamerasyystemen für Fahrzeuge keine CCD- sondern CMOS-Sensoren verwendet. [Win03]

5.2.2 CMOS (Complementary Metal Oxid Semiconductor) Sensoren

Das Prinzip der CMOS Sensoren besteht darin, jedes Pixel einzeln zu verdrahten und ansprechen zu können. CMOS Sensoren haben die Möglichkeit eine ganze Reihe von Verarbeitungsschritten wie z.B. Analog - Digital - Wandlung, Bildkontrolle und Verschlussautomatik (Shuttering) direkt auf dem Chip zu implementieren. Häufig basieren die CMOS Architekturen auf „Aktiven Pixel Sensoren“ (APS)- Technologien, die die Photodioden mit der Ausleseelektronik für jeden Bildpunkt kombinieren. Dadurch kommt es zu einer schlechteren Flächenausnutzung als bei CCD-Sensoren, weil auf jede Photodiode noch eine Vielzahl von Transistoren kommen. Das Verhältnis von lichtempfindlicher Fläche zur gesamten Fläche eines Bildpunktes nennt man auch „Apertur“, oder „Füllfaktor“. Dieses Verhältnis kann je nach Typ von 30% bis 80% variieren. Der Vorteil dieser Techik ist, dass in jedem Pixel die entstandene Ladungsmenge in eine Spannung umgewandelt wird und jedes Pixel einzeln adressierbar ist. Somit kann kein Blooming-Effekt auftreten und durch gezieltes Ansprechen von Bildbereichen, auch „Windowing“ genannt, können für diesen Bereich höhere Taktraten erreicht werden. [Rat01] Die Abbildung 5.2 zeigt ein Bild einer CMOS Kamera, bei dem keine Blooming-Effekte aufgetreten sind.



Abbildung 5.2: CMOS Aufnahme [Win03]

5.3 Bildverarbeitende Fahrassistentensysteme

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die verschiedenen Einsatzgebiete bildverarbeitender Fahrassistentensysteme. Es werden sowohl Systeme, die schon Serienreife erlangt haben, als auch solche, die sich noch in der Entwicklung befinden, vorgestellt.

5.3.1 Rückfahrkamera als Einparkhilfe

Viele Autofahrer haben beim rückwärtigen Einparken Schwierigkeiten, weil der Bereich hinter dem Fahrzeug nicht komplett eingesehen werden kann, wie Abbildung 5.3 zeigt. Auch ein Blick über die Schulter oder in den Rückspiegel reicht meist nicht aus, um sich einen vollständigen Überblick zu verschaffen. Ein Parkhilfesystem mit einer Weitwinkel-

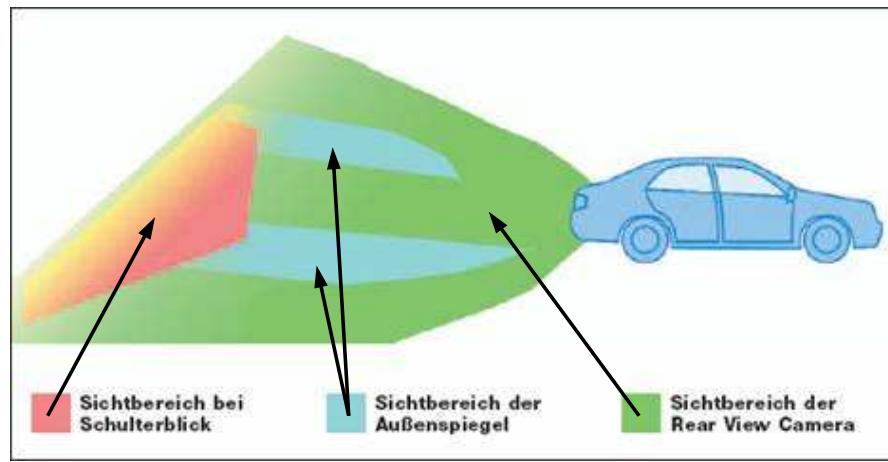


Abbildung 5.3: Sichtbereich der Rückfahrkamera im Vergleich [Co03]

kamera im Heck kann den Fahrer unterstützen, den Bereich hinter seinem Fahrzeug besser

einzusehen. Die Bilddaten der Kamera sind aufgrund der Weitwinkeloptik stark verzerrt und müssen entzerrt werden. Dann werden zusätzliche Hilfslinien zur Abstandsbestimmung eingeblendet. Sinnvolle Hilfslinien sind z.B. die Fahrzeugsbreite und die Fahrspur in Abhängigkeit vom Lenkeinschlag.

Die Firma Hella KG möchte ein serienreifes Produkt für PKW's 2006 auf den Markt bringen. [Co03] Eine andere Möglichkeit, dem Fahrer mehr Übersicht zu verschaffen wäre, aus dem gewonnenen Bildmaterial ein Bild aus der Vogelperspektive zu berechnen, wie in Abbildung 5.4 zu sehen ist. [Win03]



Abbildung 5.4: links: aufgenommenes Bild rechts: berechnetes Bild [Win03]

5.3.2 Insassenerkennung

In modernen Autos sind bis zu zehn Airbags eingebaut. Es gibt jedoch auch Situationen, bei denen das Auslösen eines Airbags den Menschen nicht vor Verletzungen schützt, sondern ihn aufgrund einer sehr ungünstigen Sitzposition sogar verletzen könnte. Um diese Gefahr zu verringern, sollen Kamerasensoren darüber wachen, welche Airbags voll gezündet werden dürfen und wo nur mit reduzierter Kraft gearbeitet werden kann. Das gleiche gilt für die Steuerung von Gurtstraffsystemen.

Zunächst erkennt das System, ob ein Sitz überhaupt belegt ist. Zusätzlich werden die Insassen nach Größe und Sitzposition klassifiziert. [Pfl03] Dazu nimmt eine in der Dachkonsole integrierte Kamera mehrmals pro Sekunde den Fahrgastraum auf. Auf der Basis dieser Bilder wird die Sitzposition der Passagiere analysiert. Die Auswertung erfolgt dann über das Laufzeitprinzip, das den Abstand von Objekten zur Kamera bereitstellt. Die Kameradaten liegen in Form einer Distanzmatrix vor, die eine topographische Darstellung ermöglicht. So kann man fehlerhafte Analysen, die z.B. durch Spiegelungen bei 2D Erfassungssystemen auftreten können, verhindern. Der Elektronikhersteller IEE will das oben beschriebene Kamerassystem 2005 serienreif anbieten. [Fl"03]

5.3.3 Fahraufmerksamkeitsassistent

Der Sekundenschlaf ist eine sehr häufige Unfallursache. Ein Fahraufmerksamkeitsassistent soll erkennen, in welchem Müdigkeitszustand sich der Fahrer befindet. Droht der Fahrer einzuschlafen, so warnt ihn das System optisch oder akustisch. Eine Kamera ist auf die Augen des Fahrers gerichtet und das System beobachtet das Lidschlagverhalten. Wichtige Merkmale sind Frequenz und Geschwindigkeit der Lidschläge sowie der Öffnungsgrad der Augen. Eine wache Person macht generell wenige und schnelle Lidschläge, wohingegen bei müden Personen die Lidschlagfrequenz zu- und deren Geschwindigkeit abnimmt. Außerdem nimmt der Öffnungsgrad der Augen ab.

Die Abbildung 5.5 zeigt ein Erprobungsfahrzeug der BMW AG mit einer auf dem Armaturenbrett befestigten Kamera, die die Augen des Fahrers fokussiert. [AG02]



Abbildung 5.5: Forschungsfahrzeug mit Aufmerksamkeitsassistent [AG02]

5.3.4 Erkennung von Straßenschildern

Bei hohem Verkehrsaufkommen ist es manchmal für den Fahrer schwierig alle Verkehrszeichen und Hinweisschilder zu erkennen. Dies gilt insbesondere, wenn auf der rechten Spur der Autobahn die Sicht von Lastwagen beeinträchtigt wird. Hier kann eine automatische Erkennung der Schilder hilfreich sein. Dem Fahrer werden Informationen, wie z.B. das aktuelle Tempolimit oder Hinweise auf Tankstellen und Rastplätze auf einem Display angezeigt. [Rot03]

5.3.5 Überwachung des toten Winkels

Eine weitere, oft fatale Unfallursache ist das Übersehen von Fahrzeugen oder Personen im toten Winkel. In so einem Fall wären Warnungen für den Fahrer sehr hilfreich. Darauf hinaus benötigt man dieses System, wenn man komplexere Fahrassistenzsysteme wie z.B. den Spurwechselassistenten realisieren möchte.

5.3.6 Stop and Go Assistent

Oft ist es sehr lästig, wenn man im Stau oder im dichten Verkehr in der Stadt, andauernd bremsen und Gas geben muss. Diese Aufgabe kann von einem System, das den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug „sehen“ kann, übernommen werden. Auch dieser Assistent wird als Komponente von anderen Systemen, wie dem oben angesprochenem Spurwechselassistenten benötigt.

5.3.7 Lane Departure Warning LDW, Lane Keeping Support LKS, Spurwechselassistent SWA

Das LDW-System soll den Fahrer vor einem ungewolltem Verlassen der Fahrspur warnen bzw. Gegenmaßnahmen einleiten. Ursachen dafür können z.B. Unaufmerksamkeit oder Sekundenschlaf sein. Für LKW's gibt es schon LDW-Systeme auf dem Markt. LKW's haben den Vorteil, dass man die Kamera höher montieren kann und dadurch ein kontrastreicheres Bild bekommt, als bei den niedriger angebrachten Kameras in PKW's. Als erster Hersteller wird Nissan ein LDW-System im Herbst 2004 in den USA in einem SUV (Sports Utility Vehicle) anbieten. Mögliche Arten den Fahrer zu warnen, sind z.B. ein Zittern im Lenkrad, Vibration des Sitzes oder ein virtuelles Nagelbandrattern. Beim LKS-System wird aktiv in die Steuerung des Lenkrads eingegriffen. So will man z.B. realisieren, dass der Fahrer bei dem für eine Kurve richtigem Lenkeinschlag den geringsten Widerstand im Lenkrad spürt. Als Sensor kommt eine Grauwert- CMOS HDRC (High Dynamic Range Camera) Kamera zum Einsatz, die einen Bereich von bis zu ca. 50m vor dem Auto filmt. [Co03] Die Abbildung 5.6 zeigt, wie das System die Fahrspur erkannt hat (schwarze Linien) und welche die wahrscheinlichste gefahrene Fahrspur sein wird (weiße Linien). Das Auto hat also gerade die Fahrspur verlassen.

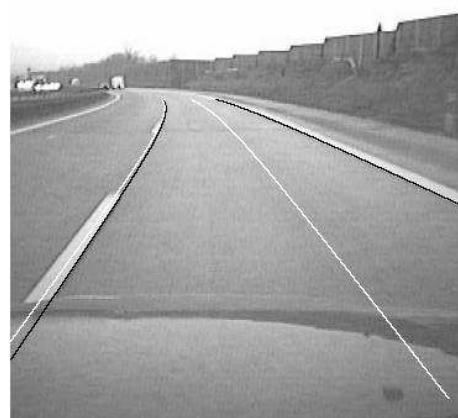


Abbildung 5.6: Die Position des Autos wird überprüft [RR00]

In der Zukunft werden das LDW-System und das ACC-Sytem (Adaptive Cruise Control) miteinander verschmelzen. Zusätzlich werden Algorithmen implementiert, die Objekte de-

tektieren und verfolgen können. [Co03] Die Abbildung 5.7 zeigt zwei verschiedene Ansätze, Autos zu erkennen. Im linken Bild werden Fahrzeuge anhand ihres Schattens und ihrer schwarzen Reifen erkannt. Im rechten Bild erfolgt die Identifikation über geometrische Formen.



Abbildung 5.7: Mögliche Detektionsansätze [Win03]

Stehen diese Funktionen sowie die Überwachung des toten Winkels zur Verfügung, kann auch ein Spurwechselassistent realisiert werden. [MS03] Dieser kann dann selbstständig die Fahrspur wechseln.

5.4 Funktionsweise visueller Sensorik am Beispiel LDW

In diesem Kapitel soll erklärt werden, welche Parameter für ein LDW-System wichtig sind und wie diese gemessen und verarbeitet werden können. Die Abbildung 5.8 zeigt eine Fahrspureinteilung nach ISO-Norm NP 17361.

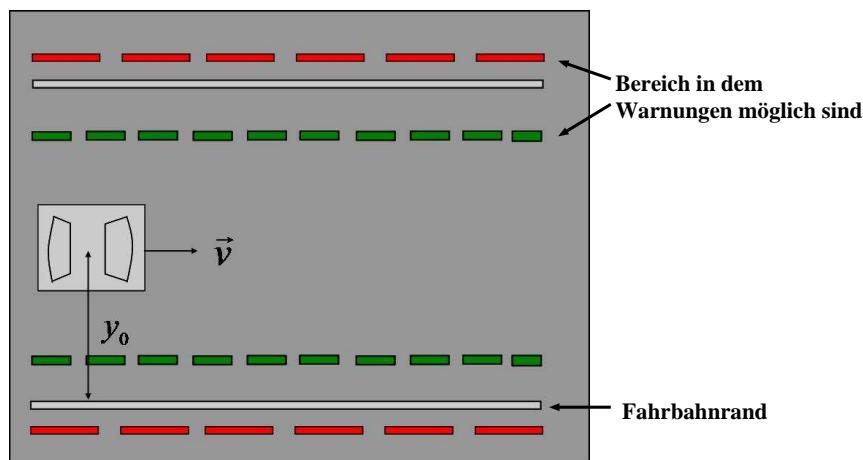


Abbildung 5.8: Fahrspureinteilung nach ISO NP 17361 [Zit04]

Es wurde ein Bereich um die Fahrbahnbegrenzung definiert, in dem der Fahrer vor dem Verlassen der Fahrspur gewarnt werden soll. Um vorhersagen zu können, ob diese Gefahr besteht, benötigt man die Zeit, die das Auto braucht, um den Fahrbahnrand zu erreichen. Diese Zeit wird als „Time to line crossing“ (TLC) bezeichnet.

$$TLC = \frac{y_0}{j_0} = \frac{y_0}{\|\vec{v}\| \cdot \sin\alpha} \quad (5.1)$$

Der Winkel α liegt zwischen dem Geschwindigkeitsvektor \vec{v} und der Tangente an die Fahrbahnbegrenzung. Um die TLC berechnen zu können brauchen wir also den Abstand y_0 zwischen dem Auto und der Fahrbahnbegrenzung. Zur Verfügung stehen Bilder der Szenerie vor dem Auto. Es ist also nur möglich Abstände y_i in Entfernung D_i vor dem Auto zu messen. Das Bild 5.9 veranschaulicht dies.

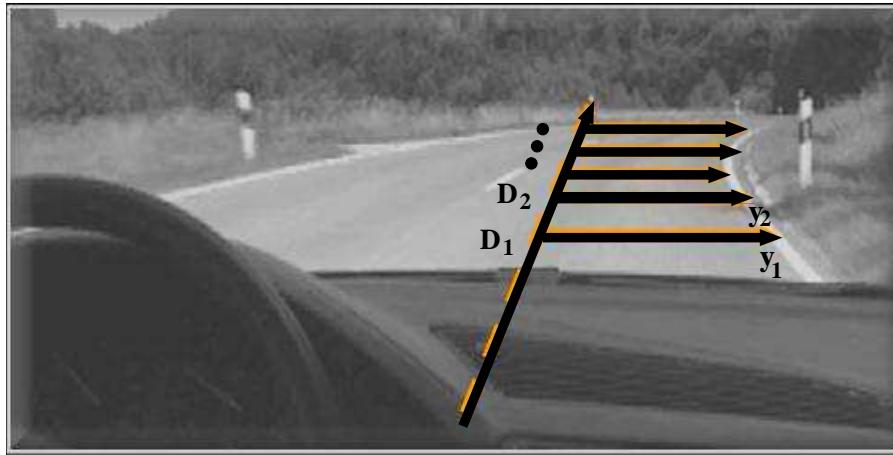


Abbildung 5.9: Gemessene Abstände vor dem Auto [Naa04a]

Um auf den Abstand y von der Fahrzeulgängsachse zum Fahrbahnrand schließen zu können, muss der Fahrbahnrand im Bild erkannt werden. Die Fahrspurbegrenzung stellt in einem Schwarz-Weiß-Bild eine Kante mit hell-dunkel Übergang dar. Zur Detektion benötigt man ein Hochpaßfilter. Dieses lässt hohe Frequenzen unverändert und glättet Bildbereiche mit wenig Details. Eine Kante stellt ein starkes Detail mit hoher Frequenz dar. Geeignete Filter sind z.B Laplace Filter oder die Sobel Operatoren. [Hab95] Die Faltungsmatrix eines Laplace Filters ist in Gleichung 5.2 dargestellt.

$$H = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Durch die Faltung mit so einem Filterkern werden die dunklen Pixel einer Kante etwas dunkler und die hellen Pixel etwas heller gemacht. Der nächste Schritt ist ein Schwellwertvergleich. Alle Pixel, die über einem gewissen Schwellwert liegen, werden als Kantenpixel definiert, die anderen als Nichtkantenpixel. [Hab95] Die Bestimmung des Schwellwertes ist eine Optimierungsaufgabe. Liegt er zu hoch, dann werden zu wenige Kanten erkannt

und umgekehrt. Nun weiß man also bei welchen Pixeln sich im Bild Kanten befinden. Da das Kamerasystem kalibriert ist und man die Pixelkoordinaten in das Koordinatensystem des Autos umrechnen kann, ergibt sich der Abstand y .

Jetzt muss aus den gemessenen Größen (auch die der anderen Sensoren im Auto) auf die gesuchten Größen geschlossen werden. Dazu wird ein Kalman-Filter verwendet. Die Abbildung 5.10 zeigt die prinzipielle Vorgehensweise. Das Kalman-Filter berechnet den

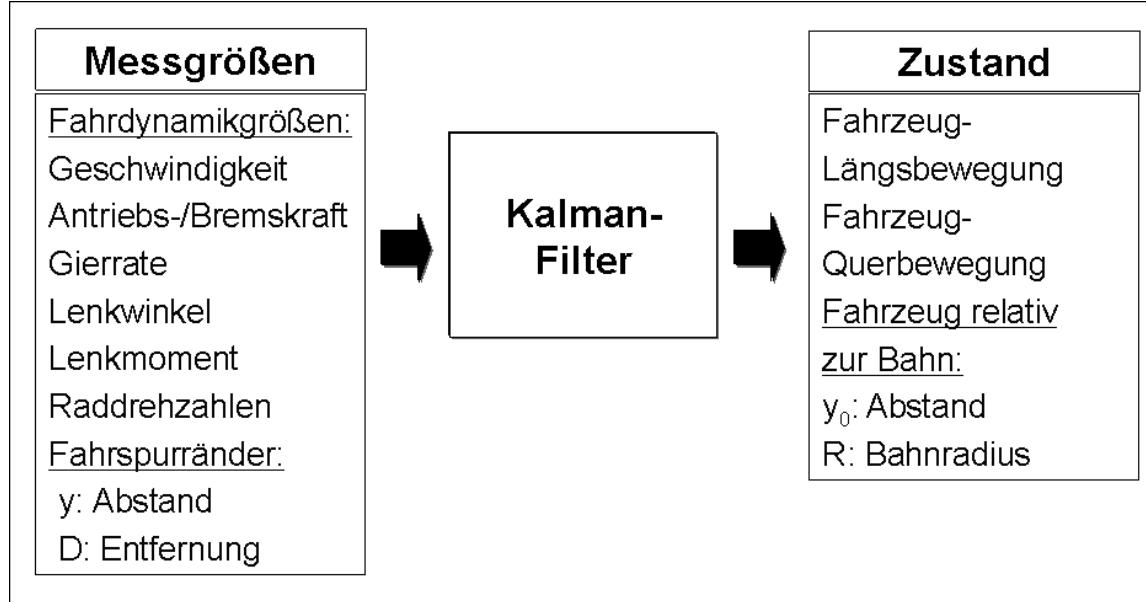


Abbildung 5.10: Gesamtsynthese [Naa04a]

Zustand eines linearen dynamischen Systems durch eine Kombination aus Messungen des aktuellen Zustands und einer Schätzung ausgehend von einer Berechnung eines früheren Zeitpunktes.

Dazu bedient es sich zweier Modelle:

1. Das System-Modell

Diesem Modell liegt allgemein die Gleichung 5.3 zugrunde.

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (5.3)$$

Das Modell beschreibt, die Abhängigkeit des Zustandsvektors x_{k+1} zum Zeitpunkt $t = t_{k+1}$ vom Zustandsvektor x_k und dem Eingangsvektor u_k zum Zeitpunkt $t = t_k$. Die Matrizen A_k und B_k legen jeweils den Einfluss des vergangenen Zustands x_k und des Eingangs u_k auf den aktuellen Zustand x_{k+1} fest. Der Ausdruck w_k ist eine normalverteilte Zufallsvariable, die alle Einflüsse auf x_{k+1} enthält, welche noch nicht in A_k und B_k enthalten sind.

Im Fall der Positionsbestimmung eines Autos beschreibt der Zustandsvektor x_{k+1} z.B. die Position und Geschwindigkeit des Autos. Der Eingangsvektor u_k enthält Größen wie z.B. Lenkwinkel, Beschleunigung und Abstand zum Fahrbahnrand. In w_k sind Fehler durch z.B. Wind und durchdrehende Reifen etc. enthalten.

2. Das Meß-Modell

Dieses Modell wird allgemein wie in Gleichung 5.4 formuliert.

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (5.4)$$

Die Matrix H_k beschreibt den Zusammenhang zwischen der Messung z_k und dem Zustandsvektor x_k zum Zeitpunkt $t = t_k$. Sämtliche Störeinflüsse, wie z.B. Meßfehler, werden analog zum System-Modell durch die normalverteilte Zufallsvariable v_k beschrieben.

Das Kalman-Filter schätzt also anhand des System-Modells den Folgezustand. Die Vorhersage basiert auf der letzten Schätzung des Systemzustands. Mit Hilfe der Messung wird diese *a priori* Prädiktion korrigiert. Das Ergebnis ist dann ein *a posteriori* Schätzwert des aktuellen Zustands.

Im Falle einer nicht-linearen Zustandsübergangs- bzw. Mess-Funktion werden diese, durch eine z.B Taylor-Approximation, linearisiert. Der Restfehler wird von den Zufallsvariablen w_k und v_k als „Unschärfe der Modellierung“ übernommen. Ein Kalman-Filter, das die linearisierten Funktionen nutzt, nennt man „erweiterter Kalman-Filter“ (EKF).

Eine genauere Darstellung des Kalman-Filter Verfahrens würde über den Rahmen dieser Arbeit hinausführen. Deshalb möchte ich auf einschlägige Literatur verweisen: [ML87] Aufgrund der Vorhersage, wo sich der Fahrbahnrand im Folgezustand befinden wird, kann man den Suchbereich einschränken. Das nennt man eine sog. Area of Interest (AOI) Steuerung. Man muss nicht mehr das gesamte Bild durchsuchen, sondern nur in einem gewissen Bereich um den vorhergesagten Wert. Die Abbildung 5.11 zeigt diese AOI-Bereiche in Form von schwarzen horizontal verlaufenden Scanlinien.



Abbildung 5.11: Area of Interest Scanlinien [RR98]

5.5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit habe ich die Vor- und Nachteile von CCD- und CMOS-Sensoren erläutert. Dann wurde gezeigt, welche Arten von Fahrassistenzsystemen, die auf Bildverarbeitung

beruhen, es gibt. Zur Zeit gibt es nur wenige marktreife Produkte, wie z.B. Rückfahrkameras oder LDW-Systeme für LKW's. Die meisten der betrachteten Systeme werden erst in naher bzw. auch entfernter Zukunft so ausgereift sein, daß sie im Auto zum Einsatz kommen können. Danach bin ich auf die einzelnen Schritte der Bildverarbeitung am Beispiel des LDW-Systems eingegangen. Dabei ist eine der grössten Herausforderungen die Beherrschung der unendlich vielen verschiedenen Umweltszenarien.

In der Zukunft werden Fahrassistenzsysteme immer auf Daten mehrerer Sensortypen zugreifen um so die individuellen Vorteile ausnutzen zu können. Und auch die Sensoren selbst werden aus Kostengründen immer stärker fusionieren. So soll z.B. die Kamera und der Regen-/Licht-Sensor integriert werden. [Co03]

Der Erfolg solcher Systeme hängt natürlich vom erreichbaren Kundennutzen ab. Dieser kann nur sichergestellt werden, wenn folgende Punkte erfüllt sind:

1. Sicherheit der Systeme

Es muss sichergestellt sein, dass die Assistenzsysteme nicht durch Fehlentscheidungen so in das Fahrgeschehen eingreifen, dass es zu gefährlichen Fahrsituationen oder sogar Unfällen kommen kann. Dann hätte so ein System genau das Gegenteil von dem erreicht, für das es konstruiert wurde. Die Fahrsicherheit wäre verringert.

2. Hohe Verfügbarkeitsrate

Für den Fahrer ist es unzumutbar, wenn einzelne Funktionen seines Autos nur in bestimmten Umgebungen und unter günstigen Bedingungen funktionieren. Deshalb müssen die Assistenzsysteme mit verschiedenen Fahrbahn -belägen, -markierungen, Wetter- und Lichtverhältnissen usw. zureckkommen.

3. Vermeidung unnötiger Warnungen oder Regeleingriffe

Einerseits wird der Fahrer durch unnötige Warnungen zusätzlich abgelenkt, andererseits sind solche Warnungen auch völlig inakzeptabel, weil der Fahrer sonst „einen ständig kritisierenden Beifahrer“ mit dem System assoziieren würde. Wichtige Kriterien, bei denen nicht gewarnt werden muss, sind Blinken, Bremsen oder eine hohe Lenkfrequenz. In diesen Fällen kann man davon ausgehen, dass der Fahrer aufmerksam ist und gerade aktiv sein Fahrzeug steuert. Viele Fahrer schneiden auch gerne Kurven und in diesem Fall kann der Parameter *TLC* verwendet werden, um die Zeit bis zur Rückkehr des Autos in die Fahrspur zu berechnen. Ist diese klein genug, braucht nicht gewarnt zu werden. Zusätzlich sollte der Fahrer immer die Möglichkeit haben, das Fahrassistenzsystem ein- und auszuschalten.

Literaturverzeichnis

- [AG02] BMW AG. Kampf dem Sekundenschlaf: BMW Group Forschung erprobt Fahreraufmerksamkeits-Assistent, 2002.
<http://www.7er.com/news/wmview.php?ArtID=33>.
- [Co03] Hella KG Hueck & Co. Technical Information Electronics Driver Assistance Systems, 2003.
http://www.hella.com/produktion/HellaPortal/WebSite/InternetImages/automotiv_08_2003/
- [Dic02] Ernst D. Dickmanns. Sehende Fahrzeuge, 2002.
Hochschulkurier Nr. 14 Universität der Bundeswehr München.
- [Fl'03] Klaus-Dieter Flörecke. Drei Dimensionen für mehr Sicherheit, 2003.
<http://www.automobilwoche.de/cgi-bin/news.pl?newsId=1823>.
- [Got03] G. Gottwald. Film ab für Komfort und Sicherheit, 2003.
<http://researchinfo.bosch.com>.
- [Hab95] Peter Haberäcker. *Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung*. Carl Hanser Verlag München Wien, 1995.
- [ML87] K. S. Miller und D. M. Leskiw. *An Introduction to Kalman Filtering with Applications*. Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, FL, 1987.
- [MS03] G. Geduld M. Schamberger. Fahrerassistenz zur Erhöhung von Komfort und Sicherheit, 2003.
München, Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrassistenz.
- [Naa98] K. Naab. Heading Control Ein System zur Fahrerunterstützung bei der Spurhaltung, 1998.
Seminar Fahrassistenzsysteme, Haus der Technik, Essen.
- [Naa04a] K. Naab. Kalmannfilter in der Automobiltechnik, 2004.
Carl-Cranz-Gesellschaft e.V., Oberpfaffenhofen.
- [Naa04b] K. Naab. Sensorik- und Signalverarbeitungsarchitekturen für Fahrassistenz und Aktive Sicherheit, 2004.
München, Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrassistenz.

- [Pfl03] E. Pflug. Schutz durch Wissen. Insassenerkennung von Siemens VDO Automotive optimiert Airbagsysteme, 2003.
http://www.siemensvdo.de/de/pressarticle2003.asp?ArticleID=260303_2d.
- [Rat01] T. Rath. Spezialisierung generischer Modelle von Straßenverkehrsszenen für die Bildfolgenauswertung. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2001.
- [Rot03] P. Rothberger. Alles im Blick, 2003.
<http://www.aglaia-gmbh.de/deutsch/kommunikation/news/presse.html>.
- [RR98] W. Krüger W. Enkelmann R. Riesack, P. Klausmann. Robust lane recognition embedded in a real-time driver assistance system. *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, 1998.
- [RR00] W. Enkelmann R. Riesack, N. Möhler. A Video-Based Lane Keeping Assistant, 2000.
<http://risack.leute.server.de/paper/iv2000.pdf>.
- [Sch93] Hans-Jürgen Schlicht. *Digitale Bildverarbeitung mit dem PC*. Bonn; Paris; Reading, Mass. (u. a.) : Addison-Wesley, 1993.
- [Win03] H. Winter. Entwicklung visueller Sensorik für innovative Fahrassistenzsysteme, 2003.
IIR Fachkonferenz Innovative Fahrassistenzsysteme.
- [Zit04] Dirk Zittlan. Advanced Driver Assistance: Modular Image Sensor Concept, 2004.
München, Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrassistenz.

Kapitel 6

Fahrzeugsensorik (II): GPS, Galileo, Inertialsensoren und Co.

Über den Autor

Mein Name ist Erwan LE TALLEC. Ich bin ein Französischer ERASMUS Austauschstudent. Ich studiere Elektro- und Informationstechnik im 8. Semester an der TU München. In Frankreich studiere ich industrielle Informationstechnik am INSA (nationales Institut der Angewandten Wissenschaften) Toulouse.

Einleitung

Heutzutage ist es immer wichtiger für den Autofahrer, seine Position genau zu kennen. Information über die jeweilige Position nutzen verschiedene Anwendungen wie z.B. die Navigationssysteme. Um diese Position zu bestimmen, gibt es mehrere Verfahren und Geräte, die angewendet werden können. Hier werden zwei Arten von solchen Geräte vorgestellt : zunächst die Satellitensysteme, die sogennanten GNSS, und dann die Inertialsensoren.

6.1 Global Navigation Satellite System (GNSS)

6.1.1 Prinzipien

Die GNSS sind Systeme, die Satelliten benutzen, um eine Position berechnen zu können. Jeder Satellit erzeugt ein oder mehrere Signale dank eines sogenannten „pseudozufälligen Rauschcodes“. Jeder Satellit hat seinen eigenen Code. Dieser Code wird dann mit einer Nachricht moduliert. In dieser werden vor allem die Zeit ihrer Erzeugung und Almanache, die später erklärt werden, übermittelt.[Dan94]

Der GPS Empfänger kennt alle Code und erzeugt ein Signal für jedes, das er empfängt. Bei Anpassung des generierten Signales mit dem empfangenen Signal wird das Letzte entmoduliert und die Transportzeit bestimmt. Da die Signalgeschwindigkeit bekannt ist (die Lichtgeschwindigkeit), wird der Abstand zum Satellit berechnet. In der Nachricht werden dem Empfänger die Umlaufbahn und die Position jedes Satellites mitgeteilt. Die Position des Empfängers wird dann ermittelt, wenn mindestens 3 Satelliten (oder 4, wenn der Empfänger keine genaue Uhr hat) über den Horizont sind. Diese Technik, wenn Abstände benutzt werden, um eine Position zu bestimmen, heißt „Trilateration“ (nicht Triangulation, wo Winkel benutzt werden).

Die Almanache, die sich in den Nachrichten befinden, ermitteln die zukünftige Position aller Satelliten. Dadurch wird die Suche nach Satelliten beim Einschalten drastisch beschleunigt. Das berühmteste GNSS ist GPS (für Global Positioning System).

6.1.2 Global Positioning System (GPS)

Dieses Programm ist ein Programm des Amerikanischen Department of Defense (des Amerikanischen Verteidigungsministeriums) : d.h. es ist ein Militärprogramm. Es wurde in den 70-er Jahren entwickelt. Wie für die anderen GNSS kann dieses in drei Teile zergliedert werden:

- das Weltraumsegment,
- das Benutzersegment und
- das Kontrollsegment.

[Dan94] Das Weltraumsegment besteht aus den Satelliten. GPS benutzt 24 Satelliten, die 20.000 km über der Erdoberfläche sind. Es gibt auch Ersatzsatelliten (heute¹ 4) : insgesamt befinden sich heute 28 GPS Satelliten im Weltraum. Es gibt 6 verschiedene Umlaufbahnen, mit jeweils 4 Satelliten (und evtl. Ersatzsatelliten). Jeder Satellit erzeugt 2 Signale, die im letzten Abschnitt erklärt wurden. Der Benutzer kann seine Position nur dann genau berechnen, wenn die Zeit der Satelliten sehr genau ist. Deshalb sind Atomuhren im jeden Satellit erforderlich; aus Zuverlässigkeitssgründen jeweils 4.

Der zweite Teil des GPS ist das Benutzersegment, d.h. der Benutzer und sein Endgerät. Wie schon oben erklärt, braucht der Benutzer mindestens 4 Satelliten, damit er 4 Parameter bestimmen kann :

- die 3 Koordinaten auf der Erdoberfläche, X , Y und Z
- die Zeit T .

Dies ist in Abbildung 6.1 zu sehen. Da er die Zeit berechnet, braucht der Benutzer keine Uhr in seinem Gerät, weshalb es dann günstig verkauft werden kann. GPS kann auch angewendet werden, um die genaue Zeit zu ermitteln. Mit GPS kann eine Genauigkeit von 10 Metern erreicht werden.

Der dritte und letzte Teil des GPS ist das Kontrollsegment. Dieses Segment ermöglicht, daß GPS seine Genauigkeit nicht verliert. Er besteht aus einer Kontrollstation, die sich in den Vereinigten Staaten (in Colorado) befindet, und mehreren Antennen weltweit. Die Daten der Satelliten werden nachgeprüft, und ggf. schickt die Kontrollstation Korrekturwerte. Abbildung 6.2 stellt alle Segmente von GPS dar.

Wie schon oben erwähnt ist mit GPS eine Genauigkeit von 10 Metern erreichbar. Diese Genauigkeit ist für viele Anwendungen nicht ausreichend. Deshalb wurde eine Ergänzung von GPS entwickelt : D-GPS.

¹am 17. Juni 2004[misc]

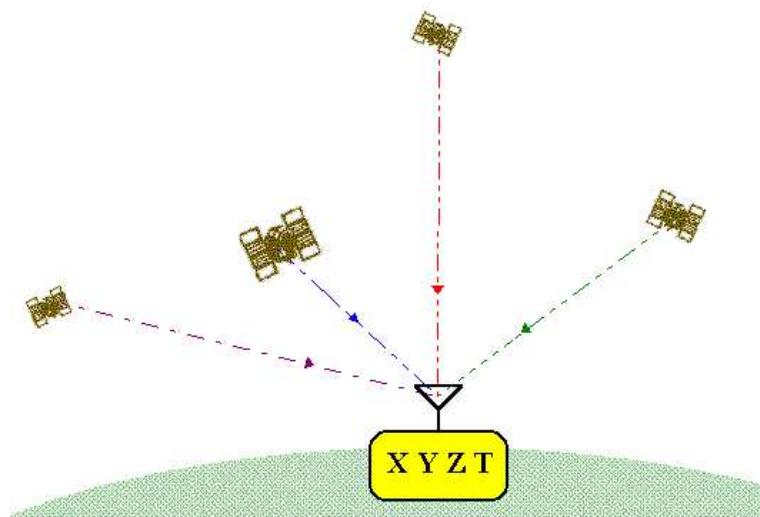


Abbildung 6.1: Das Benutzersegment [Dan94]

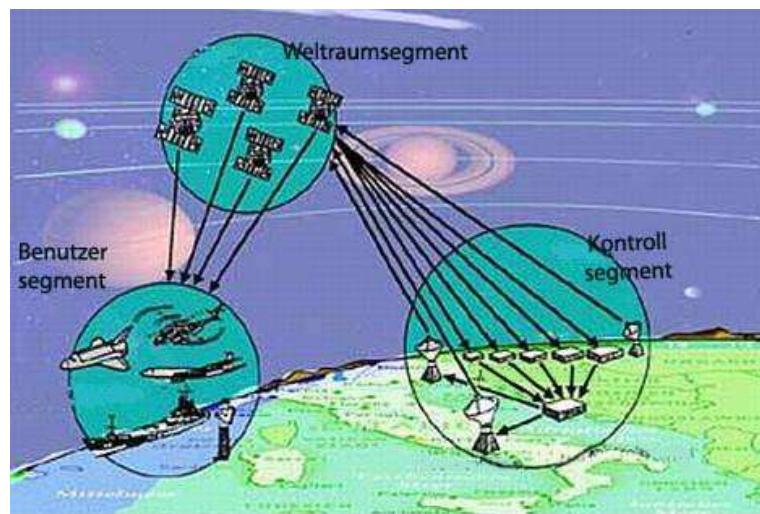


Abbildung 6.2: Die drei Segmente von GPS [Hei01]

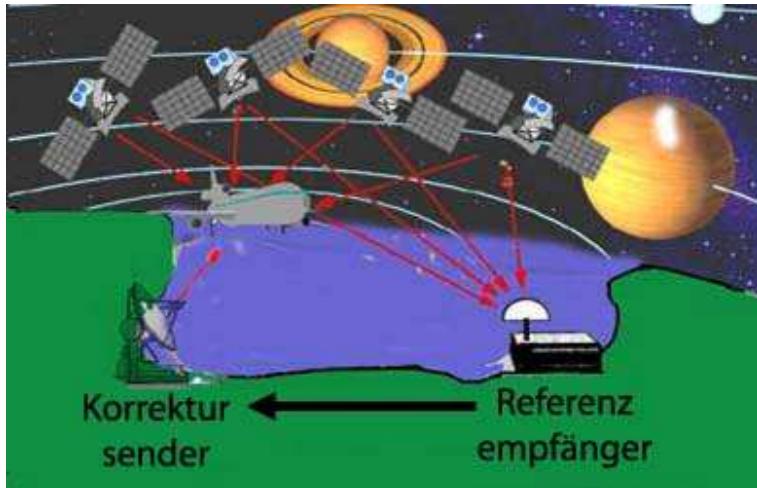


Abbildung 6.3: D-GPS [Hei01]

6.1.3 Differenzielles GPS (D-GPS)

Das Ziel von D-GPS ist eine Präzisionssteigerung des GPS. D-GPS benutzt zwar die Satelliten, fügt aber lokale Referenzstationen hinzu. Diese Stationen haben bekannte Koordinaten (später als Soll-Wert bezeichnet). Jede Station erzeugt regelmäßig einen Ist-Wert: ihre aus den Signalen der Satelliten berechnete Position. Die Ist- und Sollwerte werden dann verglichen und Korrekturwerte berechnet. Diese Werte werden zum Benutzer geschickt. Er kann dann diese in seinen Berechnungen verwenden. Auf Abbildung 6.3 ist D-GPS zu sehen. Mit dieser Ergänzung ist eine Genauigkeit von einem Meter erreichbar. Aber ihr Nachteil ist die Preissteigerung : GPS Empfänger kosten weniger als 500 Euro, während D-GPS Empfänger zwischen 500 und 5.000 Euro kosten !

Der größte Nachteil von GPS und D-GPS für den Benutzer ist, daß die Satelliten unter Militärkontrolle stehen. Eine Signalstörungsmöglichkeit ist im System eingebaut : die sogenannte „selective availability“. Diese war bis ins Jahr 2000 aktiv, und nach dem Beschluss der Amerikanischen Regierung wurde sie ausgeschaltet. Aber die Störungsmöglichkeit existiert noch. Vor 2000 betrug die Genauigkeit ca. 100 Meter. Mit einer solchen Ungenauigkeit sind GPS und D-GPS nutzlos. Deshalb entwickelt die Europäische Union ihr eigenes Programm : Galileo.

6.1.4 Galileo

Das Europäische GNSS Programm heißt „Galileo“. Wie andere Europäische Projekte wird es von einem Konsortium entwickelt. Es ist für kommerzielle und zivile Nutzung gedacht.[misa] Es wird mit demselben Prinzip wie GPS funktionieren. Es wird GPS-kompatibel sein, d. h. der Benutzer kann mit einem einzigen Gerät GPS und Galileo Signale empfangen. Dafür braucht er trotzdem ein spezielles Gerät, das GPS und Galileo implementiert. Galileo wird erst 2008 funktionsfähig sein.

Mit Galileo ist eine Genauigkeit von einem Meter erreichbar. Dies ist möglich dank Echtzeit-Nachrichten. Diese Nachrichten werden vom Galileo Kontrollsegment erzeugt und zum Benutzer über alle Satelliten geschickt, wenn ein Problem bei einem Satellit auftaucht. Ein Problem kann z. B. sein, daß die Zeit eines Satellites ungenau geworden ist, und das Kontrollsegment konnte noch nicht die Korrekturwerte abschicken. Der Benutzer kann dann den fehlerhaften Satellit für seine Berechnungen vernachlässigen. Diese Nachrichten sind anders als die Korrekturwerte des GPS Kontrollsegmentes : diese sind nur für die Satelliten, damit sie ihre Werte aktualisieren können.

Ein anderer Vorteil von Galileo gegen GPS ist, daß der Benutzer die Authentizität und Integrität der Nachrichten überprüfen kann. Wenn Sicherheit nötig ist (z. B. beim Luftverkehr) ist es ein großer Vorteil. Eine Situation wie im Film „Der Morgen stirbt nie“, wo falsche GPS Nachrichten geschickt werden, ist dann nicht mehr möglich, oder zum mindesten sehr schwer. Mit Referenzstationen, wie für D-GPS, kann eine 10 Zentimeter Genauigkeit erreicht werden.

Ein Problem, das von Galileo nicht gelöst wird, ist die Abschattung. In Stadtzentren oder Tunnels werden die Signale nur sehr schwer oder gar nicht empfangen. Deshalb wird für die GNSS Unterstützung benötigt, in Form anderer Geräte oder Systeme, die die Position ermitteln können.

6.1.5 Anwendungen

Trotz der Abschattung sind die GNSS anwendbar und werden angewendet. Eine erste mögliche Anwendung ist das Mautsystem, wie es im Beitrag 11 erklärt wird. Fahrzeuge haben einen GPS Empfänger und übermitteln ihre Position an eine Zentrale. Die kontrolliert, ob das Fahrzeug sich auf einer Mautstrecke befindet. GNSS können auch für sogenannten „Advanced Driver Assistance System“ (ADAS) angewendet werden. ADAS sind Hilfsmittel für den Fahrer, wie z. B. Navigation. Dies wird im nächsten Beitrag erklärt. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist Flottenmanagement, z.B. für Taxis oder Lieferungsfirmen wie DHL oder UPS. Jedes Fahrzeug hat einen GNSS Empfänger und berechnet seine Position. Diese Position wird dann über Funk zu einer Zentrale übermittelt. Diese Zentrale weiß in Echtzeit, wo alle Fahrzeuge sich befinden.

6.2 Inertialsensoren

Wie schon erwähnt, brauchen die GNSS Unterstützung wegen der Abschattung. Eine Möglichkeit dafür sind die Inertialsensoren. Sie können GNSS unterstützen, Daten ermitteln, wie z. B. die Beschleunigung, und sie sind schon im Automobilbereich (z. B. für ABS) in Anwendung. Es gibt verschiedene Arten von Inertialsensoren, und diese jeweils mit verschiedenen Prinzipien. In diesem Abschnitt werden 3 Sensortypen mit ihren Hauptprinzipien vorgestellt :

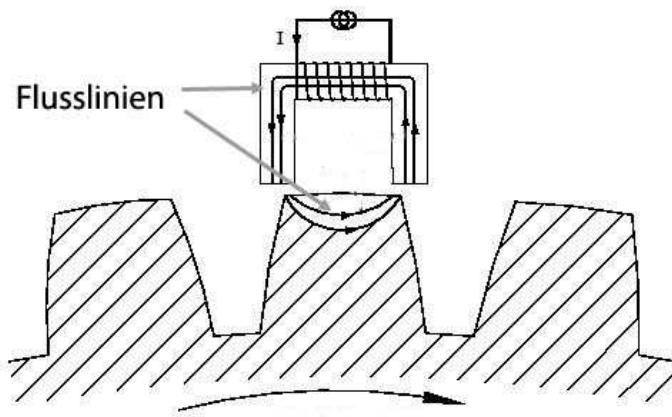


Abbildung 6.4: Induktiver Radsensor [Czo00]

- Radsensoren,
- Beschleunigungssensoren und
- Kreisel.

6.2.1 Radsensoren

Das Ziel des Radsensors ist die Erzeugung eines Signales, dessen Frequenz proportional zur Drehgeschwindigkeit des Rades ist.

Der induktive Radsensor

Abbildung 6.4 zeigt ein induktiver Sensor. Er besteht aus einer Spule, in der elektrischer Strom fließt, mit einem ferromagnetischen Kern. Die magnetischen Flusslinien sind auf der Abbildung zu sehen. Wenn das Rad sich dreht, dann ändern sich diese Linien, d.h. es gibt eine Änderung im Magnetfeld. Diese erzeugt eine induzierte Spannung, welche vom Sensor gemessen wird.[Czo00]

Dieser Sensor wird am häufigsten angewendet, weil er billig, robust und einfach ist. Eine Begrenzung dieses Sensors ist, daß die induzierte Spannung proportional zur Drehgeschwindigkeit des Rades ist. Je schneller das Rad, desto größer die Magnetfeldänderung und desto größer die Spannung. Dies ist ein Nachteil bei niedrigen Geschwindigkeiten : die induzierte Spannung ist zu schwach um gemessen zu werden. Deshalb gibt es eine andere Art von Radsensoren, den Hall Effekt Sensor.

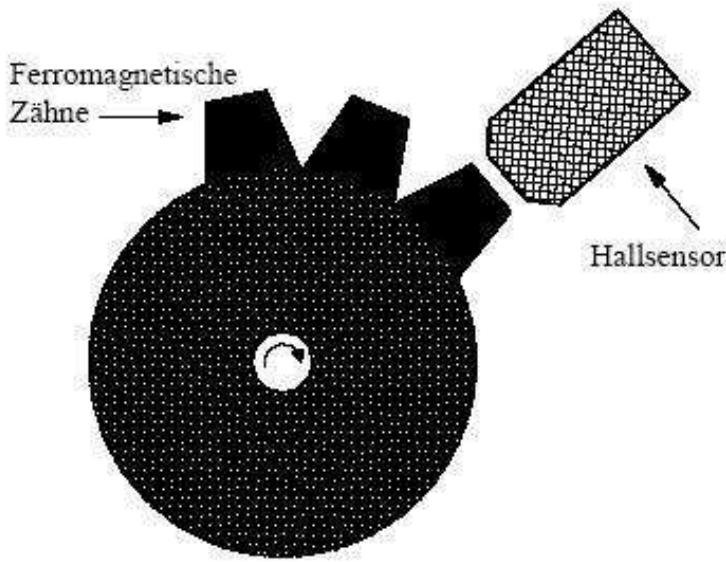


Abbildung 6.5: Hall Effekt Radsensor [Czo00]

Der Hall Effekt Sensor

Dieser Sensor vermeidet das Problem bei niedrigen Geschwindigkeiten dank einer direkten Messung. Auf Abbildung 6.5 ist ein Hall Effekt Sensor zu sehen. Er braucht ferromagnetische Zähne, die an der Radachse fixiert sind, und mißt den Hall Effekt, der im Sensor auftritt. Der Hall Effekt ist einfach zu verstehen : wenn es ein Magnetfeld B und einen elektrischen Strom I gibt, dann tritt eine Spannung V auf, die senkrecht zu I und B ist. Der Hall Effekt Sensor mißt diese Spannung V . [Czo00] Abbildung 6.6 stellt den Hall Effekt dar. Der Nachteil des Hall Effekt Sensors ist, daß er von Magnetfeldern gestört werden kann, und eine Abschirmung davor nötig ist.

Berechnung des zurückgelegten Weges

Aus dem erzeugten Signal, dessen Frequenz proportional zur Drehgeschwindigkeit des Rades ist, ist es sehr leicht, den zurückgelegten Weg zu errechnen. Die folgende einfache Formel ist anzuwenden :

$$s = r\omega \quad (6.1)$$

Der zurückgelegte Weg s ist gleich der Radius r des Rades multipliziert mit seiner gemessenen Drehgeschwindigkeit ω . Eine Kalibrierung des Radius (oder des Durchmessers) des Rades wird dann unbedingt benötigt.

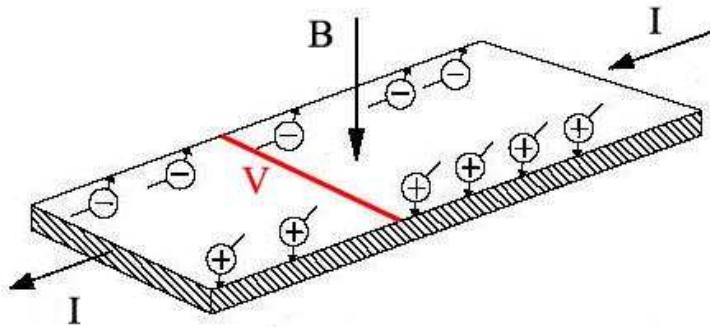


Abbildung 6.6: Hall Effekt [Czo00]

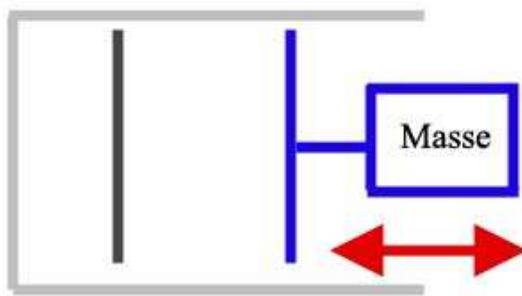


Abbildung 6.7: Kapazitiver Beschleunigungssensor

6.2.2 Beschleunigungssensoren

Eine zweite Art von Inertialsensoren ist der Beschleunigungssensor. Es gibt verschiedene Prinzipien, die hier erklärt werden.

Der kapazitive Sensor

Der kapazitive Sensor besteht aus zwei parallelen Kondensatorplatten, wie es auf Abbildung 6.7 zu sehen ist. Die erste Platte ist fest. Die andere kann sich bewegen und ist an eine Masse gebunden. Wenn eine Beschleunigung auftritt, dann bewegt sich die Masse, und damit die bewegliche Platte. Der Abstand zwischen beiden Platten ändert sich, d.h. es gibt eine Kapazitätsänderung im Kondensator.[Czo00] Der kapazitive Sensor misst

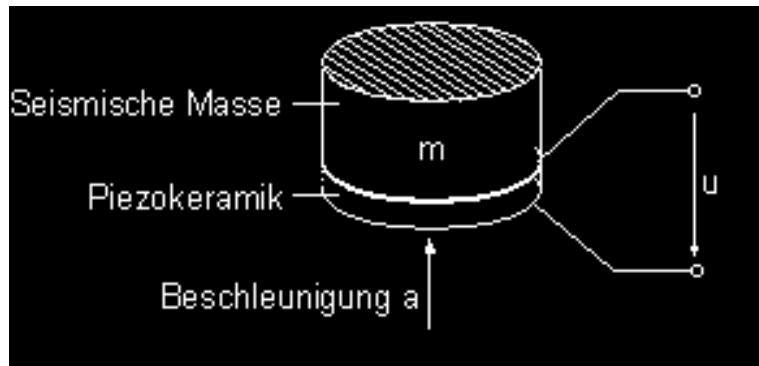


Abbildung 6.8: Piezoelektrischer Beschleunigungssensor [misg]

diese Änderung, und ermittelt durch eine einfache Berechnung den Wert der Beschleunigung. Eine andere Möglichkeit, die Beschleunigung zu messen, ist die Anwendung eines piezoelektrischen Verfahrens.

Der piezoelektrische Sensor

Dieser Sensor verwendet ein piezoelektrisches Kristall, das eine sehr interessante Eigenschaft hat : wenn man es schwingen lässt, erzeugt es ein elektrisches Potential, und umgekehrt erzeugt es Vibrationen, wenn es sich in einem elektrischen Feld befindet.

Abbildung 6.8 zeigt ein piezoelektrischer Sensor. Ein solcher Sensor besteht aus einer Masse m und einer Piezokeramik, die piezoelektrischen Kristalle enthält. Bei einer Beschleunigung drückt die Masse auf die Keramik, die dann ein elektrisches Potential erzeugt. Der Sensor misst dieses Potential. Da der Druck proportional zur Beschleunigung ist, ist das Potential auch proportional zur Beschleunigung. Ihr Wert wird dann sehr einfach bestimmt. Dieser Sensor ist robust und hat eine geringe Masse, aber er ist sehr schaltungsaufwendig und hat eine Messungsschwelle : wenn die Beschleunigung zu schwach ist, kann sie nicht mehr gemessen werden.

MEMS

Die letzte Art von Beschleunigungssensoren, die ich vorstellen werde, ist das sogenannte „MEMS“, das micro elektromechanisches System. Abbildung 6.9 zeigt einen solchen Beschleunigungssensor. Ein MEMS besteht vor allem aus einer Masse, die sich auf einer Achse bewegen kann (die Pfeile auf der Abbildung). Diese Masse ist von 4 Armen gehalten. Die Messung der Beschleunigung findet in den Armen statt, und verwendet entweder ein kapazitives Verfahren (wie beim kapazitiven Sensor) oder ein piezoelektrisches Verfahren (wie beim piezoelektrischen Sensor). Die MEMS sind heute am häufigsten angewendet, weil sie klein, billig und leicht sind.[misf]

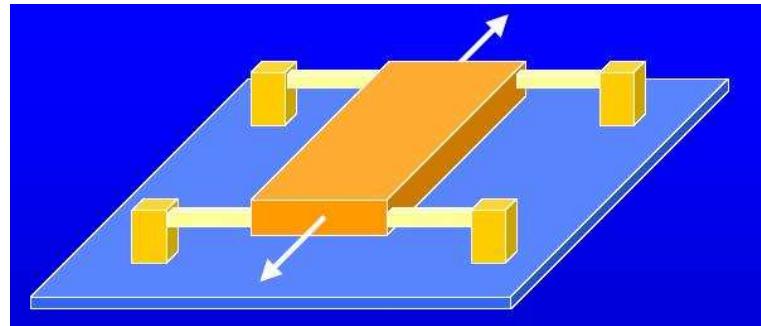


Abbildung 6.9: Micro ElektroMechanisches System [misf]

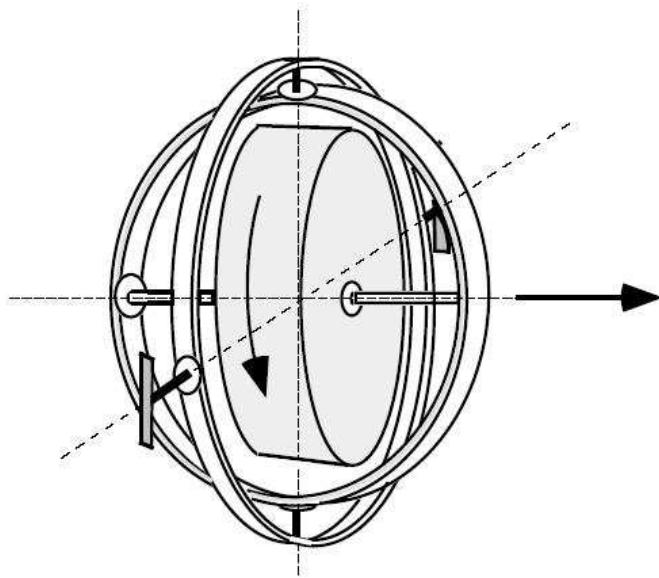


Abbildung 6.10: Der mechanische Kreisel [mise]

6.2.3 Kreisel

Die oben studierten Beschleunigungssensoren messen eine geradlinige Beschleunigung. Es gibt eine andere Kategorie von Beschleunigungssensoren, die nicht geradlinige Beschleunigung (Orientierungsänderung) messen : die Kreisel.

Der mechanische Kreisel

Der bekannteste Kreisel ist der mechanische Kreisel, wie in Abbildung 6.10 zu sehen ist. Trotz seiner sehr guten Leistung wird er nicht im Automobilbereich angewendet : er ist ziemlich groß und viel zu teuer. Deshalb wurden andere Typen von Kreisel entwickelt.

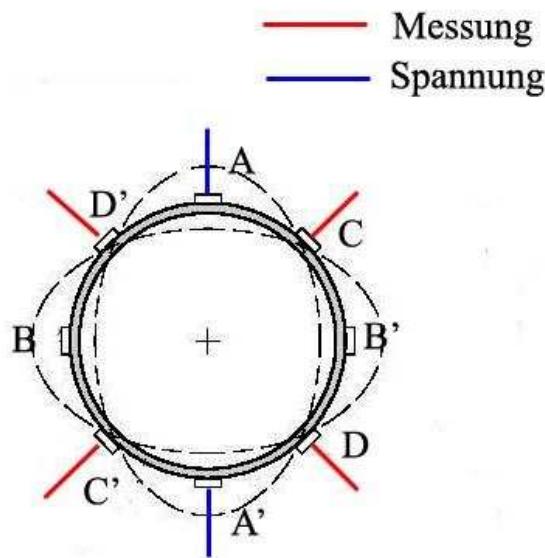


Abbildung 6.11: Der piezoelektrische Kreisel

Der piezoelektrische Kreisel

Der piezoelektrische Kreisel ist der am häufigsten angewendete Kreisel. Abbildung 6.11 zeigt ein zylinderformiger piezoelektrischer Kreisel mit 8 Elektroden, A , A' , B , B' , C , C' , D und D' . Eine Spannung zwischen A und A' wird erzeugt (die blauen Linien). Wie oben erklärt, erzeugt ein piezoelektrisches Kristall Schwingungen, wenn es sich in einem elektrischen Feld befindet. Hier entsteht eine statische Welle (die gestrichelten schwarzen Linien). Wenn der Zylinder sich dreht, ändert sich die Welle. Diese Änderung wird bei der Elektroden C , C' , D und D' gemessen (die roten Linien), und dadurch wird die Drehgeschwindigkeit bestimmt.[Czo00] Der piezoelektrische Kreisel ist billig, klein und robust. Deshalb wird er oft benutzt, obwohl er eine schlechtere Leistung als der mechanische Kreisel hat.

Der optische Kreisel

Der optische Kreisel ist wahrscheinlich der Kreisel der Zukunft, da er eine sehr gute Leistung hat. Abbildung 6.12 zeigt ein Glasfaser Kreisel. Eine Lichtquelle erzeugt einen Strahl, der in zwei zerlegt wird (die roten und blauen Pfeile). Die zwei Lichtstrahlen breiten sich in Gegenrichtungen in einer Glasfasermeßspule aus, bevor sie einen Photoempfänger erreichen. Beim Photoempfänger werden sie zu einem einzigen Strahl kombiniert (der violette Pfeil). Wenn die Spule sich nicht bewegt, brauchen beide Strahlen dieselbe Zeit, um den Photoempfänger zu erreichen. Aber dies ist nicht mehr richtig, wenn sie sich dreht, wegen des „Sagnac Effekt“. Dieser Effekt kann nicht hier erklärt werden, aber für

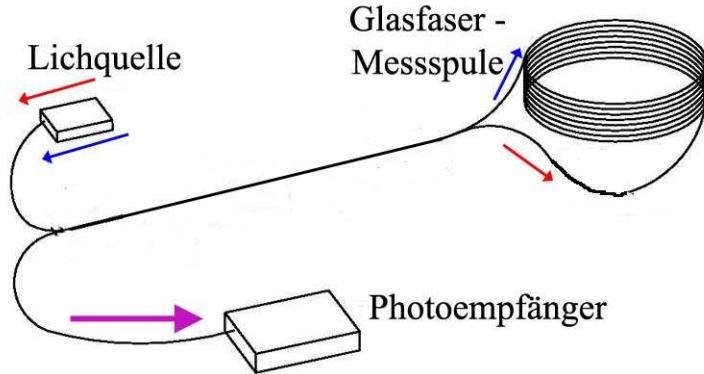


Abbildung 6.12: Der Glasfaser Kreisel

Informationen über dieses Thema sei auf [Czo00] verwiesen. Der Strahl, der sich in Drehrichtung ausbreitet, braucht mehr Zeit als der andere. Dann ergibt sich eine Interferenz beim Kombinieren. Durch die Messung dieser Interferenz ist eine Messung der Drehgeschwindigkeit und der Orientierungsänderung möglich. Es gibt auch optische Kreisel, die Laser benutzen, aber sie sind teurer als die Glasfaser Kreisel.

Der Glasfaser Kreisel hat eine Leistung vergleichbar mit der des mechanischen Kreisels zu einem ziemlich niedrigen Preis. Deshalb ist zu erwarten, daß er in der Zukunft am häufigsten angewendet wird. Aber es sind noch einige Probleme zu lösen. Dieser Kreisel kann von Temperaturschwankungen, starken Beschleunigungen oder Magnetfeldern gestört werden, da diese die Spule deformieren können.

6.2.4 Anwendungen

Wie oben erwähnt, sind Inertialsensoren schon seit langer Zeit im Automobilbereich in Anwendung. Hier sind einige Anwendungen für jede Art von Sensoren. Die Radsensoren werden bei ABS (AntiBlocking System) benötigt. ABS verhindert, daß die Räder beim Bremsen blockieren, und hilft somit dies zu verhindern. Eine andere Anwendungsmöglichkeit ist die DSC („Dynamische StabilitätsKontrolle“). Wenn ein Auto z.B. in einer Kurve zu schnell fährt, kann die DSC bremsen, um die Geschwindigkeit zu senken, damit das Auto auf der Fahrbahn bleiben kann.

Beschleunigungssensoren werden für Airbag verwendet. Wenn eine Beschleunigungsschwelle überschritten wird, dann wird der Airbag ausgelöst. Die Kreisel werden auch bei der DSC angewendet. Es gibt auch die sogenannte „Koppelortung“. Bei Koppelortung versteht man die Verwandlung von mehreren verschiedenen Inertialsensoren. Damit kann eine Position bestimmt werden, nachdem dieses System mit einer Anfangsposition initialisiert wird. Die Leistung der Koppelortung wird im nächsten Beitrag erwähnt, aber ich möchte vorwegnehmen, daß mit 3 Kreisel und 3 Beschleunigungssensoren sehr gute Ergebnisse erreichbar sind.[Czo00] Heute ist die Koppelortung mit 3 Kreisel und 3 Beschleunigungssensoren angewendet, um die Ergebnisse einer GPS-Ortung zu unterstützen.

6.3 Zusammenfassung

Zuerst haben wir gesehen, wie die GNSS, und besonders GPS, funktionieren, und wie letzteres System mit D-GPS ergänzt wurde. Um das Problem der Militärkontrolle von GPS zu lösen, entwickelt die Europäische Union ihr eigenes Programm : Galileo. Aber es gibt noch Abschattungsmöglichkeiten, sodass die GNSS für Positionierung nicht ausreichend sind.

Diese Systeme können mit Inertialsensoren unterstützen werden. Es gibt mehrere Arten von solchen Sensoren, mit jeweils mehreren Prinzipien. Zunächst haben wir induktive oder Hall Effekt Radsensoren gesehen. Dann wurden kapazitiven sowohl als auch piezoelektrischen und MEMS Beschleunigungssensoren vorgestellt. Letztlich wurde die Anwendung von piezoelektrischen und optischen Verfahren für Kreisel erklärt. All diese Sensoren sind seit langem im Automobilbereich (wie z. B. für den Airbag) in Anwendung, und durch Koppelortung können sie GNSS bei der Positionierung unterstützen.

Literaturverzeichnis

- [Czo00] R. Czommer. Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken, 2000.
http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2001/818/pdf/Czommer_Diss.pdf.
- [Dan94] P. Dana. The Global Positioning System, 1994.
<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>.
- [Hei01] P. Heinrich. GPS und Inertialsensoren, 2001.
http://www.ikg.uni-bonn.de/Lehre/Geoinfo/seminar_Geoinfo_7_Sem_ws_01_02/Vortraege/heinrich_02_01_21.ppt.
- [Lan03] R. Langley. How Does GPS Work ?, 2003.
<http://gge.unb.ca/Resources/HowDoesGPSWork.html>.
- [misa] Europa - Energie und Verkehr - GALILEO.
http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/index_de.htm.
- [misb] Europäische Weltraumorganisation.
<http://www.esa.int>.
- [misc] GPS Support Center.
<http://www.schriever.af.mil/GpsSupportCenter/>.
- [misd] Interagency GPS Executive Board.
<http://www.igeb.gov/>.
- [mise] Komponenten eines AMR - Sensorik.
<http://ag-vp-www.informatik.uni-kl.de/Papers/skriptamr/Kapitel%202.2.pdf>.
- [misf] MEMS Accelerometers.
<http://web.mit.edu/3.52/Accelerometer.pdf>.
- [misg] Piezoelektrisches Prinzip.
http://www.mmf.de/piezoelektrisches_prinzip.htm.
- [mish] US Coast Guard Navigation Center.
<http://www.navcen.uscg.gov/>.
- [misi] US FAA's GPS Satellite Navigation.
<http://gps.faa.gov>.

Kapitel 7

Digitale Karten und Routenplanung

Über den Autor

Herbert Peer. studiert zur Zeit im 8. Semester Elektro- und Informationstechnik an der Technischen Universität München.

7.1 Einführung

Ungehinderte Mobilität wird von allen Autofahrern gewünscht. Zur Zeit entwickelt sich die Verkehrssituation allerdings in entgegengesetzter Richtung. Dem ständig zunehmenden Verkehrsaufkommen kann nun auf 2 Arten begegnet werden; entweder man baut, wie bisher geschehen, die Infrastrukturen weiter aus, oder man versucht den Verkehr mittels logistischer Maßnahmen zu lenken und zu verlagern um freie Ressourcen auszuschöpfen. Da der Neu- und Ausbau von Infrastrukturen auf Dauer zu teuer und unpraktikabel ist, bietet sich in Form von Navigationsystemen eine Möglichkeit dieses verkehrsleittechnische Zukunftsziel in die Tat umzusetzen. Doch wie weit ist der heutige Stand der Technik und welche Erwartungen muss ein Navigationsystem erfüllen damit es Anklang findet und gekauft wird?

Um dies zu beantworten muss man sich zuerst die Frage stellen, was der Allgemeinbürger von einem Navigationssystem erwartet. Navigieren beinhaltet neben dem offensichtlichen Ziel schnellstmöglich von Punkt A nach Punkt B zu gelangen noch zahlreiche andere Aspekte wie, wo kann ich als Fahrer Serviceleistungen (Tankstellen, Raststätten oder technische Unterstützung) erhalten, oder wie flexibel reagiert das System auf aktuelle Verkehrsstörungen.

Aufbauend auf den in den folgenden Abschnitten dargestellten Grundlagen über Speicherformen von Karteninformationen und Lokalisierungsproblematiken, wird schrittweise versucht sich an das Ziel der Wegführung und Routenplanung heranzutasten (siehe Abbildung 7.1).

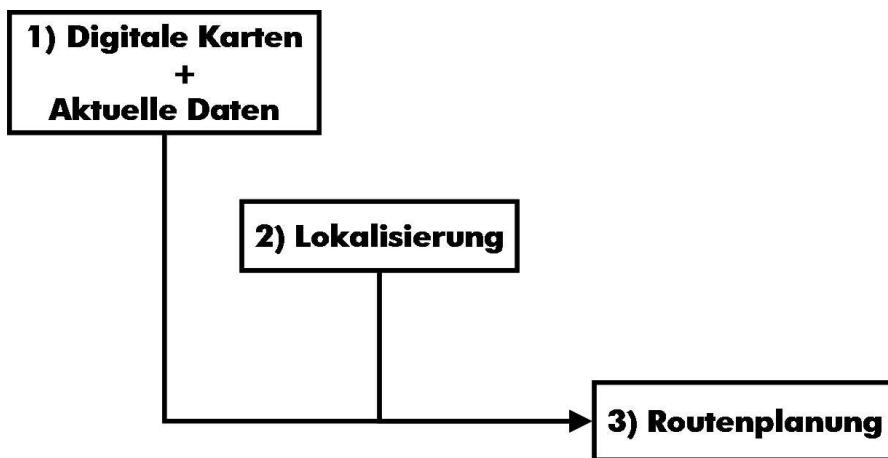


Abbildung 7.1: Grundlegende Schritte zur Routenplanung

7.2 Digitale Karten

Das Herzstück einer jeden verkehrstechnischen Lenkung ist die digitale Karte. Darunter versteht man die digitale Speicherform aller in einer gängigen Straßenkarte vorhanden Informationen wie z.B. Städte, Dörfer, Straßen, Sehenswürdigkeiten, Serviceleistungsdienststellen, und vieles mehr. Die im folgenden betrachteten digitalen Straßenkarten stellen somit nur einen kleinen, aus dem Gesamtvolumen an Daten extrahierten Teilbereich dar, welcher sich mit dem Straßenverlauf inner- und außerorts beschäftigt.

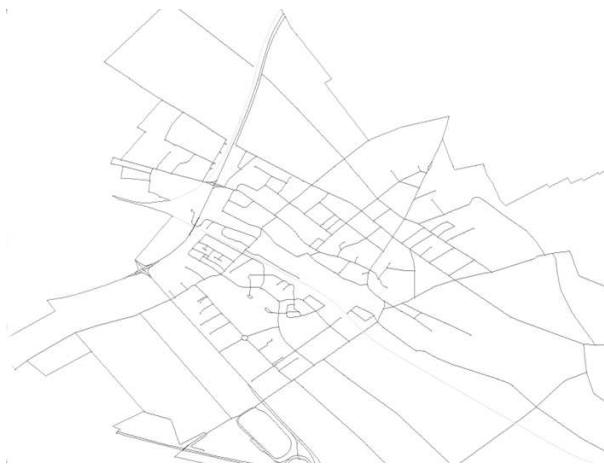


Abbildung 7.2: Beispiel zu digitalen Karten: Straßennetz des Nationalen Flughafen Brüssels als digitalisierte GDF-Trajektorien [ERT98].

7.2.1 Geschichtliche Entwicklung digitaler Karten

Bereits Mitte der 80er Jahre war die Notwendigkeit einer digitalisierten Straßenkarte absehbar. Deshalb rief die EU das Projekt EUREKA ins Leben, welches sich im Projekt DEMETER das Ziel der Ausarbeitung einer standardisierten Speicherform setzte. 1988 wurde schließlich der GDF (Geographic Data File) Standard 1.0 veröffentlicht.

Um die Bereitstellung der Schüsseltechnologie digitaler Straßenkarten für die europäische Automobilindustrie zu ermöglichen gründeten 11 europäische Automobilfirmen das Projekt PROMETHEUS. Parallel dazu startete im Jahr 1989 die Europäische Kommission das Projekt DRIVE I, mit dem Ziel der Verbesserung der Straßensicherheit, Transporteffizienz und Umweltqualität. Bezuglich digitaler Karten ist das darin enthaltene Projekt EDRM von Interesse, welches den DEMETER-Standard auf seine Eignung für die Produktion digitaler Straßenkarten untersuchte und Datenerfassungsmethoden bestehender Datenquellen erprobte. Die Ergebnisse dieses Projekts führten zur Entwicklung der im Dezember 1990 veröffentlichten Version GDF 2.0, in der durch die Erweiterung der Teilnehmerzahl der Standardisierungsgruppe und die Berücksichtigung neuer Anwendungsbereiche der Objekt- und Attributkatalog digitaler Karten erheblich erweitert wurde.

Im Jahr 1992 begann die Standardisierungsarbeit durch das CEN (European Committee for Standardization) mit dem Ziel GDF als offiziellen europäischen Standard zu deklarieren. 1995 wurden die Ergebnisse schließlich als *GDF 3.0* veröffentlicht welches auch der heute gültigen Formatspezifikation entspricht.

Mittlerweile ist GDF von der ISO (International Standardization Organization) als weltweiter Standard anerkannt und wird ebenfalls dort weiterentwickelt¹.

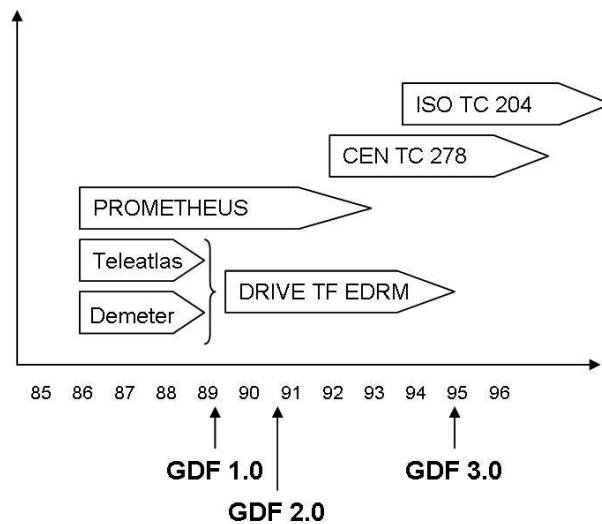


Abbildung 7.3: Zeitliche Entwicklung des GDF Standards [Ste01].

7.2.2 Grundlagen zur Speicherform digitaler Karten

GDF stellt nicht nur ein standardisiertes geometrisches und topologisches Modell für Straßendaten dar, sondern enthält auch Regeln zur Datenerfassung, -verwaltung und -präsentation. Eine direkte Applikationsunterstützung ist durch GDF hingegen nicht gegeben; vielmehr müssen für jede Anwendung die im Austauschformat vorgehaltenen GDF-Daten in das dafür vorgesehene System überführt werden. Dabei ist insbesondere eine anwendungsabhängige Optimierung der Datenhaltung erforderlich.

GDF 3.0 verwendet ein objektorientiertes Datenkonzept und speichert verkehrstechnisch interessante Daten in Form von 3 Elementen: Knoten, Attribute und Relationen (siehe Abbildung 7.3.1). Diese liegen in jeweils getrennt voneinander aktualisierbaren Datenkatalogen vor: [Ste01]

Objektkatalog (Feature Catalogue): enthält die in GDF definierten Objekte (Knoten) für welche eine direkte länger bestehende Zuordnung zur realen Welt besteht (z.B. Straßen, Sehenswürdigkeiten, ...).

¹Absatzdaten entnommen aus [Ste01]

Attributkatalog (Attribute Catalogue): enthält die Eigenschaften eines im Objektkatalog enthaltenen Objekts (für eine Straße beispielsweise: Fahrtrichtung, Einbahn, Anzahl der Fahrbahnen).

Relationenkatalog (Relationship Catalogue): enthält die Beziehungen zwischen den Objekten (so wird eine Straße durch die Verknüpfung ihrer Teilstücke realisiert).

Hinzu kommen die im GDF Standard ebenfalls definierten planungsorientierten Kataloge welche ebenfalls getrennt voneinander aktualisiert werden können, hier aber nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden:

Objektdarstellungsvorschrift (Feature Representation Scheme): definiert die Art der Darstellung der Objekte

Qualitätsbeschreibung (Quality Description): beschreibt, wie die Qualität von GDF-Daten gemessen werden kann

General Data Model: beschreibt die ausführliche Definition der Datenmodellierung

Global Data Catalogue: informiert über Metadaten wie Erfassungsdatum, Datenquellen und Projektionsmethoden

Media Record Specification: bietet eine Beschreibung des Datenaustauschformates

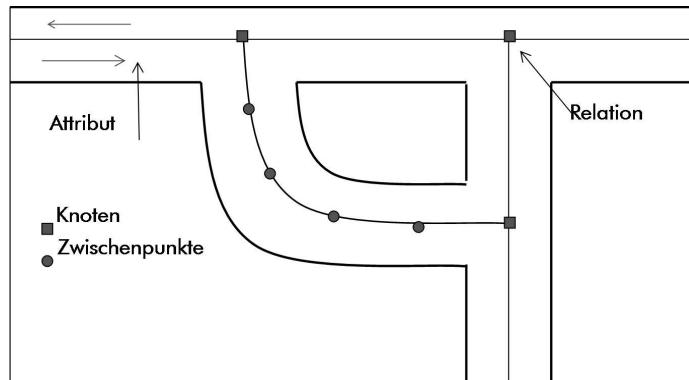


Abbildung 7.4: GDF-Basislemente: dargestellt ist der beispielhafte Verlauf einer durch GDF-Basislemente dargestellten Straße. Diese ist über Verknüpfungen (Relationen) zwischen den Teilstraßenstücken realisiert. Ein Auszug aus dem Attributkatalog würde ergeben: Jede Straße hat 2 Fahrspuren in Gegenfahrtrichtung [R.C00].

7.2.3 Aktuell treibende Kräfte und heutiger Datenbestand

Die Erfassung, Pflege und Vermarktung von GDF-Daten wird in Europa von zwei Firmenkonsortien durchgeführt, die sich anfangs EDRA (European Digital Road Association) und EGT (European Geographic Technologies) nannten. Die EDRA war ein Zusammenschluss der Firmen Bosch, Tele-Atlas und ETAK; die EGT hingegen wurde durch die Firma Philips gegründet.

Inzwischen haben sich die Konsortien umbenannt und firmieren heute unter den Namen TeleAtlas (EDRA) und dem heutigen Marktführer Navigation Technologies (EGT), kurz NavTech. Beide Firmen sind seit ihrer Gründung als Konkurrenten anzusehen, da beide unabhängig voneinander GDF-Daten flächendeckend erfassen und etwa halbjährig Aktualisierungen ihrer Datenbestände veröffentlichen [Ste01]. Für Deutschland bedeutet das die Bereitstellung einer für diese Zwecke aus einer Gesamtdatenmenge extrahierten Datenfülle von insgesamt 2 CD-ROMs ($\sim 1,3$ GByte) [Tel04].

Beide Kartenhersteller legen dabei höchste Priorität auf die Digitalisierung von Ballungs-



Abbildung 7.5: TeleAtlas [Tel04] und NavTech [Nav04b] sind die führenden Firmenkonsortien für die Bereitstellung digitaler Straßenkarten.

räumen. Trotzdem zeigen sich Unterschiede in der Erfassungsphilosophie. Während NavTech zugunsten einer schnelleren Flächenversorgung im innerstädtischen Bereich gewisse Abstriche bei der Genauigkeit und Detailtreue in Kauf genommen hat, legt TeleAtlas wesentlich mehr Wert auf die exakte Modellierung der Geometrie im Ballungsraum. Dafür wurden dünn besiedelte Gebiete gegenüber NavTech aber erst viel später erfasst.

Seit 1995 stehen in Deutschland die GDF-Daten flächendeckend zur Verfügung. Mit flächendeckend wird hierbei die Erfassung aller Straßen von über 3 Breite für Ballungszentren mit mehr als 50.000 Einwohnern und des Überlandstraßennetzes verstanden. Für Deutschland waren demzufolge 1995 ca. 500.000 Straßenkilometer erfasst.

Derzeit sind alle Ortschaften über 20.000 Einwohner vollständig digitalisiert, kleinere Orte dagegen nur teilweise oder gar nicht. Im einfachsten Fall besteht eine Ortschaft aus einem einzelnen Punkt zu dem Überlandstraßen führen ².

7.2.4 Erfassung und Digitalisierung

Zur Erstellung digitaler Karten wird Basismaterial verschiedenster Quellen (Luftbilder, Luftbildkarten, amtliche topographische Karten, Adressverzeichnisse, ...) herangezogen. Jede dieser verschiedenen Quelldaten weist unterschiedliche Projektionen, Maßstäbe und

²Absatzdaten entnommen aus [Ste01]

Koordinatensysteme auf welche vereinheitlicht werden müssen. Dies erfolgt indem sämtliche Daten des Quellmaterials in das Gauss-Krüger-Koordinatensystem (World Geodetic Systems, 1984) übertragen werden. Dabei handelt es sich um einen internationalen Standard, der weltweit als Grundlage für Positionsbestimmungen mittels GPS verwendet wird. Erst durch diese Vereinheitlichung wird eine überregionale und länderübergreifende Verknüpfung einzelner Kartenblätter möglich. Dabei entstehen jedoch enorme Datenmengen; das Straßensystem Deutschlands umfasst beispielsweise mehr als zwei Millionen Vektoren und weist eine Dateigröße von mehreren Gigabytes auf. Diese Datenfülle muss deshalb von den Kartenherstellern auf anwendungsspezifische Ansprüche angepasst werden.

Nach der Vereinheitlichung, Digitalisierung und Definition der Vektoren wird das gesamte Kartenmaterial nochmals einer Überprüfung unterzogen. Dies geschieht, indem die digitalisierte Karte mit Luftbildaufnahmen verglichen und eventuell korrigiert wird.

Nun können noch Zusatzinformationen hinterlegt werden welche nicht in direktem Zusammenhang mit der Navigation stehen, aber vielleicht anwendungsspezifische Vorteile aufweisen. Dies können Angaben sein wie Straßenkategorie (Autobahn, Hauptstrasse, Fahrweg, etc.), mehrsprachige Hinterlegung von Orts- und Straßennamen, Points of Interest, Museen, Sehenswürdigkeiten usw..

Letztendlich muss aber jede Anwendung die Daten die für sie von Interesse sind aus diesem Datenpool extrahieren und fallspezifisch geeignet aufbereiten ³.

7.2.5 Problematiken digitaler Karten

Die wesentliche und auch kostspieligste Problematik stellt die Wartung und Aktualisierung der digitalen Daten dar. Bei Herstellern von digitalen Karten gilt als Faustregel, dass sich jedes Jahr ungefähr 10-20 Prozent der Daten ändern.

Fortlaufende Datenaktualisierung ist somit unbedingt notwendig. Beispielsweise sind für die Herstellung der digitalen Straßenkarte Deutschlands bis heute 50 Mannjahre in die Herstellung, und 150 Mannjahre zur Datenpflege investiert worden. Dies ist vor allem auf die langsame und mit hohen Kosten verbundene meist noch händische Digitalisierung der Basisdaten zurückzuführen [FR01]. Aktuelle Anstrengungen zum Entwurf einer sich selbstaktualisierenden Straßenkarte stecken noch in den Kinderschuhen und es bedarf noch einiger Entwicklungszeit bevor diese kommerziell eingesetzt werden können. So laufen zur Zeit Versuchsreihen zur Ermittlung von Straßenstrecken durch speziell ausgestattete Testfahrzeuge die die gefahrene Straßentrajektorie funktechnisch an eine Zentrale übermitteln. Diese wird im Nachhinein ausgewertet um eventuelle Spurwechsel und Fahrunregelmäßigkeiten auszugleichen [Ste01].

Generell kann man zwischen mittelfristigen (planbaren) Kartenänderungen, welche vor allem durch verkehrsleittechnische Maßnahmen wie dem Neubau einer Straße auftreten, und kurzfristigen (zeitkritischen) Kartendaten unterscheiden.

Hierbei können nur die langfristige Änderungen durch halbjährige [Tel04] Datenaktualisierungen von den Kartenherstellern abgedeckt werden. Für kurzfristige Änderungen wie

³Absatzdaten entnommen aus [FR01]

Stauinformationen oder Baustellenwarnungen muss auf anderweitige Informationskanäle zurückgegriffen werden. Aber auch hierfür existiert bereits heute ein funktionierender Lösungsansatz; der *Traffic Message Channel (TMC)*.

Zeitkritische Verkehrsinformationen werden hierbei durch Ausstrahlung im Rundfunk lokalisiert für die betreffenden Gebiete zur Verfügung gestellt. Die benötigten verkehrsleit-technischen Informationen werden von einem Nachrichtenverbund aus Polizei, Autobahn-sensoren, ... an die Radio-Sendestationen übermittelt, welche diese moduliert auf ihr eigenes UKW Sendesignal über *RDS* (Radio DatenSystem für UKW/FM) ausstrahlen. Zu erwähnen ist, dass beispielsweise der West-Deutsche-Rundfunk (WDR) diese Infor-mationen bereits seit 1997, also schon seit geraumer Zeit, ausstrahlt; Anwendungen die diese Informationen nutzen aber erst kürzlich verfügbar sind. Der TMC steht in Europa zumindest weitgehend flächendeckend in folgenden Ländern zur Verfügung: Deutschland, Österreich, Schweiz, Italien, Frankreich, Belgien, Niederlande, Spanien, Schweden und Dänemark⁴.

Diese Informationen werden von heutigen Navigationssystemen bereits zuverlässig ausge-wertet und wenn nötig mit einer routenplanenden Reaktion beantwortet.



Abbildung 7.6: Beispiel: Verkehrsleitende Reaktion auf einen Stau des Navigationssystems Mobile-Navigator—4 [Nav04a], Testsieger aus [Gol03].

7.3 Navigation und Routenplanung

7.3.1 Lokalisierung und Map-Matching

Heutige Navigationssysteme verwenden zur globalen Ausgangspositionsbestimmung das Satellitennavigationssystem GPS. Generell muss zwischen billigeren Varianten welche lediglich rein GPS-basiert aufgebaut sind, und teureren Varianten welche GPS nur zur

⁴Absatzdaten entnommen aus [FR01]

Ausgangspositionsbestimmung und Rekalibrierung von Fahrstreckenabweichungen heranziehen, unterschieden werden.

Rein auf GPS aufbauende Systeme sind bereits ab etwa 200 Euro[?, misc:hs610]u haben, weisen aber den wesentlichen Nachteil auf, dass GPS allein ohne Hinzuziehen weiterer Sensordaten sehr ungenau ist. Dies ist vor allem in größeren Ballungszentren der Fall, wo durch Reflexions- und Abschattungseffekte nur eine Schätzung der Fahrzeugposition innerhalb eines Suchbereichs von etwa 100 Metern bestimmt werden kann. Diese Genauigkeit kann zwar mittels D-GPS bis auf $\sim 1\text{-}3$ m gesteigert werden, derartige Empfänger sind aber noch zu teurer um sie kommerziell einsetzen zu können.

Ein weiterer wesentlicher Nachteil reiner GPS-Lösungen besteht darin, dass an Orten an denen keine Sichtverbindung zu den GPS-Satelliten besteht (z.B. in Tunnels) auf ein Alternativ-System zurückgegriffen werden muss [FR01].

Teurere Navigationssysteme werten deshalb zusätzliche Fahrzeugsensordaten aus, die meist bereits durch das installierte ABS-System geliefert werden und dadurch überall und zu jedem Zeitpunkt zur Verfügung stehen. Derartige Navigationssystemlösungen werden unter der Fachbezeichnung Koppel-Navigation zusammengefasst. Genauere Informationen hierzu können im vorigen Beitrag zum Thema: Fahrzeugsensorik (II): GPS, Galileo, Inertialsensoren und Co., nachgelesen werden.

Durch komplexe Auswertungsarbeiten kann anhand der gemessenen Sensorwerte auf die gefahrene Strecke geschlossen werden. Der wesentliche Schritt zur Positions wiederfindung auf der digitalen Karte wird unter dem Fachbegriff *Map-Matching* zusammengefasst. Hierbei geht es vornämlich darum, die gemessene Trajektorie einem Streckenabschnitt in der digitalen Karte eindeutig zuzuordnen.

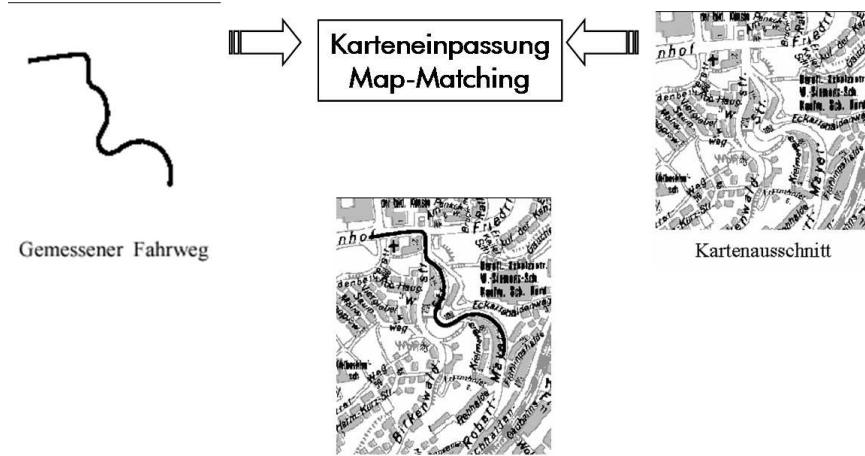


Abbildung 7.7: Map-Match Prozess: Ziel ist die gemessene Trajektorie auf der digitalen Karte wiederzufinden [R.C00].

Der Map-Matching Ablauf lässt sich mit 3 Schritten umreißen: [R.C00]

1. *Eingabe oder Bestimmung der Startposition:* Während vor allem bei älteren Systemen die Eingabe der Startposition noch händisch vom Benutzer erfolgen musste, z.B. durch Eingabe der Kreuzung der Straßen X und Y, strebt man heute den sehr

viel benutzerfreundlichen Ansatz der Startpositionsbestimmung über GPS an. GPS ist allerdings für den praktischen Gebrauch vor allem in Großstädten zu ungenau. Reflexionen und Abschattungseffekte innerhalb stark besiedelter Gebiete ermöglichen lediglich eine Genauigkeit von ungefähr 100m Durchmesser. Abhilfe verspricht hier D-GPS, ein Verfahren bei welchem durch Einbezug eines weiteren Funksignals eines Funkturms mit bekannter fester Position eine Genauigkeitssteigerung erzielbar ist und eine Positionsbestimmung innerhalb urbaner Gebiete von bis auf 1-3 m garantiert werden kann. Für den praktischen Einsatz sind die Empfänger im Vergleich zu GPS-Empfängern aber leider noch zu teuer.

Hinzu kommt die generelle Einschränkung dass GPS-Signale innerhalb von Tunnels gar nicht verfügbar sind. In solchen Fällen muss auf ein Ersatzsystem zurückgegriffen werden. Heute begnügt man sich bei der Bestimmung der Startposition über GPS mit einem dermaßen erhaltenen Suchgebiet von 100-200m Durchmesser. Ausgehend von diesem werden alle möglichen Fahrtrajektorien die aus diesem Gebiet hinausführen und in der digitalen Karte eingezeichnet sind, berechnet.

2. *Auffinden der tatsächlich befahrenen Straße:* Aus der über die Fahrzeugsensoren enthaltenen Fahrtrajektorie wird je nach Art und Aussehen der vorliegenden Sensordaten die die tatsächlich gefahrene Strecke über ein „Ähnlichkeitsmaß“ bestimmt. Versuchsreihen[?, misc:hs61]eigen, dass die tatsächlich gefahrene Strecke nach etwa 3-4 tatsächlich gefahrenen Kurven gefunden wird. Navigationssysteme benötigen also immer eine gewisse Kalibrierungszeit bevor sie Richtungsvorgaben geben können.
3. *Fortlaufende Sensorsauswertung:* Nachdem die Ausgangsposition bestimmt wurde kann durch fortlaufende Sensorsauswertung die gefahrene Strecke verfolgt werden. Anhand dieser Daten können Navigationssysteme ihre Wegfindung auslegen.

Den wesentlichen Entwicklungsschritt zur Positionsbestimmung stellt der Vergleich der gemessenen abgefahrenen Trajektorie mit den möglichen in der digitalen Karte eingezeichneten Routen dar; dies wurde im vorigen Absatz lediglich kurz als *Ähnlichkeitsmaß* erwähnt.

Grundsätzlich existieren drei verschiedene Ansätze zur Bestimmung von Ähnlichkeitsmaßen:

1. Vergleich von Winkeln und Strecken
2. Vergleich von Positionen (zweidimensionale kartesische Koordinaten)
3. Vergleich von Profilen (Winkel- oder Krümmungsbild)

Diese Verfahren unterscheiden sich in der Darstellungsweise ebener Kurven, die im Krümmungsbild, Richtungswinkelbild oder mit zweidimensionalen kartesischen Koordinaten erfolgen

kann, und in ihrer Anzahl an Freiheitsgraden.

Dabei stellt das Ähnlichkeitsmaß über Richtungswinkel und Strecke das einfachste nutzbare Maß für den Vergleich von Trajektorien dar. Prinzipiell wird der gemessene Richtungswinkel mit der Richtung des Straßensegmentes und die gemessene zurückgelegte Strecke mit der Länge des Straßensegmentes verglichen.

Bei den Koordinatenverfahren wird die zurückgelegte Fahrstrecke in Linienelemente konstanter Länge eingeteilt und mit den Linienelementen aus der digitalen Karte verglichen.

Um mit diesen Linienelementen zwei koordinatenmäßig bekannte Trassen einander zu-



Abbildung 7.8: Prinzip des Trajektorienvergleiches auf Koordinatenebene. Die zurückgelegte Fahrstrecke wird in Linienelemente konstanter Länge eingeteilt und mit den Linienelementen aus der digitalen Karte verglichen [Ste01].

zuordnen, können Transformationen mit unterschiedlich vielen Freiheitsgraden angesetzt werden, z.B. reine Translation, ebene Ähnlichkeitstransformation oder Affintransformation. Hierbei sei auf entsprechendes mathematisches Lehrmaterial verwiesen, siehe [R.C00] und [Ste01].

Die auf der Ebene von Krümmungen oder Richtungswinkeln arbeitenden Ähnlichkeitsverfahren, basieren auf Techniken der Mustererkennung oder digitalen Bildzuordnung. Die Algorithmen der digitalen Bildzuordnung können in zwei Verfahrensklassen eingeteilt werden: merkmalsgestützte Bildzuordnung (feature based matching) und intensitätsbasierte Bildzuordnung (area based matching). Prinzipiell basieren diese Verfahren auf der Kreuzkorrelation und der Minimierung des quadratischen Fehlers. Genaueres kann in [R.C00] und [Ste01] anchgelesen werden⁵.

7.3.2 Routenplanung

Aufbauend auf den bisher dargestellten digitalen Karten und Positionsbestimmungsverfahren kann zum Anwendungsfall, der Zielführung und Routenplanung, übergegangen werden.

Das Ziel ist, nicht ortskundigen Fahrern, die lästige Arbeit der Routensuche auf dem Stadtplan oder auf Straßenkarten abzunehmen und durch akustische Lenkanweisungen zu ersetzen. Akustisch deshalb, da der Fahrer dadurch am wenigsten vom eigentlichen Fahrgeschehen abgelenkt wird.

⁵Absatzdaten entnommen aus [Ste01]

Hierzu hat sich die Betrachtung des Straßenplans als Graphen durchgesetzt. Jede Kreuzung stellt einen Knoten dar, und jeder Strecke zwischen diesen werden Kosten zugeteilt. Diese können von verschiedensten Einflussfaktoren abhängen. Beispielsweise ist eine Einbahnstraße nur in einer Richtung befahrbar und wird somit in Gegen-Fahrtrichtung „unendliche“ Kosten aufweisen; eine Straße mit Ampeln wird aufgrund der möglichen Wartezeit höhere Kosten haben als eine frei befahrbare Straße, usw. Die genaue Zuordnung dieses Kostenfunktional ist aber von Navigationssystem zu Navigationssystem verschieden.

Aufbauend auf diesem Graphen kann mittels mathematischer Algorithmen der „günstigste“ Weg, sprich der *Kosten-Minimale Weg* gefunden werden. Ein Beispiel für derartige Verfahren ist der Dijkstra-Algorithmus, welcher allerdings einen nicht vertretbaren Aufwand hat, da immer alle möglichen Wege untersucht werden bis der kostenminimale gefunden wurde. Anwendungsnäher (Warum sollen Strecken untersucht werden, bei denen der Autofahrer zuerst an das andere Ende der Stadt fahren müsste?) ist der A*-Algorithmus welcher zielgerichtet arbeitet und damit schneller ein brauchbares Ergebnis erzielen kann. Dessen Funktionalität kann man sich in etwa so vorstellen, dass anhand des bekannten Luftlinienabstands zwischen untersuchtem Knoten und Ziel, die Gesamtkosten für die entsprechend gewählten Routen geschätzt werden. Streckenabschnitte welche „zu weit“ von der Luftlinienverbindung zwischen Start und Ziel abweichen werden daraufhin einfach verworfen und nicht mehr weiterverfolgt. Auf den genauen Ablauf beider Algorithmen wird in [Sie02] eingegangen⁶.

Heutige Navigationssysteme unterscheiden sich drastisch in der Auswahl und Umsetzung dieser Algorithmen. In aktuellen Systemen äußert sich dies in kurzzeitigen „Irrfahrten“ bis die Fahrzeugposition wiedergefunden wurde. Genauere Angaben sind in [Gol03] nachlesbar.

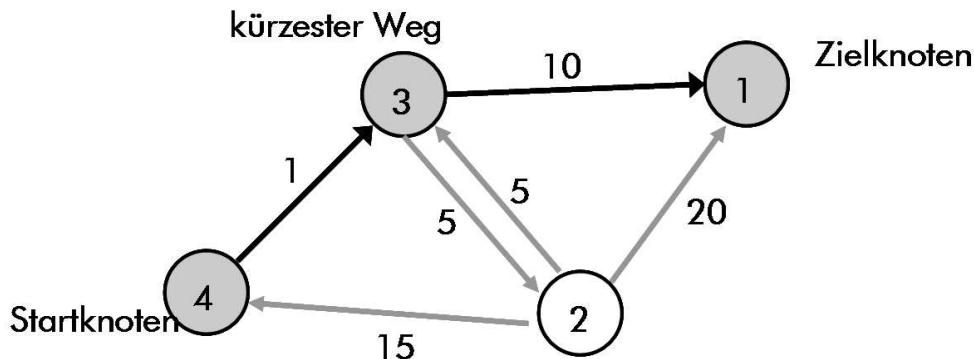


Abbildung 7.9: Digitale Karten werden als gerichtete Graphen aufgefasst. Jede Kante wird mit Kosten beaufschlagt; die Routenplanung wählt den kostenminimalen Weg aus [Sie02].

⁶Absatzdaten entnommen aus [Sie02]

7.4 Digitale Karten und Routenplanung: Schlussbemerkung

Seit den Anfängen Mitte der 80er Jahre haben sich Navigationsysteme zu einem technologischen Meisterwerk gemausert welche heute den Ersatz herkömmlicher Straßenkarten in Papierform anstreben. Um dieses hochgesteckte Ziel zu erreichen war die langfristige Planung und Schaffung von erheblichen Grundlagen in Sachen digitaler Kartenorganisation, Positionsbestimmung und mathematischer Graphentheorie erforderlich.

So konnten für die gröbsten technischen Schwierigkeiten, Datenmanagement und Positionsbestimmung bis heute gute und umsetzbare Lösungen gefunden werden. Digitale Karten werden beispielsweise von kommerziellen Firmen ständig aktualisiert und halbjährig veröffentlicht; kurzfristige Verkehrsänderungen hingegen über Ausstrahlung durch die Radiosenderanstalten an die betroffenen Autofahrer direkt weitergegeben. Ortungsproblematiken innerhalb von Städten konnten durch Einbezug von Fahrzeugsensordaten weitgehend umgangen werden, und auch für die Datenrekombination von gefahrenen Strecken mit den in digital Form vorhandenen Trajektorien wurden brauchbare und v.a. schnelle Lösungen gefunden. Dennoch sind nicht alle Schwierigkeiten beseitigt. Größere Anstrengungen sind vor allem in den Bereich der *kostenoptimierteren Kartendatenerfassung* zur Schaffung einer sich selbstaktualisierenden Karte, und der *softwaremäßigen Auswertung von Fahrzeugsensordaten* zu erwarten.

Aber nicht nur in technischer Hinsicht steht noch viel Arbeit an; letztendlich muss dieses Produkt auch gekauft werden, und der Kunde muss hierfür erst einmal überzeugt werden. Ein wesentlicher Schritt zur breiten Akzeptanz wird sich schätzungswise mit der Serienproduktion und der daraus folgenden Preissenkung von Navigationssystemen ergeben. Zur Zeit sind Navigationssysteme in erster Linie noch viel zu teuer um als wirkliche Konkurrenz zur billigen Straßenkarte gelten zu können. Zukunftsträchtig sind sie jedoch allemal, da sie bezüglich Ressourceneinsparung und Flexibilität gegenüber ihren „Ahnen“ große Vorteile aufweisen.

Reine Zukunftsmusik stellt hingegen die Vision des autonomen Fahrens, sprich das Fahren ohne Lenker, dar. Hier ist weder die Technik genügend ausgereift, noch sind heutige Autofahrer bereit die Lenkkontrolle an das Fahrzeug abzutreten, und somit ihr Leben dem Fahrzeug mitsamt Navigationsystem anzuvertrauen.

Die Akzeptanz der Bevölkerung spielt deshalb bei der wirtschaftlichen Planung in diesem Fachbereich eine wesentliche Rolle.

Literaturverzeichnis

- [ERT98] ERTICO. ERTICO with the support of Navigation Technologies and Tele Atlas, 1998.
<http://www.ertico.com/links/gdf/gdf.htm>.
- [FR01] S. Schwab F. Ruedli, P. Rutishauser. Studienarbeit: Fahrzeugnavigation (2001/2002), 2001.
Hochschule für Wirtschaft Luzern.
- [Gol03] Martin Gollwitzer. Der Lotse aus dem All, 2003.
Chip Online Juli 2003.
- [Nav04a] Navigation. Navigation, 2004.
<http://www.navigon.de>.
- [Nav04b] NavTech. NavTech, 2004.
<http://www.navteq.com>.
- [R.C00] R.Cszommer. Dissertation: Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsvorfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken, 2000.
Univ. Stuttgart.
- [Sie02] Christian Siemes. Grundlagen des A*-Algorithmus und Anwendung in der Routenplanung, 2002.
GIS Seminar WS 2002/2003.
- [Ste01] Dörte Steup. Diplomarbeit: Untersuchungen zur automatischen Erfassung der Straßengeometrie für die Aktualisierung digitaler Straßenkarten, 2001.
TU Dresden & Universität Stuttgart.
- [Tel04] TeleAtlas. TeleAtlas, 2004.
<http://www.teleatlas.com>.

Kapitel 8

X-by-Wire im Fahrzeug

Sebastian Seisenberger studiert zur Zeit im 8.Semester Elektro- und Informationstechnik mit Schwerpunktmodul Mechatronik.

8.1 Einleitung

8.1.1 Warum X-by-Wire

Im klassischen Fahrzeug steuert der Fahrer über Lenkrad, Pedal oder Hebel sein Fahrzeug. Die Fahrbefehle werden über eine Mechanik oder Hydraulik ausgeführt. Es kann nur der Fahrer Einfluss auf die Steuerung des Fahrzeuges nehmen. Im Zuge des modernen und zukünftigen Fahrzeuges sollen auch Fahrsysteme Einfluss auf die Steuerung nehmen. Dies sind beispielsweise Fahrassistenzsysteme wie ESP, Spurhaltehilfe, Abstandskontrolle, etc oder das Motormanagement. Genau dies ermöglichen X-by-Wire-Systeme. Auch der Wunsch nach noch mehr Sicherheit und Komfort erfordern X-by-Wire-Systeme. Bei alternativen Antriebssystemen wie z.B. Hybridantrieben sind ebenso diese Systeme notwendig, da das komplizierte Zusammenspiel innerhalb des Antriebstranges von Computern geregelt wird, der Fahrzeugführer über das „Gaspedal“ nur noch den Geschwindigkeitswunsch vorgibt.

8.1.2 Definition

Unter X-by-Wire-Systemen im Fahrzeug versteht man Fahrsysteme, ohne mechanische oder hydraulische Verbindung von Bedieneinheit zu Funktionselement. Stattdessen werden elektrische Kabel, Sensoren und Aktoren eingesetzt. Die Kabel dienen der Energie- und Informationsübertragung, die Sensoren der Erfassung von Fahrwunsch und Fahrzustand. Die Aktoren führen die Stellbewegungen aus und melden Stellkräfte oder Stellbewegungen an der Bedieneinheit zurück.

8.1.3 EHS

Man unterscheidet zwischen elektrohydraulischen Systemen (EHS) und elektromechanischen Systemen (EMS).

Bei EHS handelt es sich um eine hybride Technik, bei der bereits Bedienelement und Stellbewegung mechanisch vollständig voneinander getrennt sind. Als ausführender Aktor dient jedoch eine Hydraulikeinheit, mit Pumpen und elektromagnetisch angesteuerten Ventilen. Dieses System bietet meist die Möglichkeit ein hydraulisch-mechanisches Not-system zu integrieren.

8.1.4 EMS

EMS sind reine by-Wire-Systeme, bei denen auch die ausführende Stellfunktion über elektrische Aktoren getätigt wird. Hier kann eine Ausfallsicherheit nur durch Redundanz in der Energie bzw. Stromversorgung sowie durch Redundanz in der Aktorik und Sensorik erreicht werden.

8.1.5 Vorteile

Die Anwendung von X-by-Wire kommt vor allem der Sicherheit zu gute. Es wird nämlich einerseits die passive Sicherheit von Fahrzeugen erhöht, da mechanische Teile wie Gestänge wegfallen und dadurch die Verletzungsgefahr bei einem Unfall gesenkt wird. Andererseits wird die aktive Sicherheit erhöht. Dies geschieht durch den Einsatz von Fahrassistenzsystemen die mit Hilfe von X-by-Wire-Systemen leicht realisiert werden können. Assistenzsysteme dieser Art sind beispielsweise dynamische Bremskraftverteilung oder Anti-Schleuderhilfe (ESP), die wesentlich zur Unfallvermeidung beitragen. X-by-Wire trägt auch wesentlich zur Steigerung des Komforts bei. Die Kräfte und Stellwege an der Bedieneinheit können für den Fahrer optimal eingestellt werden. Durch die vollständige mechanische Entkopplung von Bedieneinheit und Aktor, werden keine lästigen Vibratiornen mehr übertragen. Das Fahren und Steuern wird so einfacher und angenehmer. Jedoch nicht nur der Fahrer sondern auch die Automobilhersteller profitieren von der X-by-Wire-Technik. Die Produktionskosten können verringert werden, da die Montage der X-by-Wire Systeme einfacher und günstiger zu handhaben ist, als der Einbau von Hydraulik mit Leitungen oder von mechanischen Gestängen. Durch die Einsparung der Hydraulik und Mechanik verringert der Automobilhersteller gleichzeitig das Gewicht seiner Fahrzeuge. Schließlich werden die Autobauer in ihrem Design und in der Konstruktion freier, weil der Bauraum von X-by-Wire-Systemen geringer ist. Auch die Platzierung von X-by-Wire-Systemen im Fahrzeug kann man unabhängiger gestalten, als die der herkömmlicher Systeme.

8.1.6 Nachteile

Demgegenüber stehen jedoch auch Probleme in der Ausfallsicherheit. Diese kann oftmals noch mit mechanischen oder hydraulischen Notsystemen erreicht werden, wobei hier die Vorteile bezüglich des Gewichtes, des Bauraumes oder z.B. der passiven Sicherheit wieder verspielt werden. Bei reinen X-by-Wire-Systemen kann die Ausfallsicherheit nur durch Redundanz erreicht werden. Hierbei muß erstens die Stromversorgung redundant ausgelegt werden, um jederzeit die Energieversorgung sicherzustellen. In der Praxis heißt das, mindestens eine doppelte Batterieeinheit und ein doppeltes Bordnetz muß vorhanden sein. Zweitens muß das jeweilige X-by-Wire-System in sich redundant gebaut sein. Das bedeutet, die Aktorik und Sensorik mu mehrfach, mindestens aber doppelt verbaut sein. Hohe Anforderungen werden auch an die Robustheit der Elektronik gestellt. Das heißt die

Elektronik darf in keinem Fahrzustand mit Regelung und Steuerung überfordert sein. Andererseits muss eine hohe Fehlertoleranz gegeben sein, so dass die Elektronik beispielsweise falsche Sensorwerte ausfiltert, dafür die Werte eines redundanten Sensors verwendet. Da, wie bereits Anfangs erwähnt, die Energie über Kabel mit elektrischen Strom übertragen werden, steigt damit auch der Strombedarf. Dies hat zur Folge, dass bei einem herkömmlichen 12 Volt Bordnetz viel dickere Kabel verwendet werden müssten. In Zukunft werden, deshalb Bordnetze mit höherer Voltzahl verbaut werden, wie z.B. ein 42-Volt-Netz. Zusätzlich wird bei X-by-Wire-Systemen immer eine haptische Einheit benötigt, die dafür sorgt, dass die Kraft- und der Bewegungsaufwand an die Bedieneinheit zurückgemeldet wird. Beispielsweise simuliert einer by-Wire-Lenkung ein Motor am Lenkrad die aufgebrachte Lenkkraft.

8.2 Einzelsysteme

8.2.1 Steer-by-Wire

Zahnstangenlenkung

Um die Entwicklung der Steer-by-Wire-Systeme besser nachvollziehen zu können, wird zuerst eine Zahnstangenlenkung erläutert, wie sie heute üblicherweise im PKW verbaut wird. Die Zahnstangenlenkung gibt die Drehbewegung des Lenkrades über ein Getriebe auf die Zahnstange. So wird eine links - rechts Bewegung der Zahnstange erreicht, die dann die Stellung der Räder bestimmt. Optional kann noch ein hydraulischer oder elektrischer Servomotor zur Kraftunterstützung des Fahrers integriert werden. Die Zahnstangenlenkung zeichnet sich durch ihre äußerst hohe Zuverlässigkeit aus, da sie bereits millionenfach verbaut und erprobt ist. Ebenso so vermittelt die Zahnstangenlenkung das oftmals vom Fahrer gewünschte Fahrgefühl sehr gut. Schlecht ist jedoch die passive Sicherheit, da bei einem Unfall die Verletzungsgefahr durch Lenkrad und Lenksäule sehr hoch ist. Auch Eingriffe eines Fahrassistenzsystems in diese Lenkung sind nicht möglich. Letztlich ist eine Zahnstangenlenkung auch immer mit einer festen Lenkübersetzung verbunden, die nicht an die Fahrgeschwindigkeit angepasst werden kann.



Abbildung 8.1: Zahnstangenlenkung (www.zf.com)

Aktiv-Lenkung

Die Aktiv-Lenkung stellt eine Weiterentwicklung der herkömmlichen Zahnstangenlenkung dar. Die Zahnstangenlenkung wird um ein Planetengetriebe in der Lenksäule erweitert. Der Fahrerzeuglenker gibt seine Stellbewegung auf das Sonnenrad über den Planetenkranz an die Zahnstange weiter. Ein Elektromotor kann über das Hohlrad auf den Planetenkranz und somit auf die Zahnstange wirken. Es werden also die Stellbewegung des Fahrers und des Elektromotors addiert. Dadurch wird es erstmals möglich, dass Fahrassistenzsysteme Eingriffe auf die Lenkung nehmen. Die Anti-Schleuderhilfe kann beispielsweise jetzt nicht nur über Bremseingriffe sondern auch über Lenkeingriffe das Fahrzeug bei gefährlichen Fahrzuständen stabilisieren. Es bleibt das gute Fahrgefühl wie bei einer Zahnstangenlenkung erhalten, jedoch kann zusätzlich eine variable Lenkübersetzung realisiert werden. Eine indirektere Lenkung für hohe Geschwindigkeiten, direkte Übersetzung für Stadtfahrt und Einparken. Vorteilhaft an diesem System ist auch, dass durch die mechanische Komponente kein zusätzliches Notsystem benötigt wird. Die mechanische Komponente mit Lenksäule bringt auch hier die Gefahr von schweren Verletzungen bei einem Unfall mit sich. Wegen des zusätzlichen Planetensatzes und Getriebes steigen Bauraum und Gewicht. Diese Lenkung ist derzeit jedoch die modernste Lösung die Automobilhersteller derzeit anbieten.

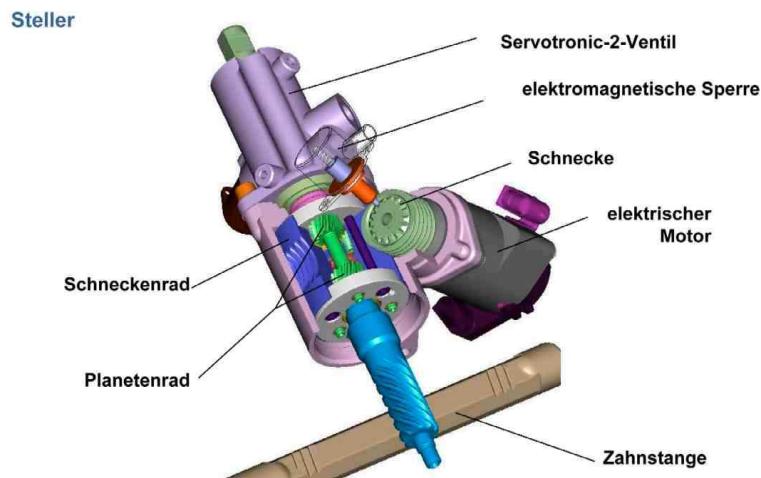


Abbildung 8.2: Aktiv-Lenkung (www.bosch.de)

Steer-by-Wire (redundant)

Einen viel größerer Entwicklungssprung stellt ein reines Steer-by-Wire dar, welches seine Ausfallsicherheit aus der Redundanz des Systems sicherstellt. Zwischen Lenkrad und Lenkung besteht keine mechanische Verbindung mehr. Das Lenkrad liefert über ein haptische

Einheit die Lenkkräfte zurück. Die Lenkbewegung an den Rädern übernimmt ein elektrischer Motor. Bei dieser Lenkung sind Eingriffe von Fahrassistenzsystemen und variable Lenkübersetzung sehr leicht zu realisieren. Durch den Wegfall mechanischer Komponenten ist diese Lösung äußerst platz- und gewichtsparend. Da nun keine Servopumpe mehr für die Kraftunterstützung betrieben werden muß, sondern der elektrische Aktor nur bei Bedarf arbeitet, trägt die reine Steer-by-Wire-Lenkung auch zum Kraftstoffsparen bei. Der große Nachteil und bisheriger Stolperstein dieser Technik ist der extreme Aufwand für die Ausfallsicherheit. Wie bereits oben bei EMS erwähnt, benötigt man dafür mindestens eine doppelte Aktorik und Sensorik, sowie ein ausfallsicheres Bordnetz.

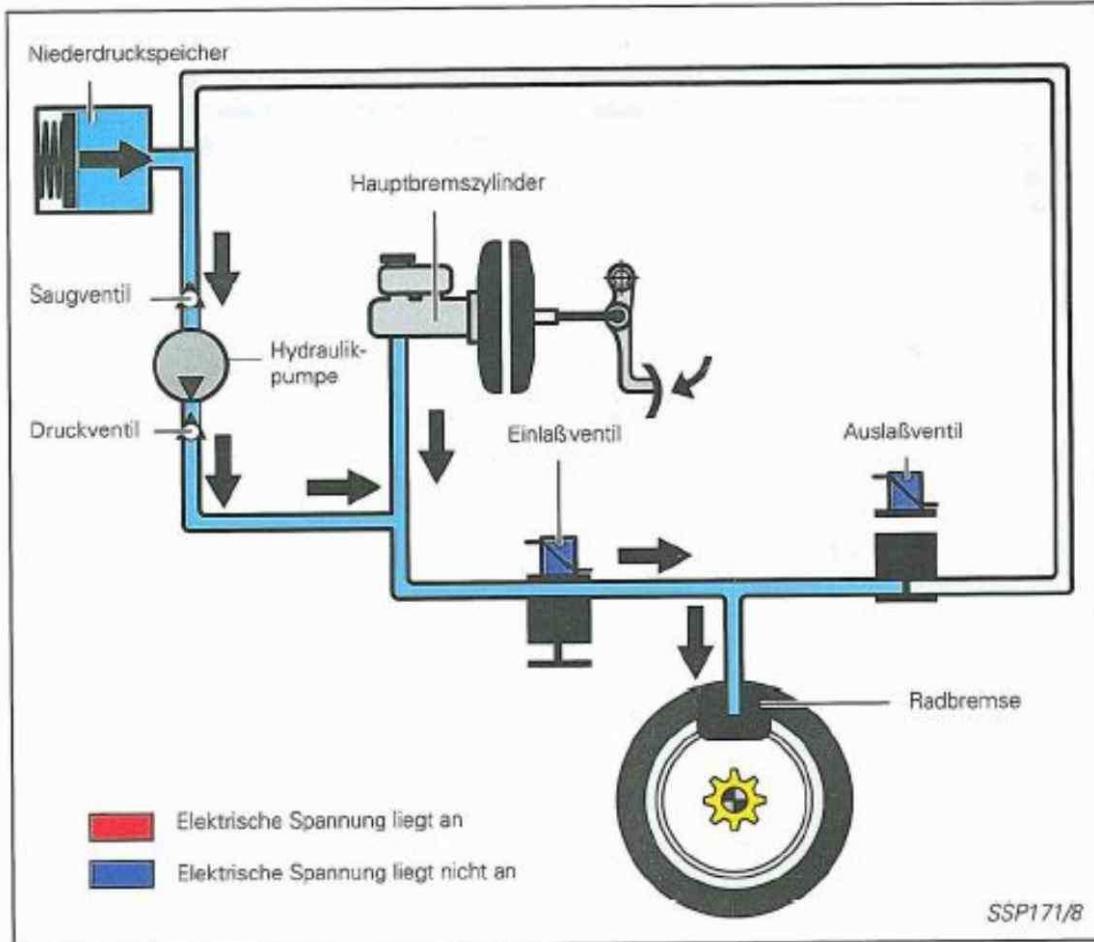


Abbildung 8.3: haptische Lenkeinheit (www.kfz-elektronic.de)

8.2.2 Brake-by-Wire

Hydraulische Bremse mit ABS

Auch bei den Bremsystemen wird zuerst auf die konventionelle Technik eingegangen, um die technische Fortentwicklung besser nachvollziehen zu können. Die hydraulische Bremse gibt den Pedaldruck des Fahrers über den Hauptbremszylinder und die Bremsleitungen weiter an die Radbremse. Das ABS-System bestehend aus elektromagnetischen Ein- und Auslassventilen, einer Rückführleitung, einem Druckspeicher und einer Rückführpumpe, ermöglicht zusätzlich das Abbauen bzw. Halten des Bremsdruckes. Dazu werden die elektromechanischen Ventile entsprechend angesteuert. Die Rückführpumpe und der Druckspeicher dienen dazu, die zum Druckabbau über das Auslassventil abgelassene Bremsflüssigkeit in den Bremskreislauf zurückzuführen. Erstmals kann ein Fahrassistenzsystem in den Bremsvorgang eingreifen. Wie bereits erwähnt, ist es der Fahrassistenz aber nur möglich, Bremsdruck abzubauen oder zu halten. Die Fahrassistenz selbst kann jedoch keinen Bremsdruck aufbauen. Die Funktionsvielfalt ist also auf die Anti-Blockier-Regelung begrenzt. Allerdings ist das System unschlagbar in der Zuverlässigkeit, da schon Millionenfach verbaut.

Abbildung 8.4: Schema einer Bremse mit ABS (www.kfztech.de)

Bremssystem mit ABS/ASR/ESP

Dieses Bremssystem kann nun einzelne Räder aktiv abbremsen. Dadurch kann das Durchdrehen eines Antriebsrades verhindert werden, meist Anti-Schlupf-Regelung oder kurz ASR genannt. Weiterhin ist es möglich in kritischen Fahrsituationen das Fahrzeug über Bremseingriffe zu stabilisieren, unter anderem Anti-Schleuder-Hilfe, Elektronisches-Stabilitäts-Programm, ESP etc genannt. Da dazu ein aktiver Bremsdruckaufbau durch das Assistenzsystem nötig ist, wird das obige ABS-System um eine zusätzliche Pumpenmotoreinheit erweitert. Die Ansteuerung der Bremse erfolgt nach wie vor über elektromagnetische Ventile. Die Leistungsfähigkeit des Systems ist darauf beschränkt, einzelne Räder für die ASR oder ESP Funktion abzubremsen. Jedoch handelt es sich um das erste Brake-by-Wire das im PKW Bereich verbaut worden ist. Vorteilhaft an dieser Technik ist, dass es leicht in die vorhanden Bremssysteme integrierbar ist. Leider ist die Leistungsfähigkeit des Systems eher gering, so dass nur wenige Assistenzfunktionen verwirklichbar sind. Momentan wird dieses Bremssystem standardmäßig in Neu-PKW verbaut.

EHS-Bremse

Mit der elektrohydraulischen Bremse wird erstmals erreicht, dass Bedieneinheit (Bremspedal) und Bremse mechanisch und hydraulische vollständig voneinander getrennt sind. Als Aktor dient eine aufwendige Hydraulik die über elektromagnetische Ventile und Hydraulikblenden geregelt wird. Der Bremsdruck wird zentral über eine leistungsfähige Pumpe mit Druckspeicher andauern zur Verfügung gestellt. Am Bremspedal befindet sich eine haptische Einheit, die dem Fahrer den Bremsdruck simuliert. Mit der EHS-Bremse sind außer der ABS-, ASR-, und ESP-Funktion noch viele weitere Assistenzfunktionen möglich. So kann die Bremskraft auf die vier Räder optimal verteilt werden. Beispielsweise verzögern die Räder an der Kurvenaußenseite stärker als die an der Kurveninnenseite. Die Bremskraftverteilung kann also dynamisch dem jeweiligen Fahrzustand für jedes Rad einzeln angepasst werden. Nimmt bei einer Gefahrensituation der Fahrer ruckartig Gas weg, kann schon jetzt, also bevor der Fahrer das Bremspedal tritt, Bremsdruck aufgebaut werden, um den Anhalteweg zu verkürzen. Bei Berganfahrten kann die Assistenz das Zurückrollen des Fahrzeugs verhindern, gleiches gilt im Stop-And-Go-Verkehr. Dies stellt nur einen Ausschnitt der Funktionen dar, die damit verwirklicht werden können. Gerade weil sehr viele Assistenzfunktionen zur Verfügung stehen, wird die aktive Sicherheit und der Komfort des Fahrzeuges erheblich verbessert. Ebenso durch die mechanische Trennung von Pedal und Bremse steigt in gewissen Maße die passive Sicherheit und auch der Komfort, da Vibrationen u.ä. nicht mehr übertragen werden. Für den Autobauer erleichtert sich die Platzierung des Systems, da der hydraulische Aktor nicht in Verbindung mit der Pedalarie stehen muß. Das Gesamtsystem, man denke an die haptische Einheit und die leistungsfähige Hydraulikpumpe, ist aber sehr aufwendig. Zusätzlich wird momentan noch eine mechanische Notverbindung verbaut, was den Aufwand zusätzlich erhöht. In der aktuellen Entwicklung des Automobilbau ist die EHS-Bremse, auch Sensotronic-Brake-Control (SBC) genannt, das High-End Produkt bei den Bremsanlagen.

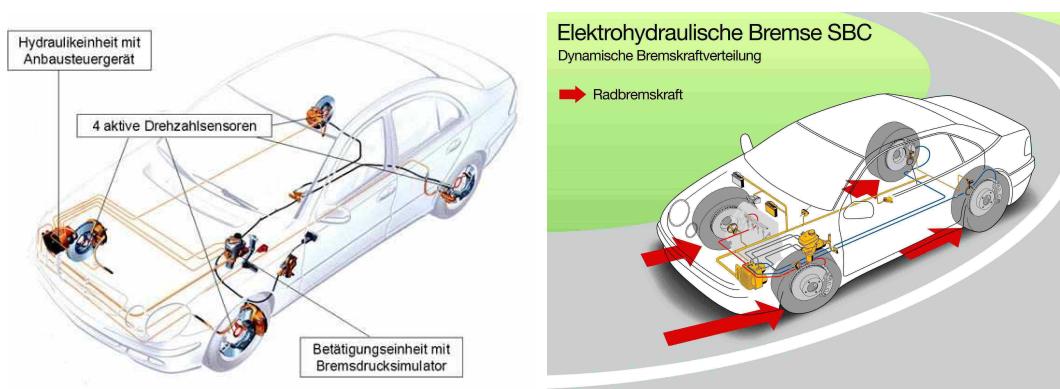


Abbildung 8.5: EHS-Bremse und dynamische Bremskraftverteilung (www.bosch.de)

EMS-Bremse

Bei der elektromechanischen Bremse wird nun auf jegliche Hydraulik verzichtet, stattdessen bauen elektrische Motoren am den Bremssättel die Bremskraft auf. Dies bringt Vorteile in Bezug auf Gewicht und Bauraum mit sich, da Leitungen und Bremsflüssigkeit, sowie Pumpen entfallen. Alle Assistenzfunktionen die bei der EHS-Bremse möglich sind, können auch hier verwirklicht werden. Besonderes Augenmerk gilt bei der EMS-Bremse der guten Regelbarkeit. Dadurch läßt sich auch ein kontinuierlich arbeitendes Anti-Blockier-System integrieren, das ohne das bekannte stottern agiert. Auch das Verhalten anderer Assistenzfunktionen, vor allem aber die der dynamischen Bremskraftverteilung, kann dadurch verbessert werden. Durch die sanft arbeitende Regelung und durch die mechanische Entkopplung steigt auch der Komfort in besonderem Maße. Vor- und Nachteile ergeben sich bei der Ausfallsicherheit. Einerseits ist mit dieser Bremse der Ausfall einer Radbremse nicht so schlimm, weil wirklich nur diese Radbremse ausfällt, und nicht wie bei einer üblichen Zweikreishydraulik, bei der bauartbedingt immer zwei Bremsen zusammen ausfallen müssen. Andererseits ist wie bei allen X-by-Wire-Systemen der Aufwand für ein redundantes Bordnetz mit großem Aufwand und Kosten verbunden. Außerdem muß eine haptische Pedaleinheit installiert werden. Da Elektromotoren an den Bremssätteln als Aktoren verbaut werden, steigen auch die ungefederten Massen am Fahrzeug. Dies beeinflusst Komfort und Verschleiß negativ. Jedoch steht die Entwicklung dieses Systems erst am Anfang, so daß noch Verbesserungen zu erwarten sind.



Abbildung 8.6: EMS Bremssättel von Bosch und Brembo (www.bosch.de, www.kfz-tech.de)

8.2.3 Throttle-by-Wire

Benzinmotor

Damit der Abgaskatalysator optimal arbeiten kann, soll der Benzinmotor so verbrennen, daß im Abgas kein unverbrannter Sauerstoff mehr zurückbleibt. Vor allem deshalb wird bereits in heutigen Benzinmotoren die Einspritzung elektronisch geregelt. Zudem kommt der Wunsch nach Leistungs- und Verbrauchsoptimierung im PKW, so daß in jüngeren

Modellen nicht nur die Einspritzung sondern auch die Luftzufuhr elektronisch geregelt wird. Dies geschieht entweder über eine elektrische Drosselklappe, die eine herkömmliche über Seil betätigten Klappe ersetzt, oder in neuesten Modellen über variablen Ventilhub. Beim variablen Ventilhub, oft Valvetronic genannt, kann über einen Exzenter der maximale Ventilhub variiert werden und so der Lufteinlaß geregelt werden. Der Exzenter wiederum wird über einen Elektromotor betätigt.



Abbildung 8.7: el. Drosselklappe, el. Einspritzventil (beide www.kfz-tech.de), Valvetronic (kfztech.de)

Dieselmotor

Moderne Dieselmotoren verfügen über eine Direkteinspritzung. Die Injektoren, welche den einzuspritzenden Kraftstoff dosieren, werden entweder elektromagnetisch oder über Piezoaktoren betätigt. Anders als beim Benziner erfolgt die Verbrennung mit Sauerstoffüberschuss, so keine Regelung der Luftzufuhr nötig ist. Stattdessen wird die nötige Kraftstoffmenge über ein Kennfeld bestimmt. Das Kennfeld zeigt in Abhängigkeit von Drehzahl und Luftmasse die nötige Kraftstoffmenge. Es sind überdies auch noch höherdimensionale Kennfelder mit weiteren Abhängigkeiten möglich. Die Optimierung von Leistung, Verbrauch oder anderer Eigenschaften des Dieselmotors erfolgt über das Kennfeld. Bei allen Diesel-Modellen mit Direkteinspritzung ist diese Throttle-by-Wire-Technik bereits im Einsatz.

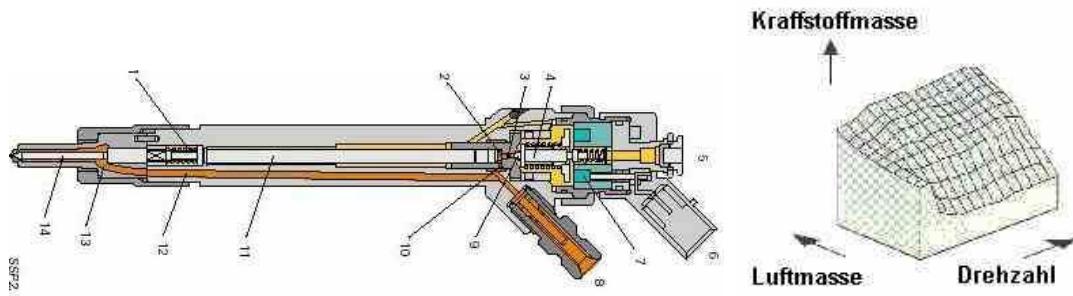


Abbildung 8.8: Dieselinjektor & Kennfeld (www.kfztech.de)

Für den Motorenbereich kann man also die Aussage treffen, daß X-by-Wire-System bereits heute absoluter Standart sind.

8.2.4 Gear/Shift-by-Wire

Automatikgetriebe

In Getriebeautomaten müssen zum Fahrstufenwechsel verschiedenen Lamellenkupplungen bzw. Bandbremsen im inneren des Gehäuses geschlossen oder geöffnet werden. Zum Schließen einer Lamellenkupplung wird über eine Hydraulik ein Lamellenpaket zusammengepresst. Diese Hydraulik wird heutzutage über eine elektronisch über elektromagnetische Ventile angesteuert. Wegen der elektronischen Ansteuerung, ist ein komfortableres Schalten und ein lernendes Verhalten des Getriebes möglich. So kann zum Zeitpunkt des Schaltvorganges am Motor kurzzeitig Gas weggenommen werden, was einerseits den Komfort erhöht, andererseits den aber auch die mechanische Belastung des Antriebstranges vermindert. Durch das lernende Verhalten, passt sich das Getriebe dem Fahrstil des Fahrers oder auch den Fahrumständen, wie Bergauffahrt oder Anhängerbetrieb an. Ebenso können vorprogrammierte Schaltverhalten, wie z.B. sportlich, kraftstoffsparend oder komfortabel dem Fahrer zur Auswahl gestellt werden. Vergleicht man moderne Getriebeautomaten mit älteren, welche über hydraulische Druckventile gesteuert worden sind, zeigt sich, daß erst die X-by-Wire-Technologie diese Getriebe optimal arbeiten läßt.

CVT

Bei CVT-Getrieben ist es möglich die Übersetzung stufenlos zu verändern. Das verändern der Übersetzung erfolgt auch hier elektrohydraulisch. Im Gegensatz zu anderen Getrieben wo der Motor innerhalb einer Fahrstufe ein bestimmtes Drehzahlband durchfährt, ermöglichen stufenlose Getriebe dem Motor, daß er im momentan besten Drehzahlbereich arbeitet. Also beispielsweise bei konstant niedriger Drehzahl für sparsames Fahren oder bei konstanter hoher Drehzahl mit maximaler Motorleistung für Beschleunigungsvorgänge. Dafür steigt die Stellaktivität des Getriebes. Um diese Stellarbeit auf den Motor abzustimmen können ist eine Kommunikation von Motor und Getriebe unerlässlich. Die Ansteuerung erfolgt deshalb by-Wire, so daß diese Zusammenarbeit optimal funktioniert und der Fahrer wie gewohnt mit dem Gaspedal seinen Fahrwunsch vorgeben kann. Es ist ersichtlich, daß X-by-Wire den Einsatz von stufenlosen CVT Getrieben erst möglich macht.

Automatisiertes Schaltgetriebe

Es ist schließlich auch möglich, ein herkömmliches Klauenschaltgetriebe zu automatisieren. Dazu übernehmen elektrische Aktoren die Schaltarbeit, die sonst der Fahrer auszuführen hat. Statt des Ganghebels arbeiten zwei Aktoren, von denen der eine die Schaltgasse, der andere den Gang wählt. Zudem wird die Kupplungsarbeit auch von einem elektrischen Aktor übernommen. Probleme mit der schwierigen Regelung der Trockenkupplung verzögerten anfangs die Realisierung. Das Zusammenspiel von Kupplung und

Gangwahl wird von einer Elektronik übernommen, so daß der Fahrer, wie bei Getriebeautomaten nur noch den Geschwindigkeitswunsch über das Gaspedal vorgibt oder über z.B. Schaltwippen bequem selber schaltet. Mit dieser X-by-Wire Technik kann man den guten Wirkungsgrad des normalen Schaltgetriebes mit dem Komfort eines Automaten verbinden. Dieses System ist bereits in Serie erhältlich.

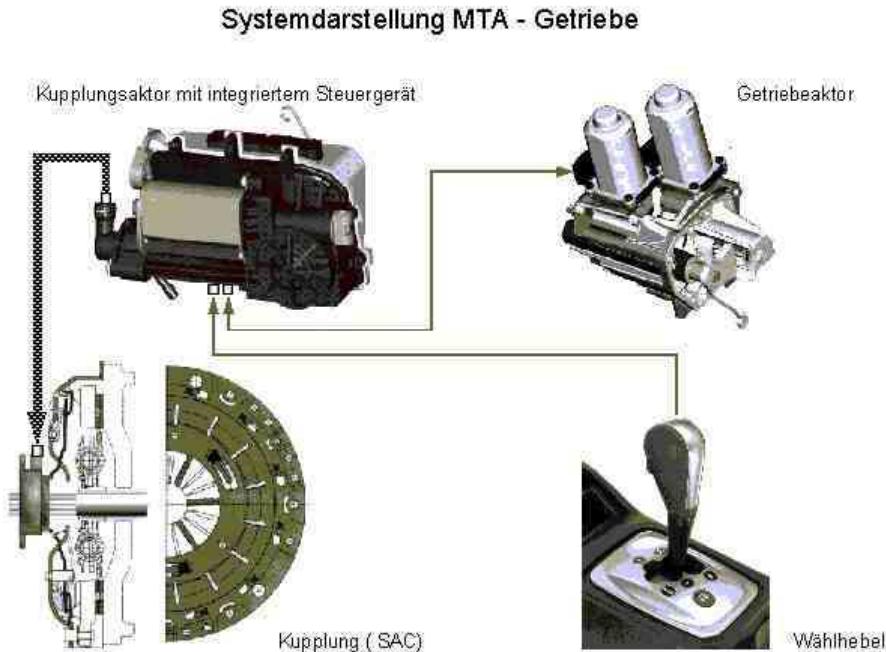


Abbildung 8.9: automatisiertes Schaltgetriebe MTA (www.kfztech.de)

Sportgetriebe

Da sich auch sportliche Bauformen immer größer Beliebtheit bei Straßenfahrzeugen erfreuen, soll auch darauf kurz eingegangen werden. Dazu zählen sequentielle Getriebe und das Doppelkupplungsgetriebe. Bei den sequentiellen Getrieben wird mittels Elektrohydraulik in kürzester Zeit der Gangwechsel vollzogen, weshalb eine by-Wire Ansteuerung zwingend ist. Doppelkupplungsgetriebe können bauartbedingt ohne Zugkraftunterbrechung schalten und wegen der komplizierten Vorgänge im Getriebe ist ein X-by-Wire-System auch hier unverzichtbar.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß Getriebeautomaten, stufenlose Getriebe und Sportgetriebe von der X-By-Wire-Technik beherrscht werden. Optional können auch herkömmliche Schaltgetriebe automatisiert werden.

8.3 Drive-by-Wire

Die Kommunikation und das Zusammenspiel mehrerer X-by-Wire-Komponenten im Fahrzeug wird als Drive-by-Wire bezeichnet. Im folgenden wird darauf eingegangen wo und wieso bereits heute Drive-by-Wire im Einsatz ist, und welche Anforderungen an zukünftige Drive-by-Wire-Technologien gestellt werden.

8.3.1 Heute

In PKW, wie sie heute gebaut werden, arbeiten die nur wenige X-by-Wire-Systeme wie Motor, Getriebe oder ESP zusammen. Als gemeinsame Datenleitung dient der CAN-Bus, als Kontrollsysteem dient die Electronic Controll Unit (ECU). Dieses System hat jedoch keine Sicherheits- oder Notfunktionen in Bezug auf Ausfall. Deshalb können momentan auch nur Drive-by-Wire Systeme verbaut werden, die bei Ausfall nicht zur Unkontrollierbarkeit des Fahrzeuges führen oder über eine mechanische Abstützfunktion verfügen. Als Beispiel führt ein Motorausfall nur zum Stillstand des Fahrzeuges oder die EHS Bremse nutzt eine mechanische Notfunktion bei Ausfall.

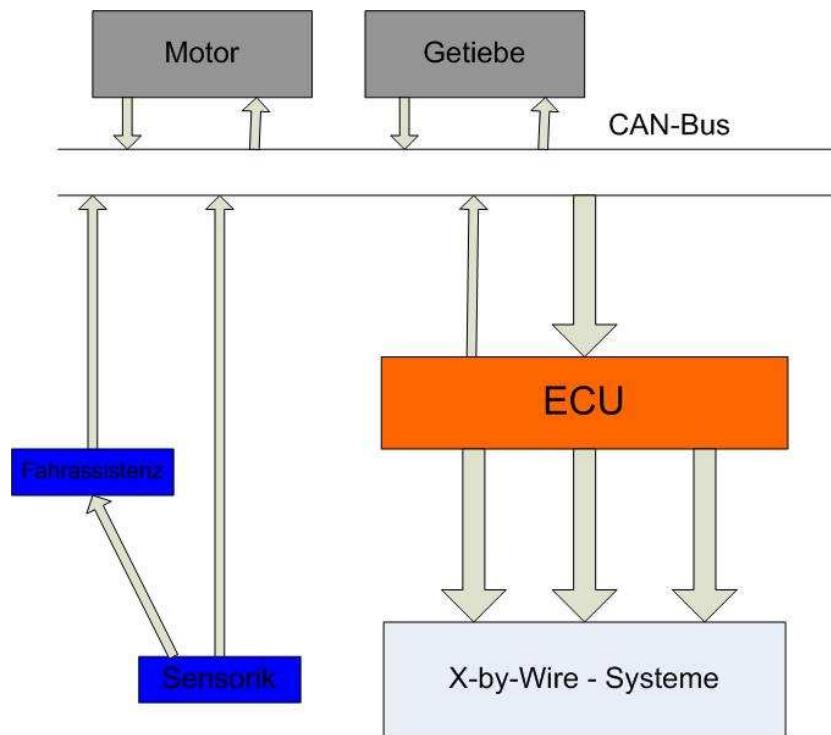


Abbildung 8.10: Schema eines heutigen Drive-by-Wire

8.3.2 Zukunft von Drive-by-Wire-Systemen

In Zukunft sollen aber auch sicherheitsrelevante Funktionen by-Wire ausgeführt werden. Dadurch ergeben sich völlig neue Problemstellungen und Anforderungen für ein Drive-by-Wire-Konzept. So muß ein hochverfügbares Rechnersystem zur Verfügung gestellt werden, um einen Ausfall der zentralen Recheneinheit ausschließen zu können. Dies wird nur über redundante Rechnersysteme und redundante Stromversorgung erreichbar sein. Ebenfalls soll ein Übersteuerbarkeit durch den Menschen gewährleistet sein. Die Sensorik muß Fehlertolerant ausgelegt sein, daß Fehler erkannt und ausgefiltert werden. Zudem müssen die Prioritäten sicher verteilt werden, um den Betrieb der wichtigsten Systeme auf jeden Fall aufrecht zu erhalten.

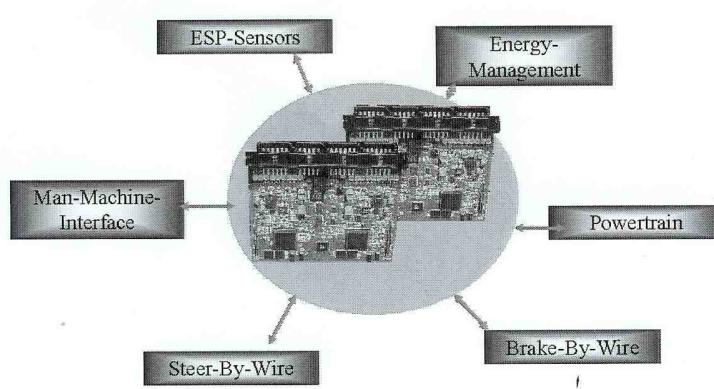


Abbildung 8.11: Drive-by-Wire-Schema (ILS, Universität Stuttgart)

Durch die steigende Anzahl an System ergibt sich das Paradoxon, daß bei steigender Komplexität eine größere Betriebsicherheit erreicht werden soll. Als Folge dessen, erhöht sich der Aufwand für die Ausfallsicherheit. Erst wenn die Relation von Aufwand zu Nutzen stimmt, werden sich diese komplizierteren Systeme durchsetzen können.

8.4 Entwicklung und Zukunft

Abschließend kann man feststellen, daß in mehreren Bereichen des Automobilbaus die X-by-Wire-Technik bereits etabliert ist. Dazu zählen der Motor- und Getriebebau, wo bereits reines by-Wire vorherrscht. Das ESP und ASR stellen den Anfang der Brake-by-Wire-Technik dar. Die EHS Bremse mit mechanischer Notfunktion und die Aktivlenkung auf mechanischer Basis, sind die ersten wirklichen by-Wire Systeme in sicherheitsrelevanten Funktionen.

Die vergangene Entwicklung von klassischen mechanischen und hydraulischen Systemen zu EHS oder überlagerten Systemen, auch bei elementaren Funktionen wie Lenken und

Bremsen, deuten die zukünftige Entwicklung an. Es werden langfristig reine X-by-Wire-Systeme, und auch elektromechanische Systeme (EMS) im Automobilbau eingeführt. Dadurch ergeben sich auch weitreichende Änderungen. Die Komplexität der Systeme nimmt stark zu. Hoher Aufwand muß für Ausfallsicherheit erbracht werden, was beispielsweise ein doppeltes Bordnetz und redundante Einzelsysteme mit sich bringt. Schließlich werden auch mehr Fahrassistenzfunktionen zur Verfügung stehen.

Reine X-by-Wire-Systeme und moderne Drive-by-Wire-Konzepte werden nicht schlagartig eingeführt, sondern schrittweise nach und nach Einzug erhalten. Dies lässt sich auch aus der vergangenen Entwicklung ableiten.

Literaturverzeichnis

- www.bosch.de
- www.zf.com
- www.bmw-group.de
- Prof. Dr.-Ing. B. Heißing: „Grundlagen des Kraftfahrzeugbaus“, TU München
- www.kfz-tech.de
- www.kfztech.de
- www.kfz-elektronik.de
- Auto&Elektronik, Ausgabe 1/2000
- Institut für Luftfahrtssysteme, Universität Stuttgart: Einsatz von Fly-by-Wire-Technologie zum Aufbau eines X-by-Wire HGV- Demonstrators, Aktive Sicherheit durch Fahras-sistenz 2004

Kapitel 9

Fahreroptimierte Mensch-Maschine-Schnittstelle

Über den Autor

Johannes M. Speth studiert zur Zeit im 8. Semester Elektro- und Informationstechnik an der TU München.

9.1 Einleitung

Die rasante Entwicklung in allen technischen Gebieten bietet immer mehr Möglichkeiten das Leben in vielen Lebensbereichen komfortabler und vielseitiger zu gestalten. Vor allem im Automobilbau hat die Technik mit großen Schritten Einzug erhalten. Das Fahrzeug ist längst nicht mehr lediglich ein Fortbewegungsmittel, sondern vereint daneben mittlerweile für viele auch Entertainmentsystem und (Büro-)Arbeitsplatz miteinander. Da das Fahren an sich, durch das stetig wachsende Verkehrsaufkommen auch immer anspruchsvoller und dadurch auch gefährlicher wird, kommen zusätzlich immer mehr so genannte Fahrerassistenzsysteme zum Einsatz, die den Fahrer beim Fahren unterstützen sollen.

Da diese neuen Systeme im Fahrzeug vom Fahrer bedient werden müssen und die meisten auch eine Rückmeldung an den Fahrer liefern, bergen sie eine potentielle Ablenkung des Fahrers und somit auch neue Gefahren in sich. Deshalb ist es wichtig beim Entwickeln dieser Systeme stark darauf zu achten, dass die Mensch-Maschine-Schnittstelle(MMS) so an den Fahrer angepasst ist, dass das System den Fahrer möglichst wenig ablenkt. In dieser Arbeit werden allgemeine und spezielle Ansätze bei der Entwicklung einer MMS anhand von Beispielen im Fahrzeug vorgestellt, die den Fahrer beim Benutzen des Systems während des Fahrens möglichst stark entlasten und somit für den Fahrer optimiert sind.

9.2 Die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)

Um beurteilen zu können was eine fahreroptimierte Schnittstelle ist, wird in diesem Kapitel zunächst die MMS allgemein definiert. Anschließend wird auf die verschiedenen Arten der MMS eingegangen, wobei Vor- und Nachteile herausgehoben werden.

9.2.1 Was ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle?

Wie in Bild 9.1 zu sehen ist, besteht ein Mensch-Maschine-System aus den drei Komponenten: Mensch, Maschine und Umwelt. Das Zusammenwirken von Mensch und Maschine muss dabei folgende Kriterien erfüllen [Wan]:

- Information muss wechselseitig ausgetauscht werden
- Informationsaustausch erfolgt vermittelt (Sensoren, Anzeigen, Schalter,...)
- Mensch verfolgt bestimmte Ziele

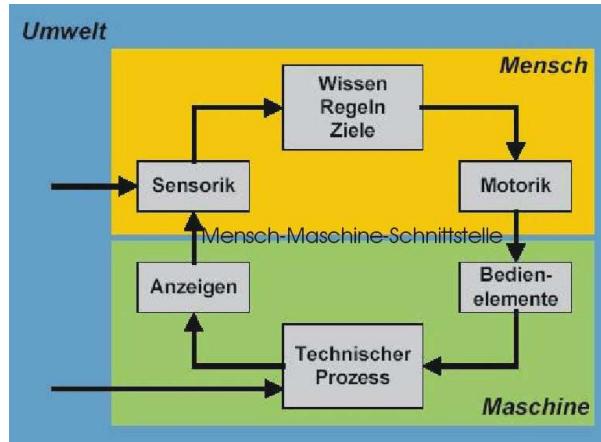


Abbildung 9.1: Mensch-Maschine-System

Der Informationsfluss läuft einerseits von der Motorik des Menschen zu den Bedienelementen der Maschine um die Maschine zu bedienen. Andererseits liefert die Maschine auch Information zurück. Dieser Informationsfluss findet zwischen den Anzeigen der Maschine und der Sensorik des Menschen statt. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle ist die Schnittebene zwischen der Motorik und Sensorik des Menschen und den Bedienelementen und Anzeigen der Maschine.

9.2.2 Modalitäten der MMS

Da der Mensch die Möglichkeit hat Informationen über verschiedene Kanäle aufzunehmen oder wiederzugeben, gibt es verschiedene Arten von Schnittstellen, die an diese Modalitäten des Menschen angepasst sind. Prinzipiell sind fünf Arten einer Mensch-Maschine-Schnittstelle denkbar:

- **Auditive Schnittstelle**

Maschine: Spracherkennungssysteme, Sprachausgabe, nonverbale akustische Anzeigen
 Mensch: „reden“ und „hören“

Vorteile:

- + Mensch kann Hände am Steuer lassen
- + keine visuelle Belastung
- + natürliche Kommunikationsform des Menschen

Nachteile:

- sehr komplex umzusetzen (bisher nur stark eingeschränkt verfügbar)

- **Visuelle Schnittstelle**

Maschine: Kamerasysteme & Software, Graphische Anzeigen

Mensch: „sehen“

Vorteile:

- + hohe Informationsbandbreite

Nachteile:

- Ablenkung des Fahrers
- hohe Rechenleistung auf Maschinenseite

- **Taktile Schnittstelle**

Maschine: Schalter, aktive Bedienelemente

Mensch: „fühlen“

Vorteile:

- +Mensch kann Information nicht „übersehen“
- +schnelle Reaktionszeiten des Fahrers

Nachteile:

- unnatürliche Kommunikationsform
- geringe Bandbreite

- **Olfaktorische Schnittstelle**

Geruchssinn

- **Gustatorische Schnittstelle**

Geschmackssinn

Da die letzten beiden zu wenig Bandbreite für die Informationsübertragung bereitstellen, gibt es für diese theoretischen Schnittstellenmodelle bisher keine technische Realisierung. Wenn man bedenkt, dass das Autofahren zu 90% eine visuelle Belastung für den Menschen darstellt [Nie02], ist es nur sinnvoll nach Möglichkeiten zu suchen, um den visuellen Informationskanal möglichst stark zu entlasten. Zusätzlich liegt es in der Natur des Menschen mehrere Modalitäten parallel zu nutzen. Das bedeutet das gleichzeitige Nutzen von optischer, akustischer und haptischer Information. Deshalb geht man neuerdings verstärkt dazu über, den akustischen und haptischen Kanal besser in die Mensch-Maschine-Interaktion zu integrieren, was zu sogenannten „multimodalen“ Schnittstellen führt.

9.3 Entwicklung einer MMS

Wie in der Einleitung erwähnt wurde, ist der rasante technische Fortschritt dafür Verantwortlich, dass immer mehr Funktionen im Fahrzeug Einzug erhalten. Entertainmentsysteme (CD, MP3, Radio,...), Informationssysteme(Navigation, Internetportal) und Fahrrerassistenzsysteme(ABS, ACC, HC, ...) sind aus modernen Autos nicht mehr weg zu denken.

Im Jahr 2001 hat die Anzahl der Funktionen, die der Fahrer während der Fahrt bedienen konnte, im Schnitt 350 betragen (Abbildung 9.2 oben). Wie man in der unteren Grafik sehen kann, hatte die Anzahl der Funktionen einen starken Einfluss auf die Anzahl der Bedienelemente und Anzeigen im Fahrzeug. So waren im Jahr 2001 im Schnitt 140 Bedienelemente im Cockpit angebracht. Dieser Wert stellt durch das begrenzte Platzangebot in gewisser Weise einen oberen Grenzwert dar. Führt man sich nun vor Augen, dass die Anzahl der Funktionen im neuen 7er BMW durch deren Internetportal und andere neu-

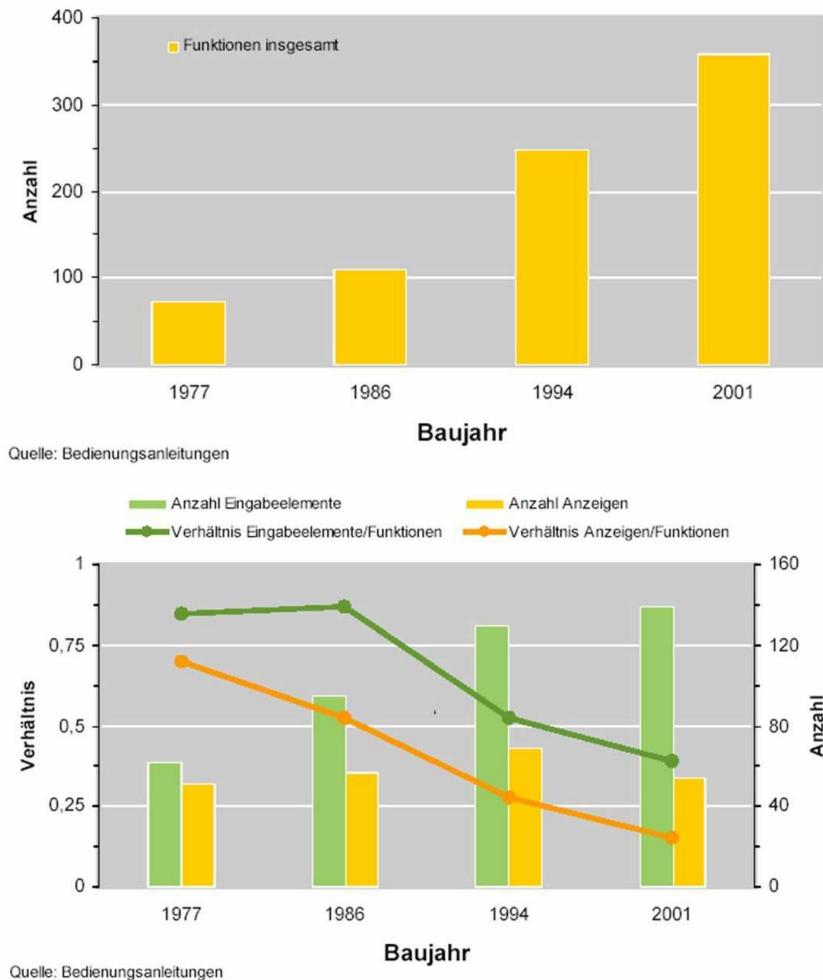


Abbildung 9.2: Anzahl der Funktionen, Bedienelemente und Anzeigen in Oberklassefahrzeugen [Nie02]

artige Anwendungen bereits 700 erreicht hat, scheint es logisch, dass es notwendig wurde, ein neues Schnittstellenkonzept zu entwickeln.

Was ist nun aber wichtig für den Entwickler? Welche Ziele sollte er bei der Entwicklung einer MMS verfolgen und welche Aufgaben muss er erledigen, um diese Ziele zu erreichen?

- Diese Fragen werden im folgenden Abschnitt beantwortet.

9.3.1 Ziele der Entwickler

Als Entwickler einer Schnittstelle zur Kommunikation mit einem System muss man sich stets dessen bewusst sein, dass die Schnittstelle das Einzige sein wird, was der Benutzer vom System zu sehen bekommt. Das Design und die Benutzbarkeit des Systems liegen ganz allein in den Händen der Schnittstellenentwickler. Das Design ist als „First-Buy-Kriterium“ von großer Bedeutung, da die meisten Kunden ein Produkt beim ersten Kauf

hauptsächlich nach dem Äusseren beurteilen. Als sogenanntes „Second-Buy-Kriterium“ spielt dann noch die Benutzbarkeit eine große Rolle: Stellen die Käufer beim Benutzen des Systems fest, dass es sich nicht leicht bedienen lässt, werden sie das System (hier gesamtes Fahrzeug!) nicht weiter empfehlen und beim nächsten Kauf selbst ein Konkurrenzprodukt wählen.

Um die wichtigsten First- und Second-Buy-Kriterien eines Systems im Fahrzeug zu erfüllen, sind folgende Punkte zu beachten [SH04], [Sch02]:

- **Ansprechendes, attraktives Design:**

Wie schon erwähnt ist das das Haupt-First-Buy-Kriterium.

- **Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe:**

Die Bedienung darf den Fahrer während dem Fahren nicht ablenken. Die meisten Unfälle resultieren heute durch Ablenkung

- **Intuitive Benutzbarkeit:**

Jedes System sollte vom Benutzer ohne Handbuch bedient werden können.

- **Übersichtlichkeit:**

Die Anzahl an Bedien- und Anzeigeelementen soll überschaubar bleiben.

- **Entlastung durch System:**

Die Bedienung des Systems soll keine zusätzliche Belastung für den Fahrer darstellen.

- **Benutzung soll Spaß machen:**

Der Benutzer muss das System gerne bedienen wollen

Natürlich müssen alle allgemeinen ergonomischen Prinzipien, wie Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit oder Steuerbarkeit, auch hier eingehalten werden. Doch speziell im Fahrzeug kommen den oben herausgehobenen Punkten eine sehr starke Bedeutung zu.

Werden all diese Ziele vom Entwickler erreicht, hat man mit großer Wahrscheinlichkeit ein „sicheres, effizientes, benutzerfreundliches, beanspruchungsoptimales und gut akzeptiertes Mensch-Maschine-System“ [Wan] entwickelt.

9.3.2 Aufgaben der Entwickler

Um diese Ziele zu verwirklichen, gibt es für den Entwickler zwei große Aufgabengebiete: die Funktionsverteilung und die Mensch-Maschine-Kommunikation.

Funktionsverteilung

Bei der Funktionsverteilung geht es darum, festzulegen welche Aufgaben vom System und welche vom Benutzer übernommen werden sollen. Dieses Problem stellt vor allem Psychologen vor eine schwere Aufgabe. Überträgt man zu viele Funktionen auf das System,

so hat der Mensch nur noch eine überwachende Funktion und ist womöglich unterfordert. Diese Unterforderung kann in Ausnahmesituationen in eine Überforderung umschlagen [Wan]. Überlässt man jedoch zu viele Entscheidungen dem Fahrer wird das System vielleicht zu einer zusätzlichen Belastung und wird vom Fahrer als störend empfunden, was sich in schlechteren Fahrleistungen widerspiegelt.

Dazu wurden umfassende Untersuchungen gemacht. Ein Forschungsprojekt, genannt EM-PHASIS (**E**ffort **M**anagement und **P**erformance-**H**andling in **s**icherheitsrelevanten **S**ituationen) hat über drei Jahre mit 120 Fahrern Versuche mit den Fahrerassistenzsystemen ACC (Adaptive Cruise Control) und HC (Heading Control) durchgeführt. Folgende Ergebnisse, die Funktionsverteilung betreffend, wurden erzielt[DSB02]:

1. Die Reaktionszeit hängt vom Automatisierungsgrad ab:

Es wurde festgestellt, dass der Mensch beim Übergang vom Überwachen eines Systems zum selbständig Kontrollieren des Systems (Monitoring/Controlling) eine gewisse Zeit benötigt, die die Reaktionszeit verlängert. Bei hoher Automatisierung verlängert sich die durchschnittliche Reaktionszeit von 480ms um 120ms (25%).

2. Systemaktionen werden erst spät korrigiert:

Der Benutzer verlassen sich so auf das System, dass sie gefährlichere Situationen zulassen, ohne Einzugreifen, als sie bei manueller Steuerung auftreten würden

3. Längs- und Querführung sind für Menschen untrennbar:

Die Unterstützung durch ACC wirkt sich negativ auf das Spurhaltevermögen des Menschen aus. ACC sollte durch HC unterstützt werden.

Dieser kleine Ausschnitt des Untersuchungsprojektes soll zeigen, dass die Entwickler sehr viele Details beachten müssen, um ein System vor allem sicher für den Fahrer zu gestalten. Da derartige Probleme auch bei anderen Systemen im Fahrzeug zu erwarten sind, kann man sich die Komplexität der Aufgabe, das Gesamtsystem „Auto“ mit einer optimalen MMS auszustatten, kaum vorstellen.

Mensch-Maschine-Kommunikation

Die Mensch-Maschine-Kommunikation ist das zweite Gebiet, das für die Benutzbarkeit eines Mensch-Maschine-Systems von großer Bedeutung ist. Dabei geht es um die Form des Informationsaustausches zwischen Mensch und Maschine. Die Mensch-Maschine-Kommunikation ist in verschiedene Ebenen unterteilt[Wan]:

- **Aufgabenebene:**

Anpassung des Funktionsangebotes der Maschine an die Ziele des Menschen. Die Fachbegriffe Effektivität (Welche Ziele kann ich erreichen?) und Effizienz (Wie kann ich meine Ziele erreichen?) spielen hierbei eine Rolle. Problem ist, dass die Komplexität des Systems mit der Anzahl der erreichbaren Ziele steigt. Da die Komplexität jedoch möglichst gering gehalten werden soll, muss in der Praxis oft ein Kompromiss geschlossen werden.

- **semantische Ebene:**

Anpassung der Datenstruktur und Algorithmen an die Gedächtnisstruktur und den Denkprozess des Menschen. Stimmt die Funktionsweise des Systems mit dem mentalen Modell des Benutzers überein, reduziert sich die Anzahl der Fehler bei der Benutzung.

- **syntaktische Ebene:**

Strukturierung von Anzeigen und Eigabeoperationen. Einheitlichkeit ist sehr wichtig! Der Mensch gewöhnt sich schnell an die Bedienung eines Systems, wenn diese konsistent aufgebaut ist. So kann er Informationen leichter interpretieren und diese werden auch weniger wahrscheinlich übersehen.

- **lexikalische Ebene (Kodierungsebene):**

externe Repräsentation der Information. Welche Modalität, welche Positionierung von Anzeigen und Bedienelementen, welche Dargestellungsform(analog/digital, Bild/Text,...) ist für den Informationsaustausch zu wählen?

- **alphabetische Ebene:**

Verfeinerung der Kodierung. Welche Skala, welcher Maßstab, welches Sinnbild wird verwendet?

All diese Punkte muss der Entwickler einer Mensch-Maschine-Schnittstelle beachten, um die oben erwähnten Ziele zu erfüllen. Dabei kommt es auch auf ein gutes Zusammenspiel zwischen Psychologen und Techniker an, um alle Möglichkeiten in betracht zu ziehen und die sinnvollen umzusetzen. Hinzu kommt noch, dass es sehr wichtig ist, das System mit der Schnittstelle im frühen Entwicklungsstadium in Usability-Laboren durch unabhängige potentielle Endkunden zu testen. Der Entwickler muss sich dessen bewusst sein, dass er selbst kein objektiver Beurteiler des Systems sein kann!

9.3.3 Bewertungsrichtlinien für die MMS

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten internationalen Normen und Grundsätze vorgestellt, die für die Bewertung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle von Bedeutung sind. Zum Einen gibt es Normen von der Internationalen Organisation für Standardisierung und zum Anderen gibt es einen europäischen Grundsatzkatalog zur Mensch-Maschine-Schnittstelle für on-board-Informations- und Kommunikationssysteme. Um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen, wird der Inhalt der Normen hier nur in Stichpunkten wiedergegeben.

ISO-Normen

| ISO 9241-10 | ISO 9241-11 | ISO 17287 |
|--|--|--|
| Aufgabenangemessenheit Selbstbeschreibungsfähigkeit Steuerbarkeit Erwartungskonformität Fehlerrobustheit Adaptivität Erlernbarkeit | Effektivität Effizienz Akzeptanz | Beeinträchtigung der Fahraufgabe Steuerbarkeit Effizienz Bedienungsfreundlichkeit / Erlernbarkeit |

Tabelle 9.1: ISO 9241-10/-11, ISO 17287

| ISO 15005 - ISO 15008 |
|----------------------------------|
| Dialogmanagement |
| Akustische Informationssysteme |
| Messung des Blickverhaltens |
| Visuelle Informationsdarstellung |

Tabelle 9.2: ISO 15005 - ISO 15008

Europäischer Grundsatzkatalog

| Gesamtdesign | Installation |
|---|--|
| System soll unterstützen nicht gefährden Bedienung vereinbar mit Fahraufgabe Keine Ablenkung / Unterhaltung | Sicht auf Straße nicht behindern Bedienung der Fahrzeugs nicht behindern Keine Spiegelungs- / Blendeffekte |

Tabelle 9.3: Gesamtdesign und Installation

| Darstellung der Information |
|---|
| Wenige kurze Blicke Normen für Lesbarkeit, Hörbarkeit, Ikone, Symbole Rechtzeitig und präzise Schallpegel regelbar |

Tabelle 9.4: Darstellung der Information

| Interaktion |
|---|
| Eine Hand am Steuer Keine nicht unterbrechbaren Interaktionsabfolgen Feedback klar verständlich |

Tabelle 9.5: Interaktion

| Systemverhalten |
|--|
| Irrelevante Information darf Fahrer nicht sehen (bewegte Bilder) |
| Information über Status immer bekannt |
| Bei Ausfall noch beherrschbar |

Tabelle 9.6: Systemverhalten

9.4 Umsetzung

Wie schon erwähnt wurde, war die Fahrzeugindustrie vor ein paar Jahren gezwungen neue Schnittstellen zu entwickeln. In diesem Kapitel möchte ich nun die Lösungen der führenden deutschen Automobilkonzerne herausgreifen, die heute in Oberklassefahrzeugen zum Einsatz kommen. Zum Einen wird versucht aus psychologischer Sicht das Cockpit für den Fahrer angenehmer und sicherer zu gestalten und zum Anderen kommen neue technische Ideen zum Einsatz, die den Umgang mit dem Fahrzeug vereinfachen und bessere Rückmeldungen an den Fahrer geben.

In der Praxis finden verschiedene Namen für diese neuartigen Gesamtkonzepte Verwendung. So hat BMW zum Beispiel diese Art einer fahrerfreundlichen Schnittstelle „iDrive“ (**intelligent Drive**) genannt. Bei Mercedes-Benz heißt es COMAND (**Cockpit Management** und **Data System**) und bei Audi MMI (**Multi Media Interface**). Es gibt noch unzählige weitere Bezeichnungen für diese Art der Mensch-Maschine-Schnittstelle, jedoch ist dabei immer so ziemlich das gleiche gemeint. Deshalb wird in dieser Arbeit im Weiteren das iDrive-System von BMW stellvertretend für alle anderen als Beispiel verwendet.

9.4.1 Moderne Ansätze

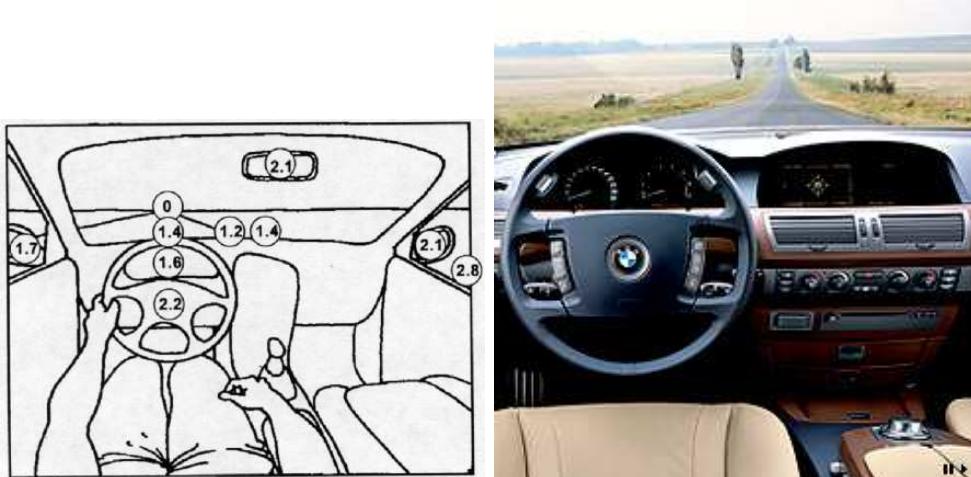


Abbildung 9.3: links: Displaypositionierung [Lam99]; rechts: Cockpit 7er BMW [BMW04]

Trennung von Bedienung und Anzeige

Ein neuer Ansatz ist die Trennung von Bedienung und Anzeige. In einer Untersuchung von Lamble et. al [Lam99] wurde herausgefunden, dass die Displaypositionierung einen erheblichen Einfluß auf die Blickdauer und -frequenz ins Fahrzeugginnere hat. Wie Bild 9.3 links zeigt, ist die Position des Displays rechts neben dem Lenkrad die Position, an der die Blickdauer des Fahrers am kürzesten verweilt. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass für den Fahrer die rechte Fahrbahnbegrenzung zum Halten der Spur sehr wichtig ist. Bei dieser Position kann der Fahrer im peripheren Gesichtsfeld den Fahrbahnrand, sowie den Verkehr vor sich im Auge behalten, was sich positiv auf die Spurhaltefähigkeiten, sowie auf die Reaktionszeit des Fahrers auswirkt. Die Greifdistanz zum Bedienelement ist ein weiteres Kriterium, das Einfluß auf die Ablenkung des Fahrers beim Bedienen hat. Ist der Bedienknopf nahe an der natürlichen Position der rechten Hand, muss der Fahrer nicht so lange schauen bis die Hand das Bedienelement erreicht hat. Deshalb bietet sich die Position auf der Mittelkonsole an. Will man nun beide Konzepte miteinander vereinen, lässt sich die Trennung von Anzeige und Bedienelement nicht mehr vermeiden. Bild 9.3 rechts zeigt, wie BMW dieses Konzept umgesetzt hat.

Trennung von Fahr- und Komfortzone

Um den Fahrer noch weniger abzulenken, wird verstärkt versucht neue Funktionen, die nichts mit der Fahraufgabe zu tun haben, während der Fahrt vom Fahrer fern zu halten. Man will eine klare Trennung von Fahr- und Komfortzone erreichen. Das heißt in unmittelbarer Nähe zum Fahrer sollen ausschließlich fahrrelevante Funktionen und Informationen zu finden sein. Natürlich lässt sich das nicht zu 100% umsetzen, weil es sich der Fahrer zum Beispiel nicht nehmen lassen wird, das Radio während der Fahrt bedienen zu können. Jedoch hat man auch hier eine Lösung gefunden, indem diese wichtigen sogenannten „Sekundärfunktionen“ vom Lenkrad aus blind bedient werden können und somit den Fahrer nur gering ablenken. Auch die Bedienung per Sprache wird in diesem Bereich schon vermehrt eingesetzt. Die Aufteilung in Fahr- und Komfortzone kann ebenfalls im rechten Bild von Abbildung 9.3 betrachtet werden.

An dieser Stelle sei kurz erwähnt, dass man leider von einer umfassenden Sprachbedienung noch weit entfernt ist. Derzeit kann ein 7er BMW 30 Sprachbefehle Sprecherunabhängig erkennen. Jedoch nur bei sehr klarer Aussprache. Das reicht bei Weitem noch nicht um zum Beispiel ein Navigationssystem einfach bedienen zu können. Diese Art der Bedienung wird jedoch in Zukunft immer stärker eingesetzt werden, da sie den Fahrer am wenigsten ablenkt. Er kann während der Bedienung beide Hände am Steuer belassen und auf die Straße schauen. Voraussetzung für den stärkeren Einsatz ist allerdings, dass die Spracherkennung einwandfrei funktioniert. Ansonsten führt diese Technik nur zu Frustration und kann höchstens als „Spielerei“ betrachtet werden.

Technologien, die heute schon sinnvoll im Einsatz sind und den Fahrer entlasten, werden nun kurz beschrieben.

9.4.2 Neue Technologien

Force-Feedback-Controller und Control Display



Abbildung 9.4: Control Display und Force-Feedback-Controller

Das Herzstück der modernen Mensch-Maschine-Schnittstelle besteht aus zwei Komponenten: das Hauptdisplay (Control Display, BMW) und das zentrale Eingabeelement (Force-Feedback-Controller, BMW)(Bild 9.4).

Mit diesem Controller lassen sich alle Funktionen (700!) bedienen. Er kann in 8 Richtungen verschoben werden, wodurch man in die gewünschten Menüs gelangt. Diese sind auf der höchsten Ebene:

1. Kommunikation
2. Bord Daten
3. Navigation
4. Hilfe
5. Entertainment
6. Einstellungen
7. Klima
8. BMW ASSIST

In diesen Untermenüs kann durch Dreh- und Drückbewegungen eine Auswahl getroffen werden. Eine Besonderheit des Controllers ist, dass er verschiedene haptische Rückmeldungen an den Bediener liefern kann. Je nach Menü wird zwischen Rastwerk, Endanschlag mit Mittelstellung und Jog-Shuttle-Effekt (d.h. mit zentrierter Feder) unterschieden. Diese Art der variablen Haptik wurde von der Firma Immersion, die auf Spielekonsolen spezialisiert ist, mitentwickelt und soll dem Fahrer dabei helfen sich blind in einem Menü zurecht zu finden.

Das Control Display dient zur Darstellung der Menüs. Auf ihm wird die mögliche Auswahl möglichst intuitiv dargestellt, so dass der Nutzer nicht auf die Hand schauen muss,

während er seine Auswahl trifft. Auch das Display ist mit einer neuen Technologie ausgestattet, genannt Transreflexive LCD, die es ermöglicht bei jeder Umgebungsleuchtstärke die Information auf dem Display für den Bediener subjektiv gleich hell erscheinen zu lassen. Es ist bei BMW in Varianten von 6,5 Zoll und 8,8 Zoll mit einer Auflösung von 640x240 Pixel und 16 Bit Farbtiefe erhältlich.

Head-Up-Display

Eine weitere Errungenschaft im Fahrzeug kommt aus der Luftfahrt und heißt Head-Up-Display. Wie der Name schon sagt, ist der große Vorteil dieses Displays, dass der Fahrer während der Fahrt seinen Kopf (Blickrichtung) weiterhin auf die Straße richten kann. Dies ist möglich, da die Information mit Hilfe eines Systems, ähnlich dem von Videoprojektoren, so auf die Windschutzscheibe projiziert wird, dass der Fahrer ein virtuelles Bild wahrnimmt. Dieses Bild erscheint bei den gängigen Head-Up-Displays in ca. zwei Meter Abstand vor dem Fahrer über der Motorhaube.

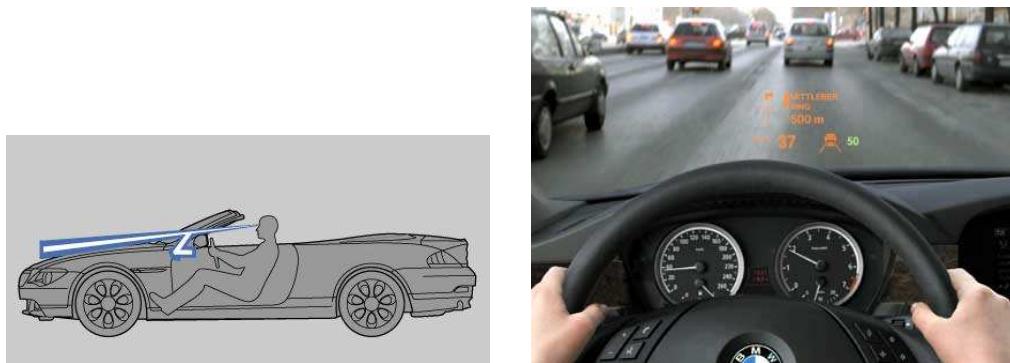


Abbildung 9.5: Head-Up-Display [BMW04]

Auf diesem Display werden ausschließlich fahrrelevante Informationen angezeigt, so dass der Fahrer nicht abgelenkt ist. Ein großer Vorteil dieser Präsentationstechnik ist, dass sich die Augen des Fahrers nicht an neue Umstände gewöhnen müssen. Die Augen müssen also keine Adaption(Hellanpassung) und keine Akkommodation(Schärfeanpassung) durchführen, was zu einer schnelleren Wahrnehmung der Information führt und dadurch stark zur Sicherheit während des Fahrens beiträgt.

Ein Hauptproblem bei der Entwicklung war das beschränkte Platzangebot im Fahrzeug. Erst durch immer kleiner werdende Bauteile ist man heute in der Lage Head-Up-Displays für alle Fahrzeugtypen herzustellen. Es gibt sogar schon Firmen die sich auf die Nachrüstung von Head-Up-Displays spezialisiert haben.

Force-Feedback-Pedal

Um dem haptischen Kanal besser zu nutzen, geben immer mehr Bedienelemente auch haptische Rückmeldungen an den Fahrer zurück. So auch das Gaspedal. Bei der neuen

Variante des Tempomats (Cruise Control), dem sogenannten Adaptive Cruise Control, gibt das Gaspedal bei zu nahem Auffahren auf den Vordermann einen Gegendruck auf das Pedal, das dem Fahrer anzeigt er soll nicht schneller fahren. Auch bei zu hoher Kurvengeschwindigkeit kann dieses Signal verwendet werden. Das gleiche System wird auch auf andere Weise umgesetzt. So gibt es Systeme, die einen Gegendruck am Blinkhebel erzeugen oder das Lenkrad vibrieren lassen, wenn ein Fahrzeug im toten Winkel erkannt wurde.

Akustische Warnungen und Anzeigen

Mit akustischen Warnungen und Anzeigen, kann man so ziemlich alles darstellen. Hier muss unterschieden werden zwischen verbalen und nonverbalen Anzeigen. Nonverbale Anzeigen kommen ähnliche Aufgaben zu, wie den haptischen Anzeigen. Man kann Warnen vor zu nahem Auffahren oder einem Fahrzeug im toten Winkel. Zusätzlich findet nonverbale Akustik auch Einsatz bei Einparkhilfen und bei allgemeinen Systemfehlermeldungen, sowie bei Eingabebestätigungen. Verbale akustische Anzeigen kennt jeder vom Bedienen des Navigationssystems. Da diese Art der Informationsdarstellung so vielseitig eingesetzt werden kann, muss darauf geachtet werden, dass der Fahrer durch zu viele akustische Signale nicht gestresst und überfordert wird.

Spracheingabe

Die Spracheingabe stellt, wie schon erwähnt, voraussichtlich die Zukunft der Bedienung dar, weil sie den Fahrer am wenigsten ablenkt und die natürliche Kommunikationsform des Menschen ist. Bei der Unterhaltung zwischen Menschen spielen jedoch sehr viele Umwelteinflüsse und der Kontext, sowie die Mimik und Gestik der Menschen eine große Rolle, um das Gesprochene eindeutig zu verstehen. An der Zusammenarbeit der einzelnen Erkennungssysteme für Mimik, Gestik, Sprache, usw. wird zur Zeit stark am Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation an der TU München geforscht. Bis diese Systeme jedoch ausgereift sind und billig genug sind, um im Fahrzeug Verwendung zu finden, werden wohl noch einige Jahre vergehen.

Multifunktionslenkrad

Das Multifunktionslenkrad soll es dem Fahrer ermöglichen, die Hände immer am Steuer zu lassen. Die Funktionen die der Fahrer beim 7er BMW vom Lenkrad aus bedienen kann sind folgende (siehe Bild 9.6):

- **Lenkstockschatzer:**
Blinker, Scheibenwischer, Stufentempomat, ACC (ein/aus)
- **Rechte Seite:**
Steptronic-Modus wählen: Automatik, Sport, Manuell



Abbildung 9.6: Multifunktionslenkrad [BMW04]

Suchlauf für CD, Radio oder TV

Individuelle Taste (kann über Controller belegt werden)

- **Linke Seite:**

Anrufe entgegennehmen, initiieren, beenden

Lautstärke regeln

Freisprechen aktivieren

9.5 Zusammenfassung

Da sich die Anzahl der Funktionen im Fahrzeug über die letzten Jahre drastisch gesteigert hat, war es nicht möglich weiterhin ein komponentenorientiertes Schalterkonzept zu verfolgen, bei dem jeder Funktion eine eigene Schaltergruppe zugeordnet wird. Deshalb musste zur Zeit der Jahrtausendwende ein neues Anzeige- und Bedienkonzept entworfen werden, damit der Fahrer durch die Flut an Information und die Fülle der Bedienmöglichkeiten nicht zu sehr vom Geschehen auf der Straße abgelenkt wird. In dieser Arbeit wurden zunächst die Ziele der Entwickler einer Mensch-Maschine-Schnittstelle, sowie deren Aufgaben zum Erreichen dieser Ziele, vorgestellt. Dabei wurde auf die Modalitäten der Schnittstellen eingegangen und deren Vor- und Nachteile beschrieben. Zur Unterstützung der Entwickler und zur Kontrolle der Schnittstellen gibt es Normen und Grundsätze, die stichpunktartig dargestellt worden sind. Zur Veranschaulichung für moderne Umsetzungen in der Fahrzeugindustrie wurden verschiedene Konzepte und moderne Technologien gezeigt.

9.6 Ausblick

Es ist absehbar, dass in Zukunft durch immer besser werdende drahtlose Kommunikation das Fahrzeug noch mehr Informationen aus dem Internet und anderen Informationsquel-



Abbildung 9.7: X-by-Wire: Joystick statt Lenkrad [nUvDA00]

len dem Fahrer zur Verfügung stellen wird. Außerdem werden heutige mechanische und hydraulische Verbindungen im Fahrzeug sehr bald, im Zuge der X-by-Wire-Technologie, durch elektrische Verbindungen ersetzt werden. Dadurch werden wiederum neue Möglichkeiten denkbar, die zu immer mehr fahrerunterstützenden Systemen im Fahrzeug führen werden. Dadurch wird in den kommenden Jahrzehnten das Autofahren an sich neu definieren werden. So werden heute schon Bedienkonzepte ohne Lenkrad und Gaspedal getestet (Bild 9.7). Trotz all den Vorteilen, die diese neuartigen Konzepte in sich bergen, wird es lange dauern, bis sie von den Nutzern akzeptiert werden. So lässt sich folgendes Fazit ziehen:

Die Entwickler sind auf dem richtigen Weg. Aber von dem Traum, dem alle Entwickler in der Fahrzeugindustrie hinterher jagen - ein selbständig fahrendes Auto, das wie ein Mensch kommuniziert, dadurch intuitiv bedient werden kann und perfekte Sicherheit für die Insassen bietet, so dass sich diese dem unerschöpflichen Informations- und Entertainmentangebot des Boardcomputers widmen können - ist man noch weit entfernt.

Literaturverzeichnis

- [BMW04] 2004. www.bmw.de.
- [DSB02] Prof. Dr. H.-P. Krüger Dr. S. Buld. Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit. Technischer Bericht, Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg, 2002.
- [Lam99] Laasko M. Summala H. Lamble, D. Detection thresholds in car following situations and peripheral vision: implications for positioning of visually demanding in-car displays. *Ergonomics*, 42 (6):807–815, 1999.
- [Nie02] Dr. Franz Niedermaier. *Entwicklung und Bewertung eines Rapid-Prototyping Ansatzes zur multimodalen Mensch-Maschine-Interaktion im Kraftfahrzeug*. Dissertation, TU München, 2002.
- [nUvDA00] nach Unterlagen von DaimlerCrysler AG. X-by-Wire - Das Feeling bleibt! *Auto & Elektronik*, 2000.
- [Sch02] Kay Schattenberg. *Fahrzeugführung und gleichzeitige Nutzung von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen*. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 2002.
- [SH04] Matthias Schneider-Hufschmidt. Entwurf ergonomischer Benutzungsoberflächen, 2004. Siemens AG.
- [Wan] Prof. H. Wandke. Mensch-Maschine-Kommunikation. Internet: www.aodgps.de/alt/mensch-maschine-systeme.html.

Kapitel 10

Verkehrsflußmodellierung: Ziele und Techniken

Über den Autor

Fatih Yilmaz - studiert zur Zeit im zehnten Semester Elektro- und Informationstechnik an der TU München.

10.1 Motivation

Die **Verkehrsflußmodellierung** gewinnt in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung. Diese Tatsache kann man sehr gut verstehen, wenn man sich das Beispiel „München“ vor Augen führt. [Red03] An einem Tag fahren 1.8 Millionen Fahrzeuge durch Münchens Straßen. Von diesen Fahrzeugen sind 800.000 in München zugelassen, die restlichen 1.000.000 Fahrzeuge tragen nicht einmal das Münchener Kennzeichen. Diese sind Pendler-Fahrzeuge, Menschen also, die hauptsächlich zur Arbeit fahren, durchfahren oder einfach zu Besuch kommen. Alle Fahrzeuge zusammen fahren täglich 20.000.000 Km und diese Zahl spricht für sich.

Diese Fakten verdeutlichen nur all zu klar, dass Straßen optimal ausgenutzt werden müssen damit der Stau, Stress und vor allem Unfälle so gut wie möglich verhindert werden. Die Verkehrsflußmodellierung ermöglicht uns deshalb, die optimale Ausnutzung der Straßen und der Ressourcen. Um dieses große Ziel zu erreichen, sind wichtige Projekte zu fördern und vor allem zu optimieren.

10.2 optimierbare Projekte

Zu den wichtigen Projekten kann man vier Beispiele [uPW04] angeben:

- **Infrastrukturplanung:** Die Anzahl der Auffahrten auf der Autobahn ist ein wichtiger „Staufaktor“. Viele Auffahrten bedeuten Staugefahr, zu wenige hingegen ermöglichen den Fahrern kein schnelles Erreichen der Autobahn. Die Planung der Infrastruktur beinhaltet auch die Frage, ob an einer jeweiligen Kreuzung ein Kreisverkehr oder eine Ampelsteuerung eingesetzt werden soll, um den Verkehr so fließend wie möglich umzuleiten. Diese Punkte können mit der Verkehrsflußmodellierung optimiert werden.
- **Verkehrsflußsteuerung:** Auch die Lichtsignalsteuerung (dauer Rotphase und Grünphase der Verkehrsampeln) kann mit Hilfe der Simulation optimal eingestellt werden. Sie ermöglicht die Aufstellung der Streckenbeeinflussungsanlagen, mit denen z.B. auf einer Autobahn, die Geschwindigkeit der aktuellen Verkehrsdichte angepaßt werden kann.
- **Kurzfristprognosen:** Die Verkehrsflußmodellierung ermöglicht das dynamische Verkehrsleitsystem. Hierbei kann z.B. bei einer kurzfristigen Erhöhung der Verkehrsdichte, wie bei Messen, Europameisterschaften usw., die optimalen Veränderun-

gen im Verkehr berechnet werden, die notwendig sind um den Verkehr so schnell wie möglich durchzuleiten. Diese kurzzeitigen Veränderungen könnten Geschwindigkeitsveränderungen, längere Grünphasen oder neue Routenempfehlungen sein.

- **Fahrerassistenzsysteme:** Auch die Entwicklung der Fahrerassistenzsysteme können stark beeinflusst werden. Hierbei geht es nicht um den Sicherheitsaspekt, sondern um die Stauverhinderung. Ein Beispiel wäre die automatische Abstandskontrolle (ACC). ACC hält automatisch den optimalen Abstand zum Vordermann in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und den Wetterbedingungen. Dadurch werden Schwankungen im Verkehr verhindert, welche der Mensch ohne den Assistenten verursachen würde, da er regelmäßig zu nahe zum Vordermann auffahren und wieder abbremsen würde.

10.3 Verkehrszustände

Um den Verkehr aber optimal zu modellieren, muss erst einmal festgestellt werden, wie der Verkehr aufgebaut ist. [Den98] Dabei kann man den Verkehr in drei Zustände gliedern:

- **Der freie Verkehr:** Dies ist die optimalste und von Fahrersicht die bevorzugteste Situation. Charakteristisch für diesen Zustand ist, daß die Fahrer ihre Fahrzeuggeschwindigkeiten, bis zur gesetzlichen Bestimmung, selber bestimmen können. Andere langsame Fahrzeuge können ohne nennenswerte Verzögerungen Überholt werden.
- **Der synchrone Verkehr:** Er ist die Verbindung vom freien Verkehr zum gestauten Verkehr und hat damit eine wichtige Bedeutung für die Verkehrsflußmodellierung. Dieser Zustand läßt sich dadurch definieren, daß die Fahrer ihre Geschwindigkeit nicht mehr selber uneingeschränkt bestimmen können, da das Überholen nicht mehr ohne Verzögerung möglich ist.
- **Der gestaute Verkehr:** In diesem Zustand sind die Fahrer komplett in der Wahl ihrer Geschwindigkeit eingeschränkt und Überholen ist unmöglich und nicht Gewinnbringend.

10.4 Wie entsteht ein Stau?

An dieser Stelle stellt sich nun die interessante Frage, wie entsteht überhaupt ein Stau. Ein Stau entsteht durch Fluktuationen, die nicht mehr kompensiert werden können. Fluktuationen sind z.B. Bremsmanöver, die je nach Fahrer individuell ausfallen können. Ein Beispiel soll Klarheit bringen: Ein BMW will sich im dichten Verkehr in eine Fahrspur einordnen. Um dem BMW genügend Freiraum zu lassen, muss der Mercedes bremsen. Das nachfolgende Fahrzeug muss natürlich auch bremsen, aber auf eine niedrigere Geschwindigkeit als der Mercedes, so daß sich dieses Verhalten weiter fortpflanzt und wenn der Verkehr dicht genug ist, entwickelt sich ein Stau (siehe Bild 10.1).



Abbildung 10.1: Stau [Sta]

10.5 Phasenverlauf

[Neu00] Die Verkehrszustände können auch graphisch Dargestellt werden. Dies ist möglich, da die Verkehrszustände durch drei charakteristische Größen gemessen werden können. Diese Größen sind **Fluß**, **Dichte** und **mittlere Geschwindigkeit**.

- **Fluss:** Die Einheit des Flusses ist Anzahl der Fahrzeuge durch die betrachtete Zeit. Hier wird eine bestimmte Stelle der Fahrspur betrachtet und es wird gezählt wieviele Fahrzeuge in der betrachteten Zeit diese Stelle überqueren.
- **Dichte:** Die Dichte wird gemessen, indem die Anzahl der Fahrzeuge gezählt wird, die sich auf einem bestimmten Streckenabschnitt befinden. Die Einheit ist somit Anzahl der Fahrzeuge geteilt durch die betrachtete Streckenlänge.
- **mittlere Geschwindigkeit:** Die mittlere Geschwindigkeit wird gemessen, indem die Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge addiert und dann durch ihren Anzahl dividiert wird. Die Einheit ist zurückgelegte Strecke durch die betrachtete Zeit.

In der Abbildung 10.2 ist der freie Verkehr zwischen dem Ursprung und der Dichte 1 bzw. dem maxilem Fluss ersichtlich. Ab diesem Punkt, auch kritischer Punkt genannt, geht der Verkehr schlagartig über in den synchronen Verkehr. Die Dichte 1 und der maximale Fluss hängen dabei von der Straßencharakteristik, Wetter und von den Fahrern ab. Bei zu kurvigen Straßen, schlechtem Wetter oder bei älteren Fahrern verschiebt sich der kritische Punkt zum Koordinatenursprung hin.

Im freien Verkehr wird deutlich, daß die Geschwindigkeit (Steigung der Gerade) der Fahrzeuge, unabhängig von der Dichte ist. Aber ab dem kritischen Punkt nimmt die Geschwindigkeit (Steigung der Verbindung des Koordinatenursprungs mit dem aktuellen Punkt auf der Gerade) mit der steigenden Dichte ab bis zum kompletten Stauzustand. Der komplette Stauzustand tritt erfahrungsgemäß bei einer maximalen Dichte von 140 Fzg./km auf.

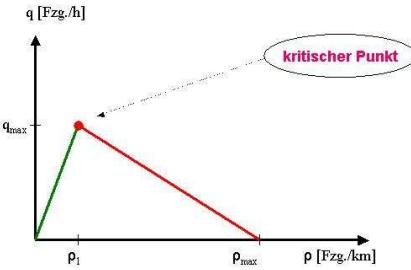


Abbildung 10.2: Phasenverlauf des Verkehrs (dabei entspricht q dem Fluß und ρ der Dichte)

10.6 Meßmethoden

Die Wichtigkeit der Größen **Fluß**, **Dichte** und **mittlere Geschwindigkeit** soll noch einmal betont werden, in dem verschiedene Meßmethoden für diese Größen genannt werden:

- **Messung an einem festen Punkt:** Dies ist möglich über Induktionsschleifen, Radar und Videokameras.

Induktionsschleifen sind Spulen, die unter der Fahrbahn angebracht sind und ihre Induktivität verändern, sobald ein Fahrzeug die Spulen passiert. Radar und Videokameras sind in den Abbildungen 10.3 und 10.4 ersichtlich.

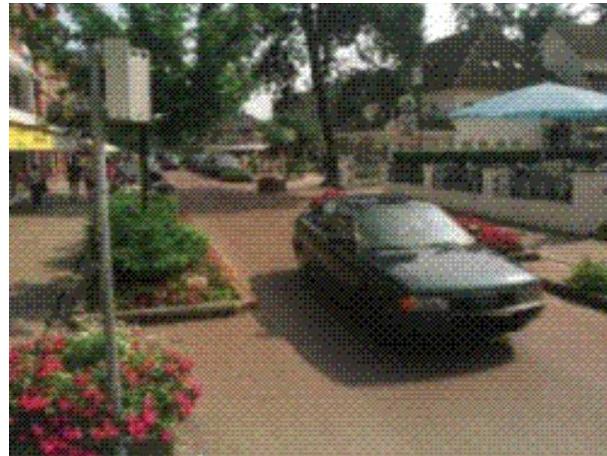


Abbildung 10.3: Radar [Gmb]

- **Messung über einen Streckenabschnitt:** Dafür werden Videokameras, wie Tangentenkameras und Überkopfkameras eingesetzt (siehe Abbildung 10.5).

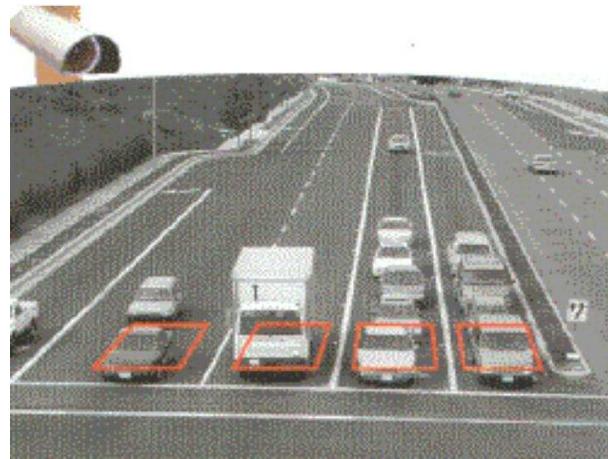


Abbildung 10.4: Videokamera [Gmb]

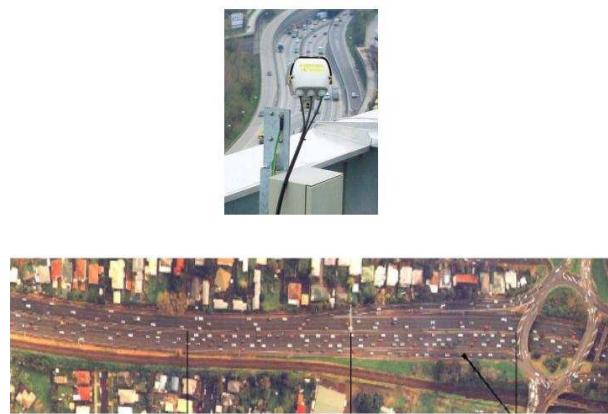


Abbildung 10.5: oben: Tangentenkamera [Gmb] unten: Überkopfkamera [TSSa]

- **Messung aus einem fahrenden Auto heraus:** Ein Auto sendet in regelmäßigen Intervallen seine aktuelle Geschwindigkeit und seinen aktuellen Standort.

[Neu00] Die Meßgenauigkeit der Dichte und des Flusses sollte bei PKW's zwischen 10 und 20 Prozent sein, bei LKW's zwischen 20 und 30. Die Geschwindigkeit sollte auf 3 km/h genau gemessen werden.

10.7 Verkehrsflußmodelle

Nachdem wir den Verkehr in seine Zustände aufgeteilt haben und für diese auch geeignete Meßmethoden kennen gelernt haben, kann der Verkehr jetzt modelliert werden. Die Verkehrsflußmodelle können in zwei Gruppen aufgeteilt werden. Die Klassifizierung erfolgt nach dem Auflösungsgrad. Dabei versteht man unter Auflösungsgrad, die Genauigkeit der Modellierung des Verkehrs.

10.7.1 Makroskopisches Verkehrsflußmodell

[Neu00] Dieses hat die größte Auflösung und bildet somit die erste Klasse der Modelle. Das Modell entstand um 1950. Dabei wird der Verkehr aus einer Vogelperspektive betrachtet, einzelne Fahrzeuge können nicht mehr erkannt werden, sie führen nur als Ganzes zu einem einheitlichen Fluß, Dichte und einer mittleren Geschwindigkeit (siehe Abbildung 10.6).

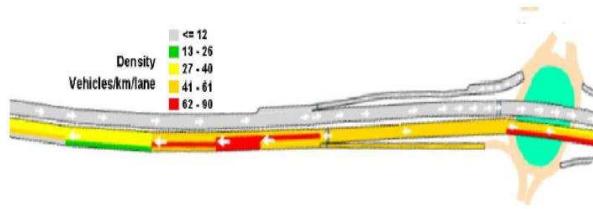


Abbildung 10.6: makroskopische Sicht des Verkehrs für die Dichte [TSSa]

Als Algorithmen werden Differentialgleichungen der Gastheorie eingesetzt. Der Verkehr wird dabei in Analogie zum Gas gebracht. Die Fahrzeuge verhalten sich wie Gasteilchen mit dem einzigen Unterschied, daß beim Gas, im Gegensatz zum Verkehr, die Geschwindigkeit zunimmt, wenn es an einen Engpass kommt, da beim Gas der Fluß konstant bleiben muß. Die Geschwindigkeit des Verkehrs jedoch nimmt an einer Engstelle ab, somit werden Staus realisierbar.

- **Vorteile dieser Modellierung sind:**

- Der Auflösungsgrad ist nicht so hoch und damit lassen sich sehr große Systeme simulieren.
- Die Modellierung kann Ort- und/oder Zeitdiskret betrachtet werden.

- **Nachteile sind:**

- Die Fahrzeugverfolgung eines bestimmten Fahrzeuges ist nicht möglich. Das bedeutet, dass bei dieser Modellierung nicht beobachtet werden kann wohin und wie schnell ein einzelnes Fahrzeug fährt.
- Das Fahrzeug-Fahrzeug-Verhalten ist nicht darstellbar. Es kann z.B. nicht beobachtet werden wo ein bestimmtes Fahrzeug ein anderes Fahrzeug überholt oder abbremsen muß weil sein Vordermann abremst.
- Das Fahrzeug-Fußgänger/Radfahrer-Verhalten sind nicht darstellbar. Daraus folgt, dass bei dieser Modellierung nicht beobachtet werden kann wie sich

Fußgänger und Radfahrer auf das Fahrerverhalten auswirken, z.B. wo sind die meisten Radfahrer, wo können sie am besten überholt werden.

Die Visualisierung kann wie in Abbildung 10.7 verdeutlicht werden. Die grüne Farbe (Druckfarbe: leicht dunkelgrau) bedeutet freier Verkehr, orange (Druckfarbe: hellgrau) synchroner Verkehr und rot (Druckfarbe: stark dunkelgrau) entspricht dem gestauten Zustand.



Abbildung 10.7: Visualisierung der makroskopischen Simulation [TSSb]

Ein **Anwendungsbeispiel** für derartige Modellierung könnte wie in Abbildung 10.8 dargestellt, die Beeinflussung des Verkehrs auf der Autobahn sein. Hier ist es möglich über Tangentenkameras den Verkehr auf der Autobahn zu beobachten, um die aktuelle mittlere Geschwindigkeit und die aktuelle Dichte zu bestimmen. Dann kann an Hand des Phasenverlaufes der Autobahn, der sich aus den aktuellen Bedingungen, wie Wetterverhältnisse und anderen Bedingungen ergibt, gesehen werden, wie nahe der Verkehr am kritischen Punkt ist. Nähert sich der Verkehr dem kritischen Punkt, dann kann die Geschwindigkeit auf der Autobahn über Streckenbeeinflussungsanlagen herunter gesetzt werden. Dadurch verändert sich der Phasenverlauf der Straße und der kritische Punkt wird somit erst bei einer größeren Dichte und Fluß erreicht. Somit kann der Stau verhindert werden.

10.7.2 Mikroskopisches Verkehrsflußmodell

[Neu00] Dieses besitzt die feinste Auflösung und bildet die zweite Klasse der Modelle. Diese Modellierung erlaubt es, den Verkehr beliebig detailliert darzustellen. Im Gegensatz zur makroskopischen Modellierung, in dem nur Größen wie Dichte, Fluss und mittlere Geschwindigkeit beobachtet werden konnten, ermöglicht dieses Modell, einzelne Fahrzeuge mit ihrem individuellen Verhalten zu beobachten.

Die **mikroskopische Modellierung** wurde erst 1990 in Einsatz gebracht. Wie schon erwähnt, lässt sich hier der Verkehr sehr detailliert darstellen. Bei der Modellierung geht es hauptsächlich

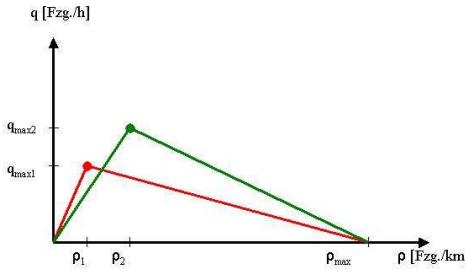


Abbildung 10.8: Anwendungsbeispiel

darum, das Verhalten des betrachteten Fahrzeuges an das Verhalten seines Vordermannes anzupassen. Das bedeutet zum Beispiel, wenn der Vordermann bremst muß auch das betrachtete Fahrzeug bremsen.

Daraus leiten sich auch die **charakteristischen Größen** dieser Modellierung ab:

- **Geschwindigkeit** des betrachteten Fahrzeuges
- **Abstand** des betrachteten Fahrzeuges zu seinem Vordermann
- Die **Differenzgeschwindigkeit** des betrachteten Fahrzeuges zu seinem Vordermann
- Die **Beschleunigung** des betrachteten Fahrzeuges, sowohl positive wie negative
- Der **Sensitivitätsfaktor**: Dieser beschreibt, wie genau der Fahrer des betrachteten Fahrzeuges auf Ereignisse reagieren kann. Ein solches Ereignis wäre z.B. das Abbremsen. Wie genau kann der Fahrer abbremsen wenn das ihm vorausfahrende Fahrzeug auf eine bestimmte Geschwindigkeit herunterbremst. Denn in der Realität kann der Mensch nicht genau auf diese Geschwindigkeit runterbremsen, sondern bremst in der Regel etwas mehr ab, als er eigentlich müßte.
- Die **Reaktionszeit** des Fahrers vom betrachteten Fahrzeug. Diese Zeit entspricht der Zeitspanne, wie schnell ein Fahrer auf Ereignisse reagiert.

Bei der **mikroskopischen Modellierung** werden bevorzugt **Zellulärautomaten** verwendet, da diese leicht handhabbar sind. Bei den **Zellulärautomaten** werden alle Größen in Zellen dargestellt und haben keine Einheiten. Wie in Abbildung 10.9 sichtbar, werden die Straßen in Zellen aufgeteilt, die Zelle hat typischer Weise eine Größe von 7,5m. Die Ziffern in den Zellen stellen Fahrzeuge mit ihrer Geschwindigkeit dar. Bei einer Zelle mit der Zahl 3 befindet sich also ein Fahrzeug, welches sich um drei Zellen pro Zeitschritt fortbewegt. Die Modellierung wird hier Zeit- und Ortsdiskret ausgeführt.

Bei dieser Modellierung werden **diskrete Algorithmen** verwendet. Als Resultat diskreter Algorithmen ergeben sich eine bestimmte Anzahl von Ereignissen die als nächstes Eintre-

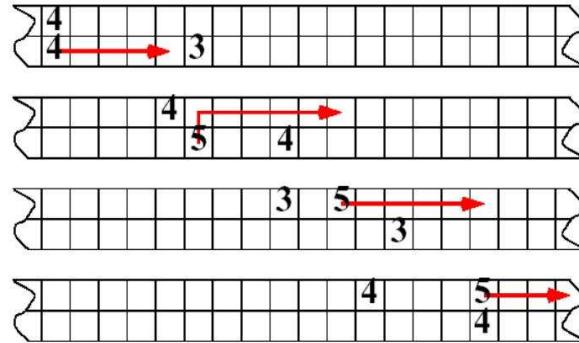


Abbildung 10.9: Zellularisierung des Verkehrs [Neu00]

ten können. Ein einfaches Beispiel dafür wäre das „Überholen“ . Hier würde die Simulation modellieren, ob das überholen wollende Fahrzeug auf der Überholspur schneller wäre als auf der aktuellen Fahrspur. Wenn nein, dann überholt das Fahrzeug nicht, wenn ja, dann wird noch modelliert, ob die Sicherheit durch das Überholmanöver gefährdet wird. Eine Sicherheitsgefährdung wäre, wenn sich ein Fahrzeug im toten Winkel auf der Überholspur befinden würde. Wenn auch die Sicherheit gewährleistet ist, dann darf das Fahrzeug überholen (siehe Abbildung 10.10).

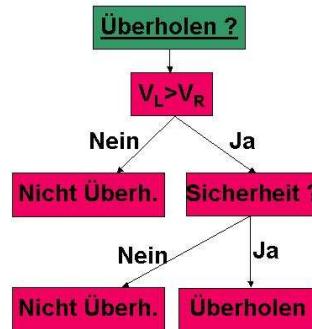


Abbildung 10.10: Beispiel für diskrete Algorithmen

Auf der Abbildung 10.9 ist das auf der rechten Spur fahrende Fahrzeug mit der Geschwindigkeit 4 ersichtlich und im Gegensatz zu diesem, das vorausfahrende Fahrzeug mit der Geschwindigkeit 3. Das schnellere Fahrzeug will somit den Vordermann überholen. Im nächsten Zeitschritt wird deutlich, daß er seine Geschwindigkeit auf 5 erhöht, um genug Abstand auf das Fahrzeug zu erhalten, das auf der linken Fahrspur fährt. Dieses und das zu überholende Fahrzeug reduzieren daraufhin ihre Geschwindigkeit, um dem Überholenden die Gelegenheit zu geben, das Überholmanöver schnell und sicher zu beenden. Nach

dem das Manöver abgeschlossen ist und das überholende Fahrzeug auf die linke Fahrspur wechselt, können die beiden anderen Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit wieder erhöhen.

- **Die Vorteile der mikroskopischen Verkehrsflussmodellierung sind:**

- Durch den Sensitivitätsfaktor und die Reaktionszeit können Fluktuationen realisiert und daraus wiederum der Stau modelliert werden.
- Spurwechsel sind realisierbar und dabei kann die Attraktivität und Sicherheit des Spurwechsels berechnet werden.
- Verkehrsregeln können in die Simulation miteinbezogen werden, wie z.B. rechts Überholen verboten.
- Jede Zelle kann parallel und unabhängig von den anderen Zellen berechnet werden.

- **Die Nachteile dieses Modells:**

- Steigen des Rechenaufwandes, um so detaillierte der Verkehr dargestellt wird.
- Steigen der Kalibrierungsanforderung, um so detaillierter der Verkehr modelliert wird.

Visualisierungsbeispiele der mikroskopischen Verkehrsflußmodellierung sind den unten angegebenen Abbildungen 10.11 und 10.12 zu entnehmen. Dabei ist die realitätsnahe Darstellung auffällig. Einzelne Personen, Fahrradfahrer und sogar die Umgebung kann dargestellt werden. Detaillgetreue Darstellung kann vor allem auf kleineren Streckenabschnitten und dicht befahrenen Stadtteilen von Vorteil sein.

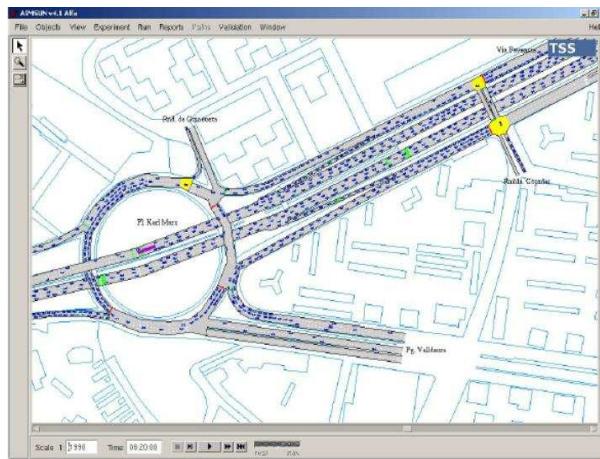


Abbildung 10.11: Visualisierungsbeispiel der mikroskopischen Modellierung [Aim]



Abbildung 10.12: Visualisierungsbeispiel der mikroskopischen Modellierung [Vis]

10.8 Schluß

Wie wir gesehen haben, gibt es Ansätze, den Stau auf unseren Straßen einzudämmen und zu verhindern. Auch in Zukunft werden Bemühungen in diese Richtung zielen, denn Straßen haben nun einmal nur eine begrenzte Kapazität. Aber nicht nur die Technik sondern auch wir als Menschen, also Fahrer, können dazu beitragen, daß unschöne „Staubild“ zu verhindern. Nicht einmal die beste Technik kann ein bißchen Respekt und Rücksicht auf den Straßen ersetzen. Viel Spaß beim Fahren, oder sollte ich lieber sagen „warten“ !

Literaturverzeichnis

- [Aim] mikroskopische Modellierung: Aimsun von der Firma TSS Transport Simulation Systems. www.tss-bcn.com.
- [Den98] Ulrich Denneler. Verfahren zur Mustererkennung bei Verkehrsmessungen zur Verkehrsprognose, Diplomarbeitnr. 1691, Universität Stuttgart, Fakultät Informatik, 1998. http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/1999/417/pdf/417_1.pdf.
- [Gmb] Rigera GmbH. <http://www.Rigera.de/vde.htm>.
- [Neu00] Lutz Neubert. Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsfluß mittels Zellularautomaten, 2000. <http://www.ub.uni-duisburg.de/diss/diss0028/inhalt.htm>.
- [Red03] Rede des berufsm. Stadtrats Dr. Wilfried Blume-Beyerie Kreisverwaltungsreferat, Landeshauptstadt München , 2003. http://www.mobinet.de/services/presse_info/press_info_ri2.htm.
- [Sta] 3sat. <http://www.3sat.de/nano/bstuecke/18126>.
- [TSSa] Microscopic Traffic Simulation Tool, J. Barcelo u.a. <http://www.tss-bcn.com>, unter Documents.
- [TSSb] Scenario Analysis a Simulation based tool for regional strategic traffic management, J. Barcelo und D. Garcia. <http://www.tss-bcn.com>, unter Documents.
- [uPW04] Elmar Brockfeld und Peter Wagner. Kalibrierung und Validierung von mikroskopischen Verkehrsflußmodellen, Institut für Verkehrsorschung, DLR, Berlin, 2004. http://www.dlr.de/FS/DE/VP_FS_EX_Vortrag_Brockfeld_040108.pdf.
- [Vis] mikroskopische Modellierung: Vissim von der Firma PTV traffic mobility logistic AG. www.vissim.de.

Kapitel 11

Dynamische Verkehrsleitsysteme

Über den Autor

Elmar Sommer studiert zur Zeit im 10. Semester Elektro- und Informationstechnik, mit Schwerpunkt Informations- und Kommunikationstechnik, an der TU München.

11.1 Einleitung

Der Verkehr auf Europas Straßen nimmt seit Jahren rapide zu und es ist davon aus zu gehen, dass dieser Trend auch die nächsten Jahre anhalten wird. Um diesen Verkehrsmassen Herr zu werden, werden Verkehrsleitsysteme zunehmend an Bedeutung gewinnen. So ist fast jede Metropole dabei, oder wird es in den nächsten Jahren sein, ein modernes Verkehrsleitsystem auf ihrem Stadtgebiet zu installieren.

Diese Systeme können die bestehenden Straßenkapazitäten optimal nutzen und so eine effiziente Staureduzierung bewirken, ohne neue Verkehrswege anlegen zu müssen. Außerdem reagieren Verkehrsleitsysteme schneller und feiner auf Störungen und Sonderbegebenheiten, wie z. B. Konzerte, Staus und Witterung, als elektronische Navigationssysteme. Sie sind in der Lage innerhalb von Minuten zu reagieren, wohingegen das Kartenmaterial von Navigationssystemen nur zweimal pro Jahr aktualisiert wird.

Des Weiteren können dynamische Verkehrsleitsysteme eingesetzt werden um öffentliche Verkehrsmittel und Einsatzfahrzeuge der BOS¹ zu priorisieren. Diesen werden eigene Grünphasen geschaltet, um ein schnelles uns sicheres vorwärts kommen im Straßenverkehr zu ermöglichen.

Mit Hilfe eines Verkehrsleitsystems können die Unfallzahlen reduziert werden. So kann eine Fahrspur, die durch ein verunfalltes Fahrzeug blockiert wird, für den restlichen Verkehr gesperrt werden, um Folgeunfälle zu vermeiden.

Auch eine Minderung der ökologischen Belastung ist mit solch einem System möglich. Hierbei dienen nicht Verkehrsdichte und Geschwindigkeit als Meßgrößen, sondern die Emissionswerte von Schadstoffen. So kann, bei Überschreitung eines gewissen Grenzwerts, der Verkehrsfluss auf eine niedrigere Geschwindigkeit abgebremst werden.

Aber Verkehrsleitsysteme können nicht zaubern. Sie können nur die günstigste Lösung bei gegebenem Verkehr finden. Man kann ein Verkehrschaos auch mit dem besten System nicht verhindern, sondern nur mildern.

¹Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben

11.2 Schematischer Aufbau eines Verkehrsleitsystems

Der Aufbau eines Verkehrsleitsystems gliedert sich, wie in Abbildung 11.1 zu erkennen ist, in drei große Abschnitte.



Abbildung 11.1: Schema eines Verkehrsleitsystems

Zuerst müssen die Verkehrsdaten mittels Sensoren aufgenommen werden. Diese aufgenommenen Verkehrsdaten werden baumartig zusammen geführt, um dann in einer Verkehrsleitzentrale verarbeitet zu werden. Diese besteht meist aus einem Großrechner, der die Rohdaten aufbereitet, den Verkehrsfluss modelliert, die Steuerung der Wechselschilder übernimmt und den Menschen bei der Steuerentscheidung unterstützt. Diese Steuerentscheidungen werden den Verkehrsteilnehmern mit Hilfe verschiedener Medien mitgeteilt, um die Fahrzeuge auf den zu diesem Zeitpunkt günstigsten Weg zu leiten.

Diese drei Gebiete werden in den folgenden Abschnitten jeweils näher besprochen.

11.3 Sensorik

Wie in Abschnitt 11.2 beschrieben ermöglichen es die Sensoren einem Verkehrsleitsystem, den Verkehrszustand auf den Straßen zu bestimmen. Dieser Zustand wird durch die folgenden Größen beschrieben:

- Fahrzeuge pro Zeiteinheit
- Fahrzeit, zwischen zwei Punkten
- Anzahl und Größe der Lücken
- Geschwindigkeit
- Fahrzeugklasse

Alle anderen interessanten Größen lassen sich aus den oben genannten errechnen. Sie werden nach TLS BASt² erfaßt.

Die Sensoren sollten nach dem Aufstellen ein „Black-Box“ Verhalten zeigen. D. h. sie sollten über eine eigene wartungsarme und unabhängige Stromversorgung verfügen. Dies ist z. B. über eine Batterie gepufferte Photovaltaikanlage zu erreichen. Des weiteren wäre

²Technische Lieferbedingungen für Streckenstation, Bundesanstalt für Straßenwesen

es wünschenswert, wenn die Sensoren ihre Meßdaten kabellos z. B. per GSM/SMS oder GRPS/IP-Routing an die nächst höhere Ebene abgeben könnten. Der wichtigste Aspekt ist allerdings die Selbstkalibrierung. Dies bedeutet, dass der Sensor sein Verhalten bei einer Änderung der Umgebungseinflüsse und ohne Eingriff von Außen nicht verändern sollte. Ein Temperatursensor muss also im Sommer wie im Winter die Temperatursignatur³ eines Autos richtig anzeigen.

Für eine umfassende Aufnahme der Verkehrsdaten ist eine flächendeckende Anbringung der Sensoren nötig. Dies kann in einer Großstadt einige 1000 Sensoren bedeuten, die ihre Meßdaten hierarchisch über Unterknoten und Knoten an die Zentrale weitergeben.

11.3.1 Statische Sensoren

Induktionsschleifen

Diese Sensorart ist in bestehenden Systemen wohl am weitesten verbreitet. Der Sensor besteht aus einer im Asphalt verlegten Drahtwindung⁴ und einem Detektor⁵, die wie in Abbildung 11.2 verschaltet sind. Diese beiden Bauteile bilden einen L-C-Schwingkreis, der mit einer bestimmten Resonanzfrequenz schwingt. Befindet sich nun ein metallischer Gegenstand innerhalb der, von Strom durchflossenen, Spulenwindungen, so ändert sich das magnetische Wechselfeld. Damit verändert sich auch die Induktivität der Schleife und somit die Frequenz des Schwingkreises. Diese Frequenzänderung kann detektiert werden und von ihrer Stärke kann man Rückschlüsse auf die Fahrzeugklasse ziehen. Eine Geschwindigkeitsmessung ist über zwei hintereinander verlegte Induktionsschleifen und die Messung der Fahrzeit zwischen den beiden möglich, [AG99].

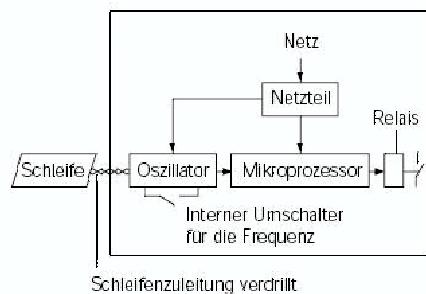


Abbildung 11.2: Verschaltung einer Induktionsschleife [AG99]

³relative Temperaturdifferenz zur Umgebung

⁴Spule

⁵Kondensator

Magnetfeld-Detektoren

Diese Sensorart ist eine relativ neuen Entwicklung. Sie beruht auf der Tatsache, dass elektrische und ferromagnetische Gegenstände das Erdmagnetfeld⁶ verzerrten. Diese Verzerrung kann man berührungslos und über große Entfernnungen hinweg messen. Als Massenprodukte sind derzeit Sensoren, die auf den Prinzipien der Hall-Sonden, Fluxgates und Magnetowiderstandselementen beruhen, kommerziell erhältlich. Diese können unter Umständen bis in den Picotesla-Bereich⁷ messen. Sie sind extrem klein, robust und haben bei minimalem Wartungsaufwand und kleinem Stromverbrauch eine sehr große Lebensdauer. Sie werden durch Dunkelheit, Witterung und Schmutz nicht beeinträchtigt und können ob ihrer Größe überall leicht angebracht werden. Mit ihnen ist eine Aussage über Anwesenheit und Klasse des Fahrzeugs möglich. [dS02] [rnUH02].

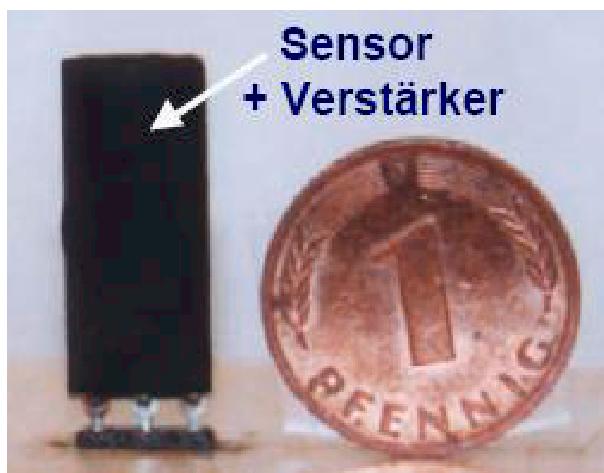


Abbildung 11.3: Magnetfeldsensor [rnUH02]

Radar

Zur Fahrzeugerfassung sendet und empfängt der Detektor Mikrowellen mit einer Frequenz von 24,125 GHz. Ein sich im Empfangsbereich des Detektors bewegtes Fahrzeug reflektiert die Welle und bewirkt aufgrund des Doppler Effekts eine Frequenzverschiebung. Diese wird gemessen und mittels FFT analysiert, um Aussagen über Geschwindigkeit und Länge, bzw. Klasse, des Fahrzeugs treffen zu können.

Das Hauptproblem ist hierbei, dass nur bewegte Objekte detektiert werden können. Ansonsten ist der Sensor resistent gegenüber Umgebungsveränderungen.

⁶ 10^{-5} Tesla

⁷ 10^{-12} Tesla

Infrarot

Die Detektion beruht hier auf dem Prinzip der kontaktlosen Temperaturmessung. Das bedeutet die Wärmestrahlung der Wellenlänge 8 - 14 μm wird passiv aufgenommen. So zeichnet sich, wie in Abbildung 11.4 zu sehen, ein warmes Auto vor dem kälteren Hintergrund ab. Dieses kann dann als Solches erkannt werden.

Bei dieser Sensorart ist eine Selbstkalibrierung besonders wichtig, da sich die Umgebungs temperatur ständig ändert. Aber auch Regen und Nebel beeinflussen die Messung. Durch intelligente Software kann der SNR deutlich erhöht werden.

Es ist mit dieser Methode möglich neben Fahrzeugen und deren Geschwindigkeit auch Fußgänger zu detektieren. Des Weiteren ist eine Aussage über eine längere Anwesenheit eines stehenden Fahrzeugs möglich. [Tri00]



Abbildung 11.4: Infrarotbild eines Fahrzeugs

Video

Die Verkehrsüberwachung mit Hilfe einer Videokamera ist einerseits eine der einfachsten, andererseits aber eine der schwierigsten Arten der Fahrzeugdetektion. Sie kann einerseits manuell, wie in bestehenden Systemen, erfolgen, andererseits vollautomatisch mit Methoden der Mustererkennung. Als Beispiele für diese Methoden sind Hidden Markov Modelle und Neuronale Netze zu nennen. Diese versuchen Objekte, wie in Abbildung 11.5 zu sehen, aus einer Szenerie zu extrahieren um deren Verhalten zu analysieren. Die Analyse kann hierbei unter Einbeziehung der Daten mehrerer Sensoren erfolgen.

Man versucht das menschliche Sehen zu imitieren und die Gesamtsituation auf der Kreuzung als solche zu erfassen. Allerdings sind heutige Systeme noch nicht in der Lage, ein Ersatz für den Menschen hinter dem Bildschirm zu sein, aber in Zukunft wird diese Art der automatischen Überwachung zunehmend an Bedeutung gewinnen.



Abbildung 11.5: Objektextraktion einer Verkehrsszenerie

11.3.2 Mobile Sensoren

Polizeistreife

Die funktechnisch organisierten Einheiten der Polizei waren und werden immer ein wichtiger Bestandteil eines Verkehrsleitsystems sein. Mit ihnen ist es möglich menschliche Beobachter schnell und effizient an Kriegenstellen zu bringen, die vor Ort eine genaue und detaillierte Lagebeschreibung abgeben können. Heute werden noch ein Großteil der Radioverkehrsmeldungen aufgrund der Beobachtungen von Funkstreifen erstellt.

Floating Car Data

Bei der Datenerfassung mittels Floating Car Data⁸ wird die Verkehrslage mittels einer relativ kleinen, im Verkehr mitfließenden Stichprobe bestimmt. Die Fahrzeuge dieser Stichprobenflotte sind mit je einem GPS und GSM Modul ausgestattet, um ihre aktuelle Position und Geschwindigkeit kontinuierlich an eine Zentrale senden zu können. Aufgrund dieser Daten wird die Fahrzeit des Fahrzeugs zwischen zwei definierten Punkten, z. B. zwei Lichtsignalanlagen, direkt bestimmt. Diese Größe ist für die Verkehrssituation ausschlaggebend und kann hier ohne umständliche Berechnungen direkt bestimmt werden. Um die Verkehrslage in einer Großstadt zu bestimmen, reicht es aus, wenn nur ca. 1% der Fahrzeuge als FCD Sensoren fungieren, da 100 Autos ca. 1000 km Straße pro Stunde abdecken. Diese Sensorfahrzeuge können z.B. Taxis, Busse und Polizeifahrzeuge sein. Allerdings muss man bei vielen gleichartigen Fahrzeugen eine gewisse Verzerrung der Meßdaten beachten, die aber in der Zentrale mathematisch korrigiert werden kann. Die FCD ist eine der elegantesten, dynamischsten und flexibelsten Arten die Verkehrslage

⁸FCD

einer Stadt zu erfassen und wird in zukünftigen Systemen sicher eine große Rolle spielen. [AG04] [Hub03]

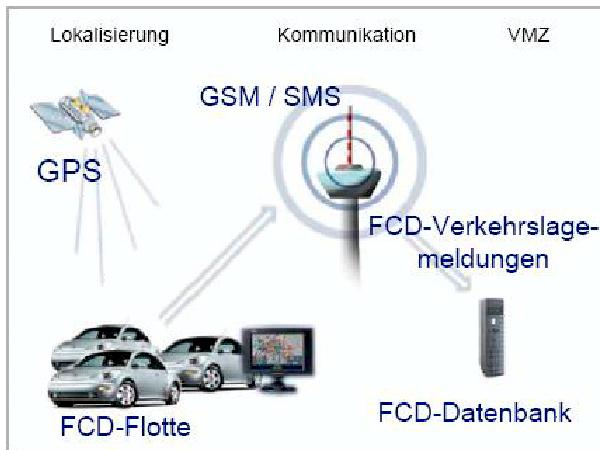


Abbildung 11.6: Prinzip der FCD [AG04]

11.4 Medien

Die hier besprochenen Medien dienen dazu, die Leitstellenentscheidung an die Verkehrsteilnehmer zu kommunizieren. Sie sollten leicht, intuitiv und international verständlich sein, da auch Durchreisende von ihnen profitieren wollen. Es darf keine Störung des laufenden Verkehrs auftreten und der Fahrer sollte nicht besonders stark vom Steuern des Fahrzeugs abgelenkt werden. Die übermittelten Informationen dürfen nur als Zusatz dienen, d. h. die Verkehrssicherheit muss bei Ausfall des Systems immer noch gewährleistet sein.

11.4.1 Wechselschilder

Mit der Anbringung von Wechselschildern werden bestehende Systeme nur erweitert und können weiter genutzt werden. Sie sind international standardisiert und verständlich, da sie meist Piktogramme verwenden. Da an den Fahrzeugen sind keine speziellen Endgeräte nötig sind, steht die Verfügbarkeit voll unter der Kontrolle der Verkehrsleitzentrale. Man spricht hier von einer kollektiven Information, da die Meldung nicht an einzelne Empfangsgeräte geht.

Die Schilder sollten weit und oft genug vor Entscheidungsstellen angebracht werden, um den Verkehrsfluss sanft zu lenken und keine abrupten Lenkmanöver zu provozieren.

Es gibt eine Reihe von technischen Realisierungsmöglichkeiten für Wechselschilder, z. B. LCD, Kippelemente und Leuchtdioden, um nur einige zu nennen.



Abbildung 11.7: Wechselschild [hs1a]

11.4.2 Funkbasierte Medien

Verkehrsfunk

Das Verkehrsfunk-System existiert seit längerem und wird deshalb von vielen Autofahrern vor Reiseantritt als Informationssystem über die geplante Route genutzt. Die Abdeckung der benötigten Endgeräte, sprich Autoradios, ist nahezu 100%.

Trotzdem ist das System für moderne Verkehrsleitsysteme eher ungeeignet. Die Aktualität und die Ausstrahlungsfrequenz - minimal alle viertel Stunde - sind viel zu niedrig um schnell auf Veränderungen zu reagieren. Es eignet sich mehr um einen sehr groben Überblick der Lage auf den Fernstraßen zu erhalten.

Radio Data Systems/Traffic Message Channel (RDS/TMC)

Dieses System ist eine Erweiterung zum bestehenden Verkehrsfunk. Die Daten werden hierbei auf einen eigenen Funkkanal, parallel zum normalen Radio versendet. Sie sind also kontinuierlich verfügbar und werden erst im Endgerät, d. h. im Fahrzeug selber, verarbeitet.

So ist es möglich, eine Anzeige oder Ausgabe in der jeweiligen Sprache des Fahrers zu ermöglichen. Auch eine direkte Einspeisung in private Navigationssysteme ist möglich. Allerdings eignet sich das System eher zur Meldung von Störungen auf Fernstraßen, da die kleinste Quantisierungsstufe „ein Kilometer zähfließender Verkehr“ ist. Ein weiteres Manko sind die unbedingt benötigten Endgeräte.

GSM/SMS/Mehrwertdienste

Auf Basis dieser Systeme gibt es eine Vielzahl, meist lokaler, Verkehrs-Informationsdienste. Diese reichen von so genannten „Newslettern“ der Radiostationen oder des ADACs bis

zu Mehrwertdiensten des Toll-Collect Konsortiums. Ob der Vielzahl soll hier nicht näher darauf eingegangen werden.

11.5 Verarbeitung

In diesem Abschnitt soll die Rechnergestützte Verarbeitung der Sensordaten zu Steuerentscheidungen für eine Großstadt schematisch (vgl. Abbildung 11.8) beschrieben werden. Zuerst erstellt man aus digitalen GPS-Karten und Informationen über den öffentlichen Nahverkehr ein Netzmodell der Stadt. Dieses Modell enthält den Verlauf und die Kapazitäten aller Straßen auf dem Stadtgebiet. In neueren Systemen werden auch die Fahrpläne der Busse und Straßenbahnen im Modell berücksichtigt.

Dieses Netzmodell wird aufgrund der Verkehrsdaten, aufgenommen durch statische und mobile Sensoren, in einen Netzzustand gebracht, der die aktuelle Verkehrslage repräsentiert. Die anschließende Modellierung der zu erwartenden Verkehrsflusses erfolgt unter Einbeziehung von:

- Besonderen Begebenheiten: z. B. Stau, Unfall, Konzert, Bladenight
- Wetter: z. B. Sturm, vereiste Straßen
- Historie: Wie hat der Verkehr in dieser Situation früher reagiert
- Expertenwissen: Mathematisch nicht erklärbare psychologische Effekte

Aufgrund der oben genannten Daten wird eine Verkehrsflussmatrix erstellt. Diese wird mit der vorhandenen Kapazitätsmatrix verrechnet, um Steuerentscheidungen zu treffen. Diese Entscheidungen werden dann via den beschriebenen Medien an die Verkehrsteilnehmer weiter geleitet.

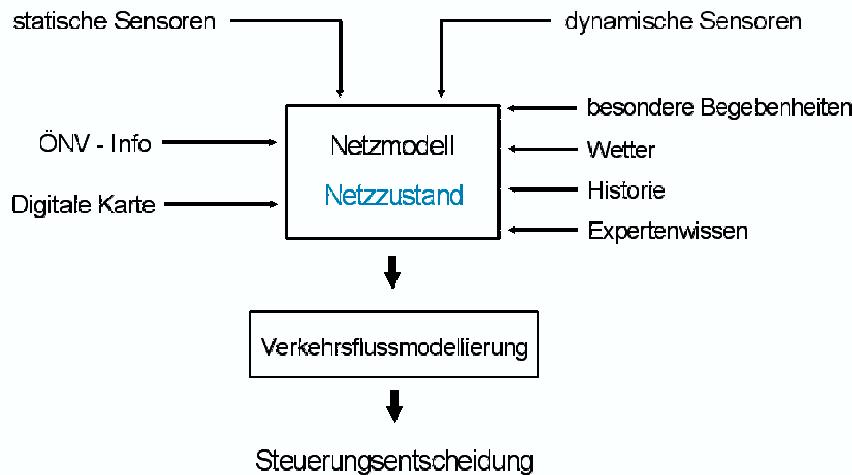


Abbildung 11.8: Schematische Verarbeitung der Verkehrsdaten

11.6 Beispiele

11.6.1 Verkehrs-Management-Zentrale Berlin

Die Stadt Berlin hat in den letzten Jahren eine für die Bürger sehr komfortable Verkehrs-Management-Zentrale aufgebaut. Die Verkehrsdaten werden hier mit einem Gemisch an statischen und mobilen Sensoren gesammelt, deren Hauptbestandteil die Taxiflotte Berlins ist. Die, durch die gleichartigen Fahrzeuge entstandene, Verzerrung der FCD Daten wird in der Zentrale korrigiert. So muss beachtet werden, dass Taxis öfter auch ohne Stau anhalten und spezielle Spuren benutzen können, um schneller als der restliche Verkehr voran zu kommen.

Die Verkehrsdaten können online abgerufen werden. Aber es wird nicht nur die aktuelle Lage angezeigt, sondern es ist auch möglich sich eine Prognose für den nächsten Tag, zu einer bestimmten Uhrzeit berechnen zu lassen (vgl. Abbildung 11.9). Darüber hinaus ist eine Navigation unter Einbeziehung der aktuellen Daten möglich. An Bau- und Unfallstellen kann leicht überprüft werden, wieviel Stau sich jeweils schon gebildet hat.

Auch ein Empfang der neuesten Störmeldungen per SMS ist möglich. Abgerundet wird das Ganze durch Einbeziehung der ÖNV Daten. So können Verspätungen und Fahrpläne von S-, U- und Straßenbahnen komfortabel über das selbe Portal abgerufen werden [hs1b].

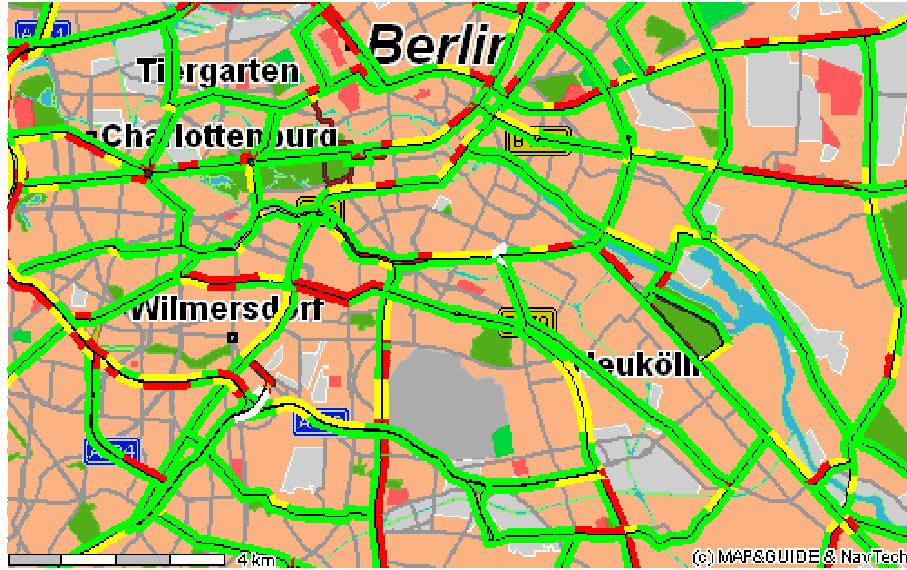


Abbildung 11.9: Verkehrsprognose für Berlin 20.06.04 09:00 Uhr [hs1b]

11.6.2 Traffic Dialog System (TDS)

Dieses u.a. von Daimler-Chrysler betriebene System, geht einen sehr eleganten Weg des Verkehrsinformationsmanagements. Auch hier erfolgt die Datenerfassung per FCD, mit dem simplen Trick, dass jedes teilnehmende Fahrzeug gleichzeitig Sensor und Empfänger

ist. Die speziellen Endgeräte senden ständig die von ihnen gesammelten Verkehrsdaten an eine Zentrale. Diese verarbeitet die Daten und berechnet die, unter Berücksichtigung der aktuellen Lage, optimale Route für das entsprechende Fahrzeug.

Für die Aktualität der Verkehrslage reicht es aus, wenn nur 1% der Fahrzeuge mit einem solchen System ausgestattet sind. Noch ist die Nutzung des Systems frei, doch soll es als Mehrwertdienst von Toll-Collect eingesetzt werden und wird dann sicher gebührenpflichtig. [hs1c]

Literaturverzeichnis

- [AG99] Bircher Reglomat AG. Schleifeneinbau Induktionsschleife, 1999.
- [AG04] M-Tech AG. Dynamisches Vehrkehrsmanagement Stuttgart, 2004.
- [dS02] Universität des Saarlandes. Kurzexposé zum Traffic-Sensor, 2002.
- [hs1a] www.viaberlin.de.
- [hs1b] www.vmzberlin.de.
- [hs1c] www.daimlercryslerervices.de.
- [Hub03] Signalbau Huber. Mobile Verkehrsdatenerfassung, 2003.
- [rnUH02] Prof. Dr. rer. nat. Uwe Hartmann. Der Traffic-Sensor, 2002.
- [Tri00] Weiss-Electronic GmbH Trier. Infrarot-Detektoren IRD 1001, 2000.

Kapitel 12

Mautsysteme

12.1 Einleitung

12.1.1 Ziele einer Maut

Es gibt viele Gründe für eine Mauteinführung.

Häufig wird mit einer Maut eine **Verkehrslenkung** beabsichtigt (z.B. City-Maut). Hierbei wird der Effekt genutzt, dass mautpflichtige Straßen aus Kostengründen eher gemieden werden als nicht-mautpflichtige.

Damit wird eine Reduktion sowie eine Beschleunigung des Verkehrs erreicht.

Dabei sollte man aber auch bedenken, dass sich der Verkehr dafür an anderen Stellen verdichten könnte (z.B. Parallelstraßen oder Außenbereiche).

Ein weiterer Grund für eine Mauteinführung ist der **Gerechtigkeitsgedanke**.

So beteiligen sich ausländische Verkehrsteilnehmer höchstens nur indirekt über die Mineralölsteuer an den Infrastrukturkosten eines Landes. Extremes Beispiel für einen solchen Missstand sind typische Transitländer wie Österreich, wo Routen wie der Brenner zeitweise fast mehr von ausländischen Fahrern benutzt werden als von inländischen.

In Deutschland ist auch zu bedenken, dass der Bau von Bundesstraßen und Autobahnen im Aufgabenbereich des Bundes liegt und somit kein Zugang zu den Kfz-Steuereinnahmen besteht (welche eine Ländereinnahme ist).

Eine Antwort auf diesen Missstand ist die Einführung einer generellen Autobahnmaut wie man sie in vielen Ländern vorfindet (Österreich, Frankreich, etc. ...). Diese hat allerdings den Nachteil, dass nun auch einheimische PKW-Fahrer, die ja Kfz- und Mineralölsteuer bezahlen, zusätzlich belasten werden, obwohl ihr Anteil an den Schäden auf der Autobahn recht gering ist.

Dabei ist zu bedenken, dass ein PKW bis zu 4x weniger Schaden auf einer Straße anrichtet als ein über 12 t schwerer LKW.

Deshalb setzt sich EU-weit immer mehr die LKW-Maut durch. Diese Form Maut zielt direkt auf den kommerziellen Schwerlastverkehr ab. Dabei kann sie wie in der Schweiz und Lichtenstein landesweit auf alle Straßen, – oder wie in Deutschland und Österreich –, nur auf Autobahnen erhoben werden.

Private Bauprojekte können ein weiterer Grund dafür sein, dass man auf einer Straße plötzlich einem Mauthäuschen gegenübersteht.

Hier ist es dann meistens so, dass aufwendige Projekte wie Brücken, Tunnel oder komplizierte Autobahnabschnitte von einem privaten Unternehmen finanziert und betrieben werden.

12.1.2 Generelle Mautarten

Man kann zwischen zwei generellen Arten von Maut unterscheiden.

Bei der **Zeitzugangsmaut** erwirbt der Fahrer über einen bestimmten Zeitraum hinweg die Berechtigung eine Straße zu benutztten.

Diese Form der Maut wurde früher mit einer Vignette erhoben, welche an der Windschutzscheibe des Autos befestigt wurde.

Vorteil dieses Systems ist es, dass es sehr schnell eingeführt werden kann und das die Kosten für Einführung, Erhebung und Kontrolle sehr gering sind.

Nachteile sind, dass diese Maut ungerecht ist, da sie Vielfahrer genauso stark belastet wie Gelegenheitsfahrer und dass eine Kontrolle nur stichprobenartig erfolgen kann.

Dagegen ist die **Streckenbezogene Maut** eine gerechte Maut.

Hierbei richtet sich der zuzahlende Betrag nach der Entfernung die zurückgelegt wurde.

Die alte Methode um diese Maut zu erheben sind die Mauthäuschen, welche die Autobahn entweder in Abschnitte aufteilen oder sich an allen Aus- und Auffahrten befinden.

Dieses (alte) System hat den Nachteil, dass der Aufwand für den Aufbau mit der Größe des Streckennetzes wächst und dass künstlich jede Menge neue Stauquellen in ein Straßennetz hinzugefügt werden.

Auch sind bei Hochlohnländern wie Deutschland die Kosten für Personal nicht zu vernachlässigen.

Vorteil bei dem alten System ist allerdings, dass eine lückenlose Kontrolle möglich ist.

12.1.3 Moderne Anforderungen an ein Mautsystem

Um die Staugefährdung zu minimieren sollten moderne Mautsysteme ein sog. „**Free – Flow**“ Systeme sein.

Bei einem solchen System findet die Erhebung und die Kontrolle der Maut bei fließenden Verkehr statt.

Die Entscheidung, - „Streckenbezogene-“ oder „Zeitbezogene Maut“ – , hängt natürlich von der Größe des Mautpflichtigen Bereichs ab.

Aus Gerechtigkeitsgründen aber sollte das System ab einer best. Größe eine km-genaue Abrechnung der Maut ermöglichen.

Flexibilität wird im 21. Jahrhundert groß geschrieben.

Demnach sollte einem das moderne Mautsystem mehrere Zugangsmöglichkeiten eröffnen. Denkbar wären hier eine Anmeldungen per Internet, Telefon, SMS, Post, Serviceterminals oder eine Abrechnung mit Hilfe einer sog. On-Bord-Unit welche man im Wagen mit sich führt.

Das Mautsystem der Zukunft sollte aber auch für den Betreiber flexibel gestaltet sein. So sollten Strecken dem mautpflichtigen Streckennetz problemlos, schnell und Kosten sparend hinzu- bzw. entfernt werden können (ggf. auch zeitabhängig).

Im Zuge der stetigen Standardisierung innerhalb der Europäischen Union sollten neue Systeme auch darauf achten, dass sie ausländische Fahrer nicht diskriminieren (z.B. mittels einer Einbaupflicht für eine teure On-Bord-Unit).

Da die neuen Mautsysteme aber eben oft auf diesen teuren On-Board-Units basieren (z.B. Deutschland & Schweiz), ist **Kompatibilität** ein weiterer wichtiger Punkt.

Bei der LKW-Maut gilt EU-weit deshalb schon jetzt folgende Richtlinie :„Die Mautsysteme sind Ländersache, sie müssen aber kompatibel untereinander sein...“.

Somit müssen neue Mautsysteme nicht nur für ihre eigene Technik ausgelegt sein, sondern

auch bedenken, dass „fremde“ Technik in Form einer ausländischen On-Board-Unit sich in ihr System einloggen will.

12.2 City-Maut in London

12.2.1 Die Ausgangslage



Abbildung 12.1: Verkehr vor 100 Jahren und ohne City-Maut...

Anfang dieses Jahrhunderts leidete die Hauptstadt Englands unter einem enormen Verkehr, der besonders das Zentrum um Tower-Bridge, Parlament und Buckingham Palace heimsuchte.

Allein im Innersten Bereich der Stadt (21 km²) machten in der Hauptverkehrszeit zwischen 7.00 und 18.30 Uhr 250.00 Autos rund 450.000 Bewegungen.

Dabei herrschte eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 8 mph welche die selbe war wie vor 100 Jahren, also als Pferde noch das bevorzugte Verkehrsmittel waren (Bild 12.1).

Zudem wurde berechnet, dass man pro km eine Verspätung von 2,3 min miteinkalkulieren muss.

Gleichzeitig wurde der Zustand des mit am ältesten U-Bahnnetzes der Welt immer schlechter und auch der öffentliche Busverkehr konnte nicht mehr pünktlich seine Fahrpläne einhalten.

Deshalb wurde schließlich 2001 die Einführung einer City-Maut um das Zentrum Londons herum beschlossen.

Ziel war es, den Verkehr zu reduzieren und gleichzeitig die Serviceleistungen des öffentlichen Nahverkehrs zu verbessern.

Außerdem sollten durch die erhoffte Verkehrsreduzierung Dienstleistungen und Güterverkehr endlich wieder effizienter und planbarer werden. Die beschlossene City-Maut sollte sich auf dem oben genannten 21 km² großen Bereich beschränken und sie sollte nur zu der Hauptverkehrszeit (7.00 – 18.30 Uhr) erhoben werden.

12.2.2 Die technische Lösung

In London wurde ein Mautsystem aufgebaut, welches rein auf Bildverarbeitung basiert. Dazu wurde rund um den mautpflichtigen Bereich ein „Ring of Steel“ mit über 800 Farb- und Mono CCD- Kameras gebildet. Jede Straße die einen Zugang zur kostenpflichtigen Zone darstellt besitzt eine Mautbake, auf der sich sowohl Kameras für den hineinfließenden Verkehr als auch für den hinausfliessenden Verkehr befinden.

Dabei wird jede Fahrspur immer von einer Kamera überwacht.

Passiert nun ein Fahrzeug eine solche Mautbake (es betritt nun den mautpflichtigen Bereich...), so wird das Fahrzeug fotografiert.

Dieses Foto wird nun digital signiert, verschlüsselt und zu einem Zentralrechner geschickt der sich innerhalb der mautpflichtigen Zone befindet. Dieser leistungsstarke Rechner führt nun eine sog. „Automatic Number Plate Recognition“, (ANPR) durch .

Ist nun das Nummernschild erfolgreich erkannt worden, so fragt der Zentralrechner darauf die Datenbank des Mautsystems ab, ob sich ein Wagen mit diesem Nummernschild für diesen Tag angemeldet hat.

Diese Datenbank mit den Kundendaten befindet sich dezentral auf zwei weiteren Rechnern außerhalb der mautpflichtigen Zone.

Wird ein entsprechender Eintrag gefunden, so wird das Foto gelöscht. Kann das Nummernschild nicht gefunden werden oder ist die Nummernschilderkennung fehlgeschlagen (weniger als 10% der Fälle), so werden die Bilder gespeichert und für eine manuelle Bearbeitung bereitgehalten.

12.2.3 Der Zugang

Um straffrei in Londoner Zentrum mit seinem Auto zu verkehren hat der Anwender mehrere Möglichkeiten sich am System anzumelden.

Er kann dies per Telefon, per SMS , an Serviceterminals, bei ausgesuchten Supermärkten und Kiosken, per Internet oder schriftlich mit der guten alten Post tun.

Die Gebühr pro Tag beträgt dabei 5 Britische Pfund.

Angeboten werden natürlich auch gleich ganze Monats- oder Jahrespakete.

Sollte man unerwartet tagsüber dringend in die Stadt wollen, so stellt das bei diesem System kein Problem dar. Der Anwender kann straffrei in die mautpflichtige Zone „eindringen “,- wichtig dabei ist es aber ,dass er spätestens bis 22.00 Uhr des selben Tages die fällige Gebühr begleicht.

Anwohner die in der mautpflichtigen Zone wohnen bekommen begünstigte Tarife.

Krankenwagen, Polizei, Feuerwehr etc. sind von der Mautpflicht befreit.

12.2.4 Der Erfolg

Im ersten Jahr nach der Mauteinführung wurde eine Reduktion des Verkehrs um 20% festgestellt.

Von diesen 20% weichen 30% auf den äußeren Bereich aus und 60% benützen jetzt Bus oder U-Bahn.

Zudem wurden 30% weniger Zeitverluste festgestellt und Busse kommen wieder pünktlicher. Zurzeit ist ein Ausbau zu einem noch größer Bereich hin geplant.

Dabei würde es Verbindungsstraßen geben die zwar durch den mautpflichtigen Bereich führen, aber nicht mautpflichtig sind.

Dies und die Tatsache, dass jetzt noch mehr Straßen überwacht werden müssen zwingen das System natürlich dazu noch leistungsfähiger zu werden.

12.3 LKW-Maut in Deutschland

12.3.1 Einleitung

Um endlich nun auch in Deutschland ausländische und inländische LKW- Fahrer an den Kosten für Instandhaltung und Ausbau des deutschen Autobahnnetzes stärker zu beteiligen, wurde eine LKW-Maut für Lkws mit einem zulässigen Gesamtgewicht von über 12 t beschlossen welche die bisher eingesetzte Eurovignette ablösen sollte.

Dieses neu zu entwickelnde System sollte vor allem eine km-genaue Abrechnung der Maut ermöglichen und ein Free-Flow System (siehe oben) sein.

Nach einem umstrittenen Vergabeverfahren welches, hier nicht nähere dokumentiert werden soll, wurde schließlich ein satellitengestütztes Mautsystem in Kombination mit der GSM- Mobilfunktechnik beschlossen.

12.3.2 Die Theorie

Das Konzept der beauftragten Firma Toll-Collect (je 40% DaimlerChrysler & dt. Telekom, 20% Cofi Route) klingt im ersten Augenblick einfach und ließ sich auch in kurzen Werbevideos gut erklären.

Zentraler Bestandteil sind die sog. On-Bord-Units (ab jetzt nur noch OBUs...), welche sich jeder LKW-Fahrer in seinem Fahrzeug einbauen lassen sollte. Diese OBUs würden nun mit Hilfe ihrer per GPS ermittelten Weltkoordinaten entscheiden ob sich das Fahrzeug auf einer mautpflichtigen Straße befindet und dann die dort zurückgelegten Streckenkilometer per Mobilfunk (SMS/ GSM-Standard) an die Zentrale von Toll-Collect verschicken, welche dann den entsprechenden zuzahlenden Betrag berechnet und dies an den Kunden weiterleitet.

Durch Nutzung der GPS Technik sollte ein teurer Aufbau von zahlreichen Mautbaken oder Mauthäuschen an Deutschlands 12.000 km langen Autobahnnetz verhindert werden. Zudem wäre das System sehr flexibel, da problemlos neue Strecken hinzugefügt oder entfernt werden könnten und auch ein Ausbaug zu einer generellen PKW-Maut scheinbar nichts im Wege stehen würde.

Auch zusätzliche Features wie Flottenmanagement oder Verkehrsregulierung wären mit

der Kombination von GPS und GSM möglich.
Aber soweit die Theorie ...

12.3.3 Problem 1: Der Zugang

Der Zugang zum deutschen Mautsystem sollten die OBUs der Firmen Siemens und Grundig sein.

Diese OBUs kosten in der Herstellung insgesamt ca. 500 EURO. Sie werden dem Spediteur nur geliehen und er kann sie sich nur bei einer Vertragswerkstatt von Toll-Collect ein- bzw. ausbauen lassen.

Der Einbau kostet dabei 250 EURO und zusätzlich müssen zu Anfang an gleich 300 EURO in Form eines Startguthabens bezahlt werden, welches der Fahrer dann abfahren kann.

Genau dieser komplizierte und teure Einbau stellt ein erstes Problem dar.

Aufgrund der hohen Kosten kann für die OBU keine generelle Einbaupflicht durchgesetzt werden, weil es sonst zu Wettbewerbsverzerrung innerhalb Europas kommen würde oder sich ärmere Spediteure den Einbau schlichtweg nicht leisten könnten.

Also musste eine Alternative geschaffen werden , - das Duale System war geboren.

Mittels Internet und ca. 3500 Serviceterminals an Autohofen und Tankstellen kann sich nun jeder Fahrer sozusagen für einen bestimmten Zeitraum eine Strecke durch Deutschland mieten.

Dazu muss er neben seinem Zulassungsland, seiner Schadstoffschadensklasse und Kfz-Zeichen auch noch den genauen Beginn der Nutzung (Tag, Std., Min.) sowie die genaue Autobahnauf- und Abfahrt angeben.

Das System berechnet daraufhin die kürzeste Route und legt dann selbst den Nutzungszeitraum fest (berücksichtig dabei Zeit für Pause, Staus, etc.).

Die berechnete Route kann dabei noch mal manuell bis zu 4x modifiziert werden.

Nach dem alles erfolgreich eingegeben wurde erhält der Fahrer eine schriftliche Bestätigung, mit deren Hilfe er dann ggf. auch die gebuchte Fahrten wieder stornieren kann.

12.3.4 Problem 2: GPS

Das amerikanische GPS bietet für die zivile Nutzung eine Genauigkeit von ca. 10m an.

Diese 10m sind nun für die GPS-Lösung von Toll-Collect ein Problem.

Es gibt dabei jetzt zahlreiche Sonderfälle zu berücksichtigen .

Was machen, wenn eine Straße parallel zur Autobahn verläuft ?

Was ist mit Straßen die unter einer Autobahnbrücke entlanglaufen ?

Des Weiteren braucht man zur GPS-Nutzung immer eine direkte Sichtverbindung zum Satelliten.

Für Schiffe und Flugzeuge in der Regel kein Problem , - was aber ist mit Tunneln und Brücken ?

Ein weiteres Problem stellen Abstrahlungen von hohen Objekten wie Häusern dar. Diese Mehrfachreflexionen des GPS-Signals verfälschen den GPS-Empfang.

Um diesen Problemen entgegenzutreten macht Toll-Collect nun folgendes:

An allen kritischen Stellen werden zusätzliche Infrarotsender (DSRC/ geringe Reichweite) aufgestellt, die mit einer sich nähernden OBU kommunizieren und so die Aufrechterhaltung des System gewährleisten sollen.

Anhand den OBU-Fehlermeldung letzten Jahres („Berechnet Maut auf mautpflichtiger Straße“ & „Berechnet keine Maut auf Autobahnen“) kann man sich denken , dass das noch nicht so richtig funktionierte.

Ein weiteres Problem stellen sog. GPS-Jammer dar.

Durch die große Entfernung der GPS- Satelliten ist das GPS-Signal äußerst schwach. Da die Frequenz dieses Signals bekannt ist, kann man sich einfach einen Störsender bauen der auf der selben Frequenz sendet und man legt den Empfang in einem nicht kleinen Umkreis flach.

Die fatale Folge: Sämtliche Trucke im Störbereich fahren auf einmal schwarz.

Das amerikanische Militär versucht solchen Störsendern zum Beispiel so entgegenzutreten, dass sie ihre sog. Smart-Bombs so programmieren das sie bevorzugt GPS-Signale von oben berücksitigen.

Toll-Collect geht diesem Problem bisher meistens mit dem Argument entgegen, dass es in Deutschland verboten ist solche Störsender einzusetzen..... .

12.3.5 Problem 3: Die Kontrolle

Zentraler Bestandteil eines jeden Mautsystems stellt die Kontrolle dar. Bei Toll-Collect gibt es nun 3 mögliche Kontrollarten:

Die automatische Kontrolle über Mautbaken, die stationäre Kontrolle ,- eine Kombination von Mautbaken und Aufsichtspersonal, und die mobile Kontrolle.

Für die **automatische Kontrolle** wurden an Deutschlands Autobahnen ca. 300 Mautbaken der Firma Vitronic aufgestellt (Auftragsvolumen ca. 100 Mio. EURO).

Bei dieser Menge von Brücken und mit der Gesamtlänge des deutschen Autobahnnetzes von 12.000 km (einfach) ergibt sich daraus, dass man im Schnitt alle 80 km eine solche Mautbake auf der Straße begegnen wird.

Diese Brücken beobachten jedes sich nähernde Fahrzeug und prüfen, ob es sich um ein mautpflichtiges Fahrzeug handelt (Umrißscan).

Ist dem so, dann wird die Mautbake versuchen mit der OBU des LKW Kontakt aufzunehmen. Sollte der betroffene LKW nun eine funktionsfähige OBU haben, dann sendet diese der Mautbake ihre fahrzeugspezifische Daten wie z.B. das Kfz-Zeichen. Die Mautbake überprüft diese Daten indem es das Fahrzeugkennzeichen überprüft (OCR /„Object Character Recognition“) und das Fahrzeug 3-dimensional vermisst.

Stimmen die Daten der OBU mit denen der Mautbake überein, so werden alle zuvor gemachten Aufnahmen gelöscht ,–der LKW hat die Prüfung bestanden.

Sollte der LKW nun keine OBU haben, dass heißt, keine OBU antwortete bei dem Versuch der Kontaktaufnahme durch die Mautbake, so nimmt sie trotzdem sämtliche Messungen vor und nimmt nun per ISDN oder GSM-Funk mit dem Zentralcomputer von Toll-Collect

Kontakt auf.

Hier wird nun geprüft, ob ein Fahrzeug mit dem und den Kennzeichen und entsprechender Größe zu diesem Zeitpunkt und an diesem Ort berechtigt ist zu fahren.

Wird eine entsprechende Einbuchung gefunden, so hat der LKW- die Prüfung bestanden. Ansonsten werden die gemachten Fotos verschlüsselt und bis zur manuellen Überprüfung abgespeichert.

Die Capture Rate, also der Prozentsatz bei dem dieses System erfolgreich arbeitet, liegt nach Angaben von Toll-Collect bei über 90% .

In der Schweiz, wo ein ähnliches System erfolgreich arbeitet, liegt die Erfolgsrate mit einer eingebauten OBU bei 93%, ohne OBU allerdings nur bei 77%.

Soweit so gut , - aber auch hier gibt es Probleme:

Aus Datenschutzrechtlichen Gründen ist nur eine stichprobenartige Kontrolle der Maut erlaubt. Nicht alle Mautbrücken werden also „scharf“ sein. Toll-Collect hat sich dazu verpflichtet lediglich 7 Mio. LKWs im Jahr mit der automatischen Kontrolle zu überprüfen. Des Weiteren ist zu bedenken, dass Toll-Collect bei Ausfall des amerikanischen GPS (z.B. die USA führen Krieg...) als Fall-Back Lösung das gesamte System über Internet/ Serviceterminals und Mautbaken laufen lassen will.

Aus diesem Grund und wegen der oben vorgestellten Features der Mautbaken stellen Kritiker oft folgende Frage:

„Wenn das System auch ohne die teuren (bisher fehlerhaften) OBUs mit dem unsicheren GPS funktioniert , - wozu werden sie dann überhaupt angeboten ? “.

Da die Straffverfolgung von ausländischen Mautbrechern mit der automatischen Kontrolle mitunter schwierig bis unmöglich ist, wird es zusätzlich noch **stationäre und mobile Kontrollen** geben.

Diese Kontrollen unterstehen dem Bundesamt für Güterverkehr und sollen zusätzlich noch mal 3 Mio. LKWs im Jahr kontrollieren.

Diese Kontrollen werden dabei von über 500 ehemaligen Bediensteten von Post und Bahn durchgeführt.

Bei der stationären Kontrolle wird sich ein Überwachungsteam mehrere 100m hinter einer Mautbake positionieren. Dieses Team steht nun per Wireless-Lan mit einer Mautbake in Verbindung. Stellt diese einen Verstoß fest, so wird der Mautbrecher aus dem Verkehr herausgezogen und sofort belangt.

Bei den mobilen Kontrollen handelt es sich um über 270 Kontrollfahrzeuge die im fließenden Verkehr deutschlandweit LKWs überprüfen sollen.

Hat der betroffene LKW nun eine OBU, so fragt das fahrende Kontrollteam per (DSRC) Infrarotschnittstelle dessen gespeicherten Daten ab.

Dabei können Nummernschild, Achsenanzahl etc. direkt überprüft werden. Komplizierter wird es da mit der Überprüfung der Schadstoffschadensklasse. Diese soll bei gängigen Marken geschätzt werden. Ist das Team sich aber nicht sicher, so soll es mit ihrem mitgeführten Computer per GSM-Funk im Internet eine Onlinenachfrage beim Kraftfahrzeugbundesamt tätigen.

Sollte es sich bei dem strittigen Teilnehmer um ein ausländisches Fahrzeug handeln, so muss dieser dann doch aus den Verkehr herausgezogen werden und manuell (Fahrzeugschein) überprüft werden.

Sollte der entsprechende LKW keine OBU an Board haben, so nimmt das Team mit dem bereits weiter oben erwähnten Computer Kontakt mit dem Toll-Collect Rechner auf. Wie bei der automatischen Kontrolle per Mautbake wird nun im Zentralcomputer nach einer gültigen Einbuchung gesucht.

12.3.6 Problem 4: Rechtliche Probleme und Datenschutz

Dadurch dass das neue deutsche LKW-Mautsystem das erste Abrechnungssystem der Welt sein wird, welches Gebühren aufgrund von GPS-Daten erhebt, sind der Ausgang von möglichen Gerichtsverfahren schwer vorherzusagen.

Dabei werden die anfänglichen technischen Schwierigkeiten das Misstrauen gegenüber das neue System sicherlich nicht verringern.

Auch wird von Kritikern immer wieder das Thema Datenschutz angesprochen.

Hier seien zum einen die zentrale Speicherung von persönlichen Daten genannt. Durch die Menge an Schnittstellen und Übertragungswegen bietet das System dabei eine große Angriffsfläche für böswillige Geister.

Zum anderen kommt mit der OBU- Technik (GPS & GSM) und den Aufbau der Mautbaken bei vielen Leuten sicher ein Gefühl von „Big Brother is Watching You“ auf .

So wird zum Beispiel kritisiert, dass die OBU in unbekannten Abständen ohne Zutun des Fahrers Daten unbestimmter Menge und Inhalt an den Zentralcomputer sendet.

Darüber hinaus könnten die Mautbaken noch wesentlich mehr tun als nur die reine Überwachung der Maut.

Denkbar wären hier zum Beispiel das Aufspüren von Temposündern (mittels Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen zwei Baken) oder das Verfolgen von sonstigen Straftätern (per Nummernschildsuche).

Diese Funktionen sind zwar ausdrücklich noch nicht vorgesehen und erlaubt, doch wenn erstmal solche Systeme aufgebaut sind werden die Begehrlichkeiten der entsprechenden Behörden diesbezüglich sicherlich zunehmen.

12.3.7 Ausblick und Ursachenforschung

Der neue Starttermin der deutschen LKW-Maut wird der 01.01.05 sein.

Allerdings soll hier nur ein vorläufiges System funktionsfähig sein. Dazu werden momentan die so genannten OBU-1 Geräte ausgeliefert und eingebaut. Diese Geräte besitzen aber noch nicht alle technischen Features.

So werden Softwareupdates noch nicht möglich sein. Bei der Programmierung dieser Geräte wurde deshalb im Voraus versucht mögliche Streckenänderungen des mautpflichtigen Netzes (z.B. Baustellen) zu berücksichtigen.

Auch wird OBU-1 noch nicht die Möglichkeit besitzen sich in andere System wie das in

Österreich einzuloggen.

Ab 01.01.06. soll schließlich mit der so genannten OBU-2 ein voll funktionsfähiges System geben welches dann sämtliche versprochene Funktionen erfüllen kann.

Nachdem nun alle einzelnen Komponenten des deutschen LKW-Mautsystems mit ihren spezifischen Problemen vorgestellt wurden, soll hier noch kurz versucht werden zu ergründen warum bisher das Gesamtsystem immer noch nicht funktioniert.

Toll-Collect gibt hierzu zum einen immer wieder Probleme mit der Software der OBU an. Angesichts der Menge an Schnittstellen das dieses Gerät anbietet, ist dies besonders im Realzeitbetrieb nicht verwunderlich.

So kommuniziert es mit den Mautbaken, mit dem zusätzlichen Infrarotsender bei GPS-Empfangslöchern, mit mobilen Kontrollen , empfängt GPS-Daten, sendet berechnete Km-Distanzen per GSM(SMS) an Toll-Collect und kann von dort aus auch noch Softwareupdates empfangen.

Hier kann man sich nun spannende Worst-Case Szenarien ausdenken. Eine Variante: Die OBU empfängt ein Softwareupdate und durchfährt in diesem Moment eine Mautbake. Bevor das Update fertig ist versendet sie noch eine SMS gerade in dem Moment wo sie in einen Tunnel fährt etc.... .

Deshalb gibt Toll-Collect auch zu, die Komplexität des Systems sowie das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten völlig unterschätzt zu haben.

Ein weiters Beispiel dafür ist der Zentralcomputer. Auf ihn kommen mindestens genauso komplexe Szenarien zu. So muss er zum einem alle fahrenden OBUs in Deutschland managen sowie sämtliche Einbuchungen und Abfragen bearbeiten können.

Neben diesen technischen Problemen dürfen allerdings die organisatorischen Probleme des Systems nicht außer Acht gelassen werden.

So waren die angestrebten Zeiträume zum Aufbau dieses Systems von Anfang an völlig unrealistisch (ursprünglicher Starttermin 01.9.03 jetzt 1.06 für vollständiges System).

Von der Vergabe bis zum Ablieferungstermin sollten weniger als 2 Jahre vergehen, was man angesichts der Tatsache, dass man ein völlig neues System aufbauen wollte als ehrgeizig betrachten kann (zum Vergleich: Österreich brauchte für ihr „simples“ System mit bekannter und ausgereifter Technik fast 2 Jahre).

Zudem wurde bei der Vergabe ein System angeboten das nur einmal in einem sehr bescheidenen Rahmen erfolgreich getestet wurde.

Über die einzelnen Motive der Auftragnehmer und Auftraggeber während des Vergabeverfahren selbst wurde in den Medien sehr viel spekuliert.

Fakt ist, dass die Deutsche Telekom, an der der Bund ja immer noch stark beteiligt ist, einer der großen Gewinner ist, da ihr Kommunikationsnetz sehr stark benutzt wird (GSM, ISDN..).

Weiterer Gewinner ist der deutsche Vorzeiekonzern DaimlerChrysler. Dieser hatte schon in Voraus ein GPS- gestürztes Gerät entwickelt mit dem es Spediteuren Dienste für Flottenmanagement & Logistik anbieten wollte. Durch die OBUs besteht nun die Möglichkeit diese teuren Dienste in viele LKWs einbauen zu können. Toll-Collect betont zwar immer wieder, dass es selbst diese Dienste nicht anbieten wird. Die Auslegung der OBUs , die jetzt noch viele unprogrammierte Tasten besitzen, zeigt aber deutlich, dass bereits bei

der Entwicklung dieser Geräte an ganz andere Dinge gedacht wurden als nur an die reine Mauterfassung.

Zuletzt sei hier noch der Vertrag mit Toll-Collect erwähnt.

Besonders die Regelung der Vertragsstrafen führten zu den enormen Mautausfällen dieses Jahres. Dabei wurden vertraglich geringe Strafen ausgehandelt, gleichzeitig wurden die Einnahmen aber fest in den Bundeshaushalt verplant, was sich als folgenschwerer Fehler herausstellte.

12.3.8 Ein Alternatives System: LKW-Maut in Österreich

In Österreich ging man einen anderen Weg.

Hier wurde das (nur) über 2000 km große Autobahnnetz Österreichs mit Hilfe vieler Doppel- Mautbaken in Abschnitte unterteilt.

Die Mautabrechnung funktioniert über einen im LKW mitgeführten Transponder, der mit diesen Mautbaken per (DSRC)Mikrowellentechnik kommuniziert.

Diesen zigarettenschachtelgroßen Transponder (GO-Box/ 5 EURO) muss jeder Fahrer bei sich hinter die Windschutzscheibe befestigen. Einzugeben sind dabei nur die Anzahl der Achsen.

Erhältlich ist die GO-Box an über 220 Verkaufsstellen im In- und angrenzenden Ausland. Abgerechnet wird per Pre-Paid- oder per Post-Paid Verfahren.

Beim Pre-Paid Verfahren wird die GO-Box mit einem bestimmten Guthaben aufgeladen von dem beim Durchfahren der Mautbaken der entsprechende Betrag abgezogen wird. Beim Post-Paid Verfahren hingegen wird der zuzahlende Betrag täglich von der angegebenen Kreditkarte abgezogen.

Die Kontrolle funktioniert dabei auch über eine Vermessung und eine Bildverarbeitung. Sollte ein als Mautpflichtiges erkanntes Fahrzeug keine GO-Box besitzen, so werden die gemachten Fotos gespeichert und zur manuellen Verarbeitung bereitgehalten.

Zusätzlich gibt es auch mobile Kontrollen, die wie in Deutschland besonders ausländische Fahrer kontrollieren sollen.

Vorteil dieses Systems ist vor allem seine Einfachheit.

Durch die geringen Kosten der GO-Box konnte eine Einbaupflicht durchgesetzt werden.

Zudem ermöglicht es die einfache Technik, dass sich andere Systeme wie das der Schweiz oder Deutschland problemlos in das System einloggen können.

Als Nachteil könnte der hohe Bedarf an Mautbaken genannt werden, welcher zum Beispiel bei dem über 6x größeren Autobahnnetz Deutschlands die Kosten für Aufbau und Wartung gegenüber dem von Toll-Collect steigen lassen würde.

Auch ist dieses System recht starr. Für jede neue mautpflichtige Straße müssen weitere Mautbaken aufgestellt werden.

Zusatzdienste wie es sie in Deutschland theoretisch geben könnte, wären bei diesem System kaum möglich. [intf] [intg] [intc] [intd] [intb] [inta] [inte]

12.3.9 Bilder und Grafiken

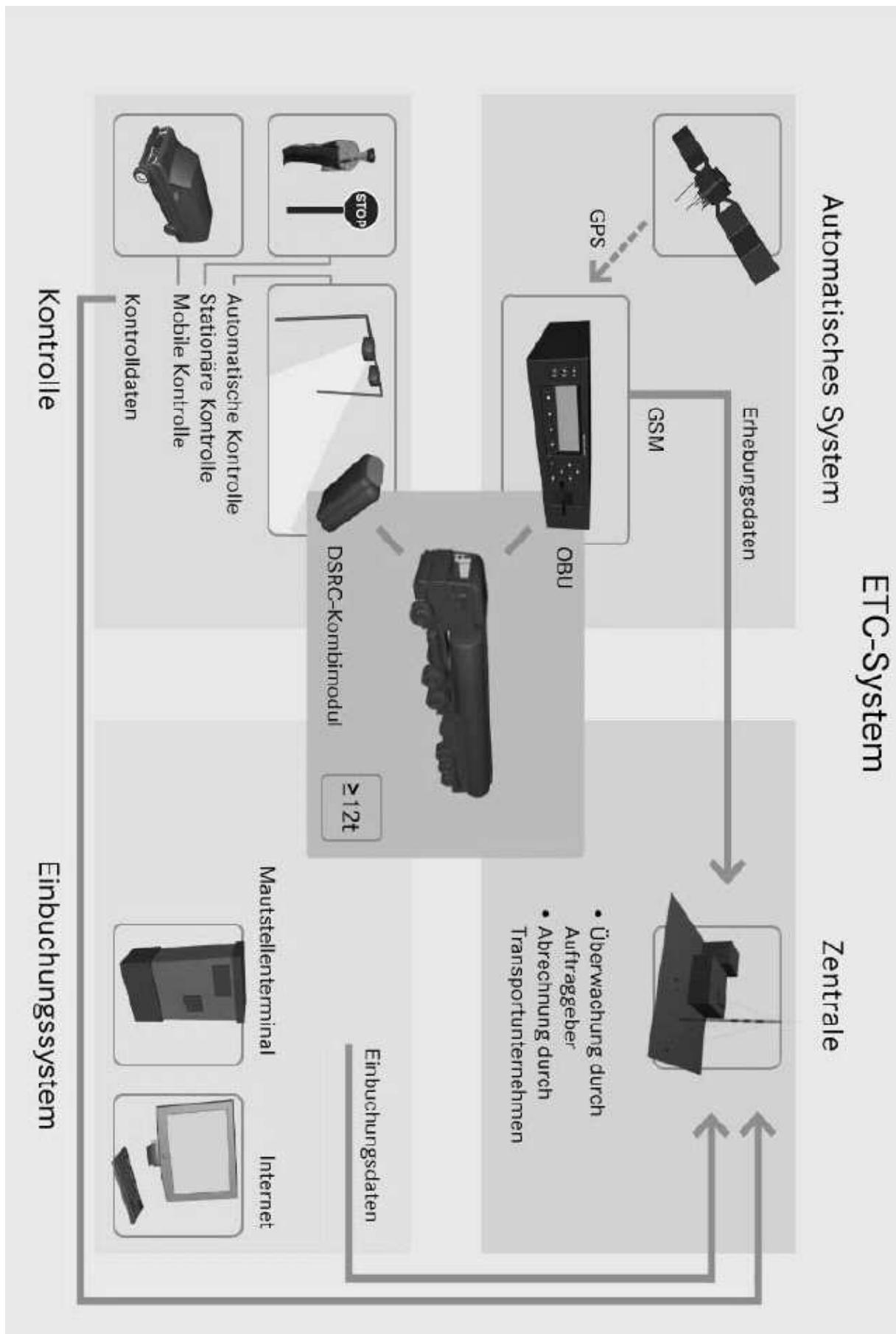


Abbildung 12.2: Toll Collect (1)

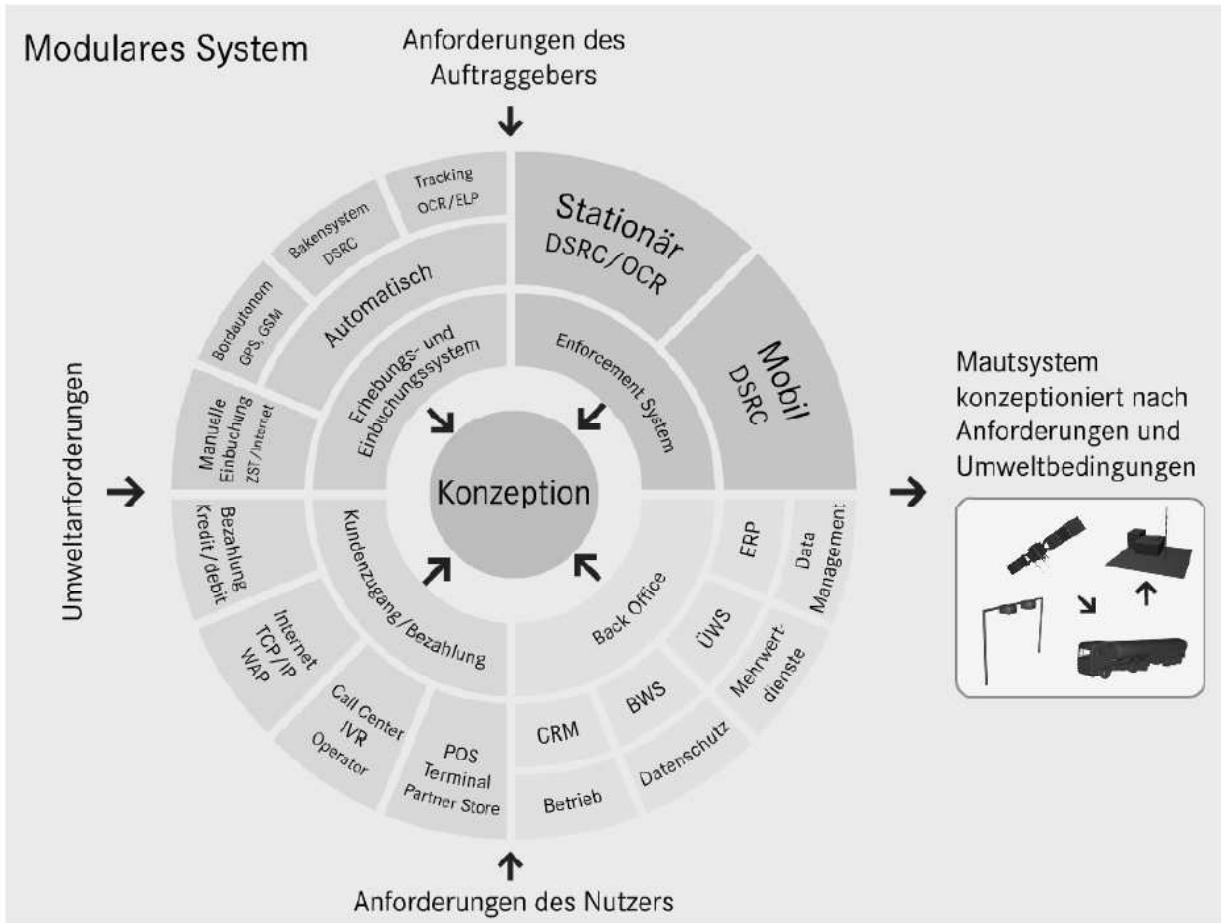


Abbildung 12.3: Toll Collect (2)

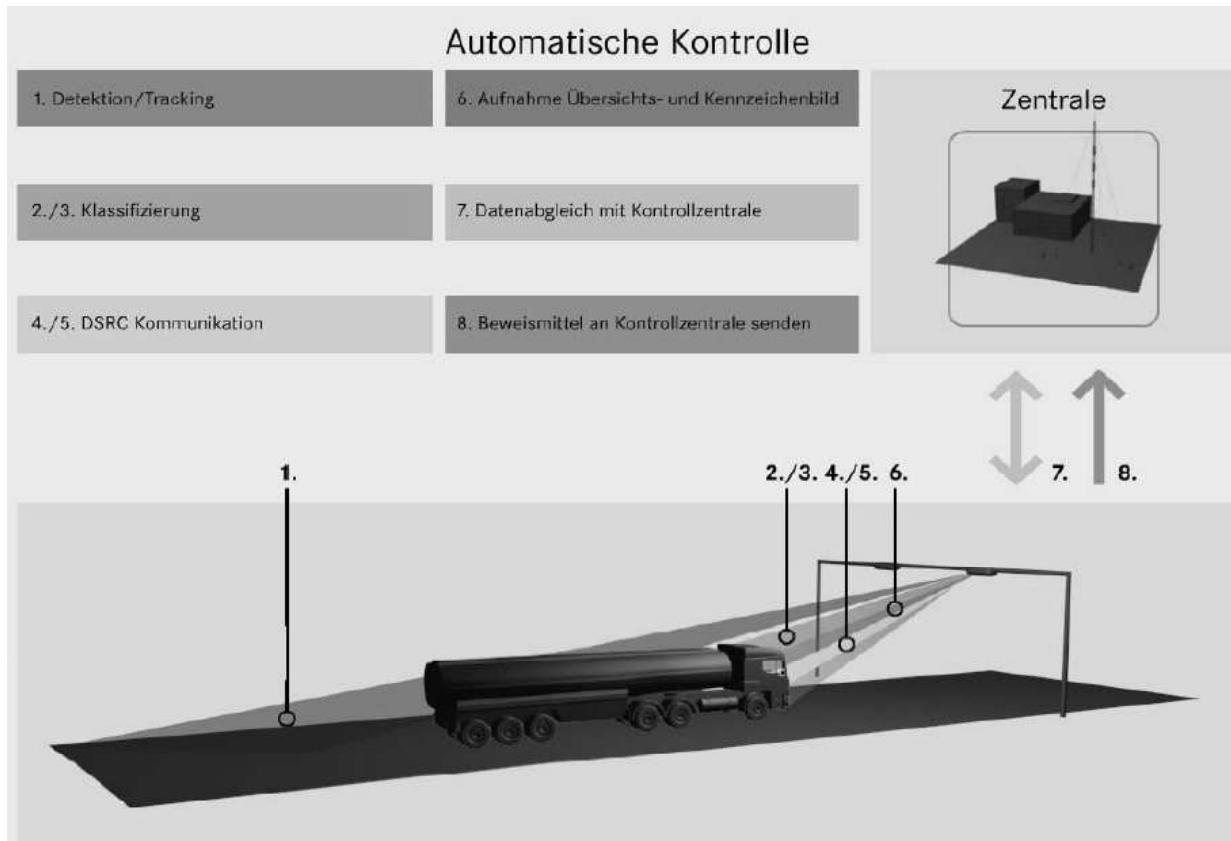


Abbildung 12.4: Funktionsweise Mautbake



Abbildung 12.5: Eine On-Board-Unit (OBU) von Toll-Collect



Abbildung 12.6: Ein Toll-Collect Serviceterminal

Literaturverzeichnis

- [int a] Artikel in der FAZ.
http://www.faz.net/s/RubEC1ACFE1EE274C81BCD3621EF555C83C/Doc_E114E96BC4B5B4Fpl_Ecommon_Scontent.html.
- [int b] Bundesverkehrsministerium zu LKW-Maut.
<http://www.bmvbw.de/Lkw-Maut-.720.htm>.
- [int c] Homepage Londoner Transportation Services.
<http://www.londontransport.co.uk/tfl/>.
- [int d] LKW-Maut in Österreich Homepage.
<http://www.go-maut.at/>.
- [int e] Systembeschreibung bei Heise-Online.
<http://www.heise.de/mobil/artikel/2002/11/18/maut/default.shtml>.
- [int f] Systembeschreibung Toll-Collect (DaimlerChrysler).
<http://www.dcl.hpi.uni-potsdam.de/cms/teaching/mobilitySem03/slides/tollcollect.pdf>.
- [int g] Toll-Collect Homepage.
<http://www.toll-collect.de/>.

Kapitel 13

Die Zukunft des Individualverkehrs: Konzepte und Chancen

Über den Autor

Christoph Kaden studiert zur Zeit im 12. Semester Elektro- und Informationstechnik an der TU München.

13.1 Einleitung

Individualverkehr nennt man jede Form der Fortbewegung bei freier Wahl der Fortbewegungsart, -zeit und -strecke. Dazu zählen z.B. Fußgänger, Fahrräder, Motorräder und PKW, nicht aber öffentliche Verkehrsmittel. Der motorisierte Individualverkehr besteht hauptsächlich aus dem Kraftfahrzeugverkehr einschließlich der Leichtkrafträder (Definition des Bayrischen Umweltministerium). Um zukünftige Entwicklungstrends des Individualverkehrs erkennen zu können, empfiehlt sich die nähere Betrachtung folgender Einflußfaktoren: Entwicklung des Fahrzeugbestands, des Kraftstoffverbrauchs, der alternativen Energiequellen, der Emissionen und der Verkehrsfläche.

13.2 Entwicklungen

13.2.1 Fahrzeugbestand

Der Fahrzeugbestand wird sich in Europa bis 2025 im Durchschnitt von ca. 500 auf knapp 750 PKW pro 1000 Einwohner erhöhen, ein Zuwachs von 50%. Ähnliche Entwicklungen sind für alle Kontinente zu erwarten, z.B. Lateinamerika +100%, GUS +350%! Bild 13.1 [arta]

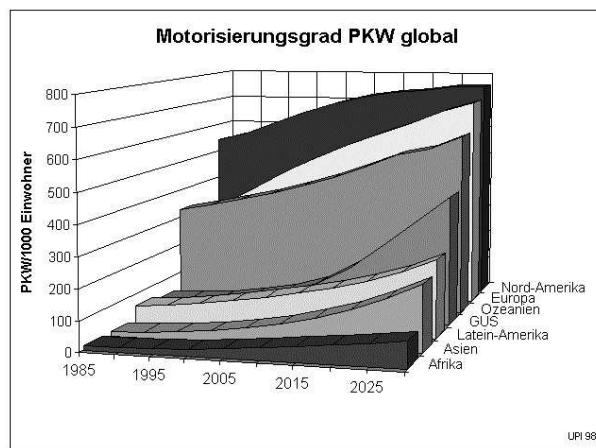


Abbildung 13.1: Fahrzeugsbestandsentwicklung

13.2.2 Treibstoffverbrauchs

Dem entgegen wird ein Rückgang des Treibstoffverbrauchs in Deutschland um ca. 10% erwartet Bild 13.2, trotz Fahrleistungszunahme um ca. 10%. Weltweit sinkt der Treibstoffverbrauch pro PKW, auch auf Grund der Marktdurchdringung in Europa teilweise bereits etablierter Technologien, sogar noch stärker Bild 13.3. Die Kennziffer- Erschließung neuer Reserven und Ausbeutung - liegt heute noch bei 113%, Tendenz fallend (bei 100% liegt ein ausgeglichenes Verhältnis vor)[SZ, 29.6.2004 zitiert Unternehmensberatung John S. Herald]. Doch laut Bernd Nierhauve, Aral AG, wird Erdöl bei freier marktwirtschaftlicher Entwicklung noch lange den Markt dominieren, nur politische Weichenstellung könne begrenzt signifikante Anteile regenerativer Antriebe schaffen. [arta]



Abbildung 13.2: Kraftstoffverbrauchsentswicklung national

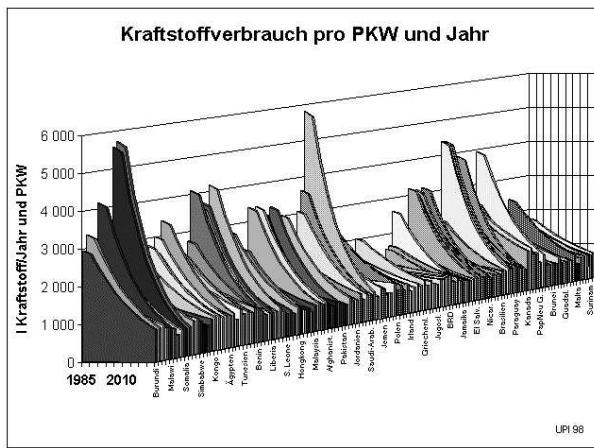


Abbildung 13.3: Kraftstoffverbrauchsentswicklung global

13.2.3 Regenerative Energien

Auf lange Sicht gesehen wird sich ein Energiemix ergeben (verbesserte konventionelle Fahrzeuge, Mybrids, Hybrids und Brennstoffzellenfahrzeuge). Dabei ist die Marktdurchdringung technologischer Erneuerungen am erfolgreichsten, wenn sie ökologisch und in der Nutzung dem Bisherigen überlegen ist (Frank Overmayer, DaimlerChrysler AG)[arta] Bild 13.4. In den nächsten 20 Jahren werden konventionelle Antriebe (Diesel/Benzin Verbrennungsmotoren) definitiv noch dominieren (2020 85%) Bild 13.5. Dieser 15% Anteil alternativer Antriebe (Shell Prognose) entspricht ungefähr einem Anteil von 25% bis 30% bei den Neuzulassungen im Jahr 2020. Die geschätzten 15% für alternative Antriebe (2020) sind bereits nur mit politischer Unterstützung erreichbar, vor allem durch Förderung der benötigten Infrastruktur und der regenerativen Energiegewinnung (Frank Overmayer, DaimlerChrysler AG)[arta]. Alle renommierten PKW-Hersteller arbeiten heute, ausser an der Verbesserung der konventionell Abtriebe, an der Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben Bild 13.6 (nur ereinzelt wird an Methanolantrieben geforscht, ARAL)[arta]. Übergang zu H2 wird kein Selbstgänger, u.a. Unklarheiten bzgl. Aufbau / Verteilung regenerativer Energien, marktfähige Anwendungstechnik (z.B. Schlüsseltechnologie Brennstoffzelle, Speichertechnik...), hohe finanzielle Vorleistung Infrastruktur und Mehrkosten für langfristig hohen (CO2-) Nutzen und langfristig sichere politische Rahmenbedingungen (Bernd Nierhauve, Aral AG)[arta].

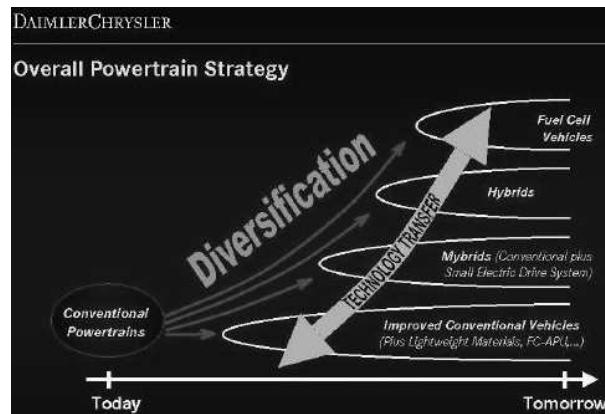


Abbildung 13.4: Entwicklung der Marktdurchdringung alternativer Antriebe

13.2.4 Emissionen

Die limitierten Emissionen des motorisierten Verkehrs stellen heute oder in absehbarer Zukunft in Deutschland kein relevantes Umweltproblem mehr dar.(Dr. Ulrich Höpfner, IFEU-Institut)[arta]. Die Klimaemissionen des Verkehrs werden bis 2020 vor allem durch den Lkw- und den Luftverkehr weiter ansteigen (LKW 52% der Kohlendioxidemission im Jahr 2020, ARAL)[arta] Bild 13.7.Die Emissionen des Pkw-Verkehrs nehmen nicht weiter zu, verfehlten aber die Reduktionsziele Bild 13.8. Eine Minderung um 50% bis 2020 wäre

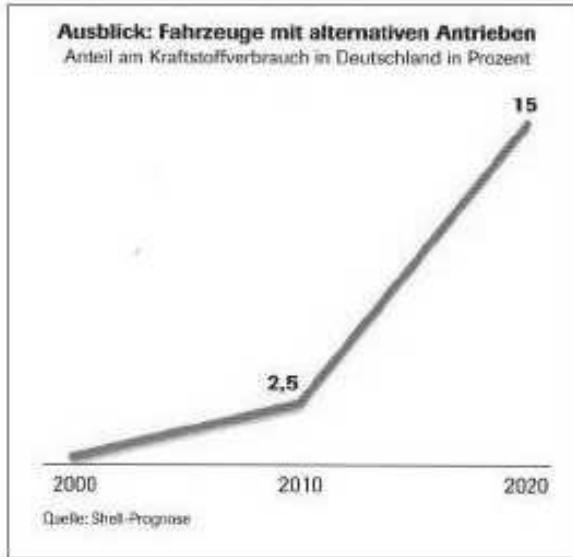


Abbildung 13.5: Bestandsentwicklung alternativer Antriebe

| Brennstoffzelle als PKW-“Antrieb“ Aktivitäten der Automobilindustrie | | | | |
|---|--------------------------------------|-----------------------|---|---------------------------|
| Firma | Entwicklungsarbeiten mit Wasserstoff | Methanol | Kraftstoff: „Benzin“ | Ankündigung Markteintritt |
| DaimlerChrysler | X | X | X | 2004* |
| Ford (Mazda) | X | Nein | X | 2004 |
| GM / Opel | X | Nein | X | 2004* |
| Honda | X | X | X | 2003 |
| Mitsubishi | X | X | X | |
| Nissan | X | X | X | |
| Renault / PSA | X | | X | |
| Toyota | X | Nein | X | 2003* |
| VW | X (?) | Nein | X | |
| „Favorisiert“ | | Problem Infrastruktur | Reformer zur H ₂ -Abspaltung | *Großserie 2010 |

Stand 6-2001

Abbildung 13.6: Forschungsaktivitäten der großen Automobilhersteller

technisch möglich (u.a. durch Abgaben und Flottengrenzwerte). Bei Lkw und Luftverkehr sind wegen geringer technische Potentiale Verlagerung/Vermeidung erforderlich (z.B. durch angepasste Abgabenstrategie) (Prof. Dr. Rudolf Petersen, Wuppertal Institut)[arta].

13.2.5 Bevölkerungsentwicklung

76% der deutschen Bevölkerung leben in Städten, 35% leben in Mittelstädten, 28% leben in Großstädten, 13% leben in Kleinstädten[artf]. Im Osten verläuft die Entwicklung dynamisch und unterschiedlich. Während die Verdichtungsräume sich stabilisieren, weisen vor allem die Klein- und Mittelstädte Bevölkerungsverluste auf. Im Westen verzeichnen alle Stadt- und Gemeindetypen, mit Ausnahme der Großstädte, einen leichten, aber steigigen Bevölkerungszuwachs Bild 13.9[arte]. Im Osten weisen besonders die Mittel- und

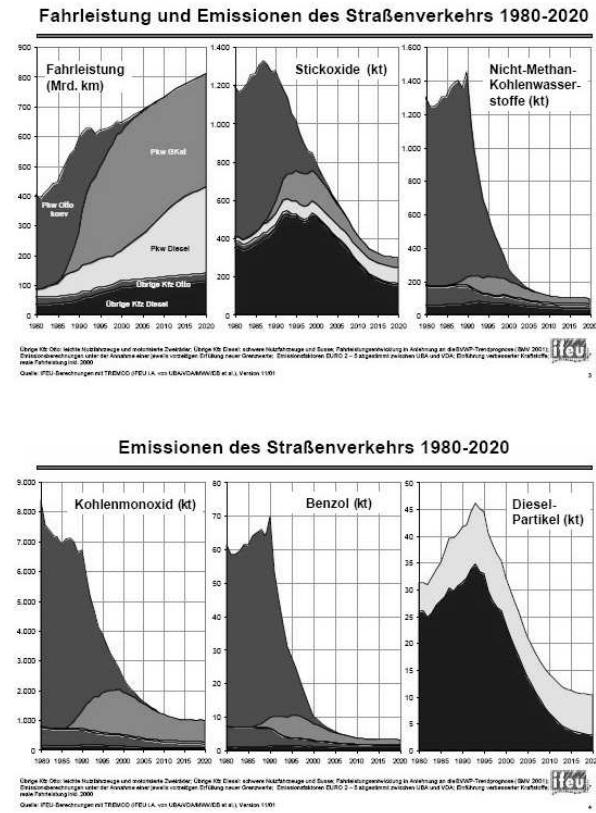


Abbildung 13.7: Emissionsentwicklung des Straßenverkehrs

Kleinstädte eine rückläufige Beschäftigungsentwicklung auf. Im Westen verzeichnen alle Stadt- und Gemeindetypen Beschäftigungsgewinne Bild 13.10[artd]. Dies führt zu einer zwangsläufige Zunahme der Verkehrsflächen. Heute sind 38,6% der neu in Anspruch genommenen Flächen Verkehrsfläche. Bis 2015 werden ein Wachstum des Güterverkehrs um 60% und des Personenverkehrs um etwa 20% erwartet. Damit wird der Anteil der Verkehrsflächen an der Flächeninanspruchnahme weiter steigen. Zwei Drittel der Bevölkerung, also rund 50 Mio. Einwohner, fühlen sich schon heute durch Verkehrslärm beeinträchtigt (Nach Modellrechnungen sind 12 Mio. Einwohner einem gesundheitsschädlichen Lärmpegel von 65 dB (A) am Tag ausgesetzt) (Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung). Dieser Anteil wird zukünftig mit dem Verkehrsaufkommen steigen.

13.3 Konzepte

Diese Trends erfordern die Entwicklung neuer Konzepte. Um z.B. die gesetzten CO₂-Minderungsziele zu erreichen sind sowohl verhaltensbeeinflussende Maßnahmen zur besseren Auslastung der Fahrzeuge, zur Verkehrverlagerung und -vermeidung sowie technische Maßnahmen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und zur Verwendung regenerativ erzeugter Kraftstoffe notwendig (Dr. Ulrich Voigt, DIW)[arta].

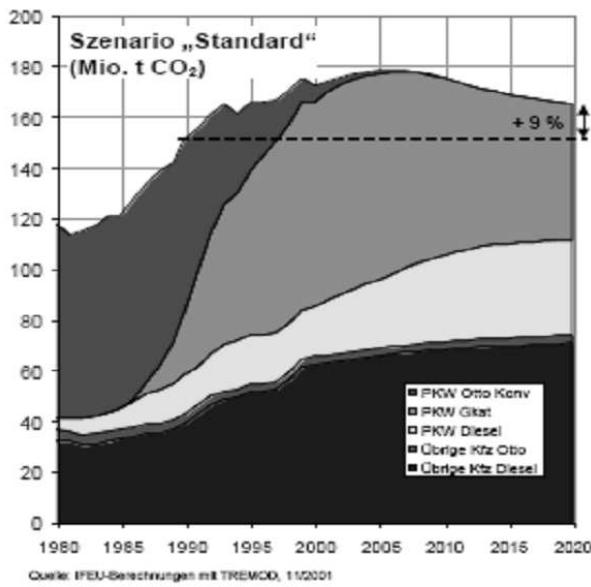


Abbildung 13.8: Kohlendioxidemissionsentwicklung

13.3.1 Gesetzgeber

Der Gesetzgeber kann durch z.B. Forschungsförderung, Subventionierung regenerativer Energiequellen (Wasserstoff) / europäischer Konsens über den Aufbau einer neuen Energieinfrastruktur, fiskalische Kompensation der Mehrkosten (2020: H2-KFZ +17% teurer als konventionell betriebenes KFZ; Aral)[arta], europaweite Zulassung von Wasserstoff als Kraftstoff technische Reglementierung und Zulassungsvorschriften, fiskalische Verteuerung nichtregenerativer Energiequellen (2020: H2 zwischen 3,5 und 6 mal teurer als Benzin in 2001, Aral)[arta] und durch fiskalische Förderung des ÖPNV / nichtmotorisierter Individualverkehr usw. steuernd eingreifen. Regional droht z.B. in München auf Grund verschärfter EU-Grenzwerte ab 1. Januar 2005 die Sperrung wichtiger Ring und Einfallstraßen: Leuchtenbergring, Verdstraße, Prinzregentenstraße, Tegernseer Landstraße, Zweibrückenstraße und Frauenstraße[artg]. Verschärfte Limits für Stickstoffdioxid drohen 2010 . Vorgeschlagene Gegenmaßnahmen sind Sperrung einzelner Straßenzüge (bereits rechtlich möglich) (Landesamt für Umweltschutz)[artc], Cityaut (Grüne,München), Pendler-Abschreckung durch die Ausdehnung der Parklizenzierte Gebiete, Verkehrsverflüssigung durch verbesserte Ampelschaltungen, Einführung eines Parkleitsystems und Sperren für den Schwerlastverkehr (Dr. Blume-Beyerle, KVR München)(Süddeutsche Zeitung online). Eine Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs Richtung des nichtmotorisierten Individualverkehrs wird von der Bundesregierung unterstützt, in dem 110 Mio Euro für den Radwegbau in den nächsten Jahren im Verkehrswegeplan zur Verfügung stehen (ADFC)[arth], ausserdem tritt zur Sicherheit der Fahrradfahrer im Oktober 2006 die Weitwinkelspiegelpflicht für LKW mit mehr als 3,5 Tonnen in Kraft. Das Umwelt- und Prognose-Institut e.V., Heidelberg [arti] geht soweit eine Parkraumreduzierung, Tempolimits (Entschleunigung auf 30/15 km/h), Fahrradspuren und eine Erhöhung des Raumwiderstandes (Parkplätze nicht näher als ÖPNV-Haltestelle) zu fordern, um den nichtmo-

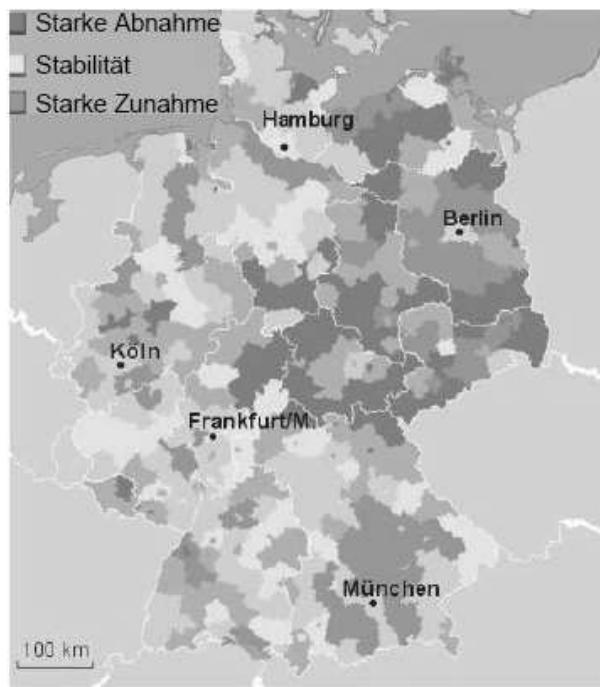


Abbildung 13.9: Bevölkerungsentwicklung bis 2010 (Bundesamt für Verkehr)

torisierten Individualverkehr zu fördern Bild 13.11. Wieviel Nachholbedarf Deutschland beim Fahrradverkehr aufweist, zeigt auch, daß beispielsweise 1994 nur 3% der Ausgaben des Bundesministeriums für Straßenverkehr in Radwege und Radverkehr investiert wurden Bild 13.12.

13.3.2 Wirtschaft

Privatwirtschaftlich gibt es verschiedene Angebote die zu einer Reduzierung des motorisierten Individualverkehrs führen können/ sollen, z.B. Carsharing. Laut einer Stattauto / MVV-Studie (München) sinken die jährlichen Pkw-Kilometer vor Beitritt zur Carsharing Organisation (CSO) im Durchschnitt von 11.300 Km auf 2500 km Bild 13.13 und Bild 13.14. Der eigene PKW wird allerdings bei spontanen Unternehmungen (44%), für Fahrten am Wochenende (15%) und wegen mangelnder spontaner Verfügbarkeit (15% der befragten Mitglieder, 2002) vermisst. Deshalb wird sich ein solches Konzept in der Breite wohl nicht durchsetzen. Aussichtsreicher sind Kombinationsangebote von Bahn und Bike-/Carsharing, sie erhöhen die Flexibilität des ÖPV. Auch können leistungsfähige Carrier im ÖPNV auf Spezialrouten den Individualverkehr entscheidend entlasten (Beispiel Transrapid auf der Münchner Flughafenroute)[artb].



Abbildung 13.10: Beschäftigungsentwicklung bis 2010 (Bundesamt für Verkehr)

13.4 Chancen

Die Automobilität ist mit hoher Priorität in der Bedürfnisskala der Haushalte verankert. Öffentliche Verkehrsmittel werden vielfach nicht als vollwertige Substitute akzeptiert (Dr. Ulrich Voigt, DIW) [arta]. Das eigene Auto ist längst Teil der ästhetischen Identität des Einzelnen geworden - jenseits all dessen, was gemeinhin als logisch oder vernünftig gilt (Carsten Ascheberg, Sigma) [arta]. Beispielsweise wird die Tuningbranche im laufenden Jahr den Umsatz gegenüber 1995 fast verdoppeln (auf 4,5 Mrd. Euro) (VDAT) Bild 13.15 [artj]. Aussagen zur Verkehrsentwicklung, die kontinuierliches Verkehrswachstum

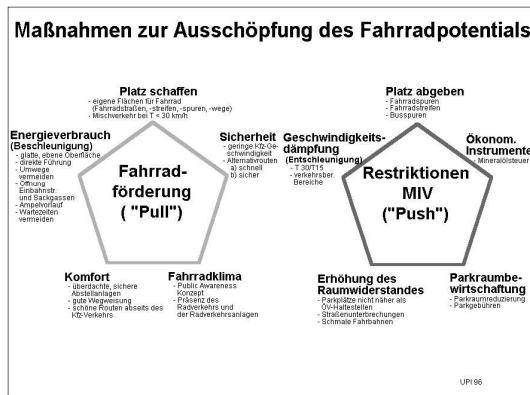


Abbildung 13.11: Vorschlag des UPI zur Förderung des Fahrradverkehrs

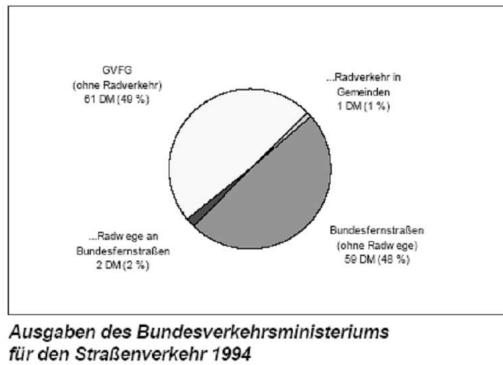


Abbildung 13.12: Förderung des Fahrradverkehrs 1994

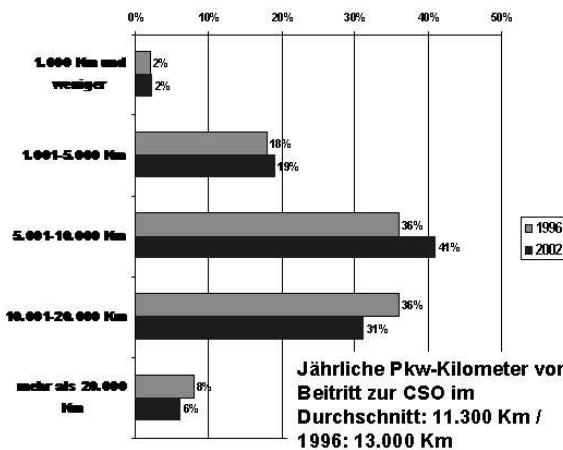


Abbildung 13.13: Fahrleistung vor Beitritt (MVV-Studie)

tum prognostizieren, sind tendenziell selbsterfüllende Prophezeiungen. Sie werden dazu verwendet, um die Notwendigkeit eines angebotsorientierten Ausbaus von Verkehrsinfrastrukturen zu begründen und damit Verkehrswachstum zu induzieren (Professorin Dr. Christine Bauhardt, TU Berlin)[arta]. Auch deshalb müssen mögliche Regulierungsmaßnahmen wie künstl. Treibstoffversteuerung, Straßensperrungen (siehe Emission), Autobahnmaut, usw. mit gesellschaftlicher Akzeptanz. Auch technische Neuerungen wie CVT-Getriebe, E-Antrieb, Downsizing usw. weichen im Erleben von dem Bisherigen ab, so daß mit gezieltem Marketing einer Ablehnung entgegengewirkt werden muß. Viele Entwicklungen im Bereich der Wirtschaft und der Gesellschaft deuten darauf hin, dass die Nachfrage nach individueller Mobilität in den kommenden Jahren weiter zunehmen wird. Da man davon ausgehen kann, dass viele Einflussgrößen auf das Mobilitätsverhalten kurzfristig kaum veränderbar sind (z.B. Wirtschafts- und Siedlungsstrukturen; Einstellungen, Werte und Lebensformen der Menschen; technische und bauliche Gegebenheiten der Mobilität), sind langfristig wirksame und kalkulierbare Rahmenbedingungen erforderlich, um grundlegende Veränderungen erzielen zu können (Dr. Walter Hell, Institut für Mobilitätsforschung [arta]).

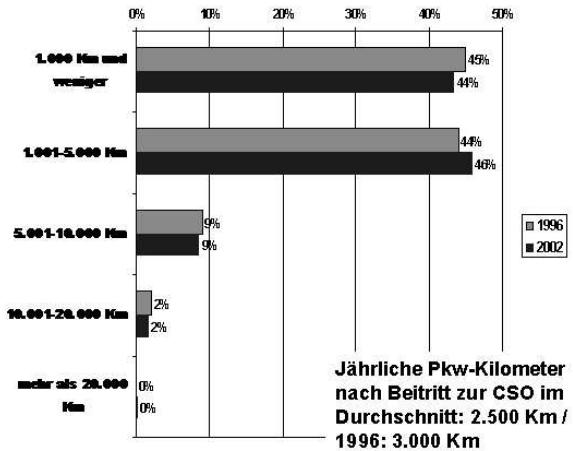


Abbildung 13.14: Fahrleistungen nach Beitritt (MVV-Studie)



Abbildung 13.15: Erwartete Jahresumsatzentwicklung der Autotuningbranche

Literaturverzeichnis

- [arta] Anhörung der Enquête-Kommission Nachhaltige Energieversorgung des Deutschen Bundestags 6. Dezember 2001.
- [artb] Bayrische Magnetbahnhörfbereitungsgesellschaft mbH (BMG).
- [artc] Bayrisches Umweltministerium.
- [artd] Bundesamt für Verkehr, Bau und Wohnungswesen.
- [arte] II. nationaler Städtebaukongress, Bundessamt für Bauwesen und Raumordnung.
- [artf] Statistisches Bundesamt.
- [artg] Süddeutsche Zeitung online.
- [arth] Umweltbundesamt.
- [arti] UPI- Umwelt- und Prognose-Institut e.V., Heidelberg.
- [artj] Verein Deutscher Automobil Tuner e.V. (VDAT e.V.).