

- > Sicherheit
- > Mobilität
- > Umweltschutz



Zweiter Verkehrstechnischer Tag

**Mobil sein –
mobil bleiben**

Mittwoch, 28. September 2005
Berlin-Adlershof



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Mobilität gehört zum Alltag, ist fast selbstverständlich. Doch der Blick voraus zeigt: Die Kapazität von Straßen, Schienen und Flughäfen stößt angesichts wachsenden Verkehrsaufkommens an Grenzen. Wie können wir in der Zukunft Mobilität sichern? Der zweite Verkehrstechnische Tag des DLR zeigt an Beispielen, auf welche Fragen die Forscherinnen und Forscher Antworten suchen.

Lässt sich die sichere Steuerung von Schienenfahrzeugen im dichter werdenden Zugverkehr noch weiter verbessern? Helfen Simulationen, den Stau vor dem Entstehen zu vermeiden? Können aus der Luft und dem Weltraum gewonnene Verkehrsdaten das Verkehrsmanagement verbessern? Welchen Anforderungen müssen künftige Fahrzeugkonzepte genügen? Und schließlich: Wie wirkt zunehmender Verkehr auf Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft?

Der zweite Verkehrstechnische Tag gibt Einblick in aktuelle Forschungsarbeiten und demonstriert die Leistungsfähigkeit des DLR sowie seiner Partner in Fachvorträgen und mit Exponaten. Damit wir auch in Zukunft sicher mobil sind.

Zweiter Verkehrstechnischer Tag

Mobil sein – mobil bleiben



Herausgeber Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
in der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF)

Anschrift Linder Höhe
D - 51147 Köln

Redaktionelle Koordination Dipl.-Ing. Jean-Marc Pfeiffer
Telefon: 02203-601-3470
Telefax: 02203-601-4712
E-mail: jean-marc.pfeiffer@dlr.de

Druck DLR

Drucklegung Köln, September 2005

www.dlr.de

Die Inhalte der Beiträge verantworten die Autoren

Abdruck (auch von Teilen) oder
sonstige Verwendung nur nach vorheriger
Absprache mit dem DLR gestattet

Inhalt

INNOVATIONEN FÜR DEN SCHIENENVERKEHR

Schienenfahrzeuge sicher steuern.....	6
Teststrategien für komplexe Sicherheitssysteme.....	14

SIMULATION UND STEUERUNG

Passagierführung im Terminal.....	25
Verkehrssimulation als Managementinstrument.....	34
Virtuelles Verkehrsmanagement im Traffic Tower.....	43

LUFT- UND RAUMGESTÜTZTES VERKEHRSMANAGEMENT

Sicherer Schienenverkehr mit GALILEO.....	51
Flächiges Verkehrsmonitoring mit digitalen Luftbildern.....	59

NACHHALTIGE MOBILITÄT

Fahrzeugkonzepte der Zukunft auf dem Prüfstand.....	71
KOMPASS – Indikatoren der Mobilität in Deutschland.....	86

Schienenfahrzeuge sicher steuern

Stefan Schrank⁽¹⁾, Michael Meyer zu Hörste⁽²⁾

⁽¹⁾ Alstom LHB GmbH, Salzgitter

⁽²⁾ DLR e.V., Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung

Stefan.Schrank@transport.alstom.com, Michael.MeyerzuHoerste@dlr.de

Einführung

Die Zulassung eines neuen Fahrzeugtyps verlangt eine detaillierte Betrachtung der Sicherheit des Fahrzeugs im Ganzen und auch seiner Teilsysteme. Mit der hier dargestellten Methode werden die Systeme der Steuerung eines Fahrzeugs auf Gefährdungen hin untersucht. Es erfolgt eine Einstufung der Systeme des Fahrzeugs in die Kategorien sicherheitsrelevant und nicht sicherheitsrelevant.

Nach dieser Einstufung wird die Anfälligkeit für Störungen, die von außen auf das System einwirken, untersucht. Dies hat keinen Einfluss auf die Bewertung des Systems, denn jeder Fehler, der von außen in ein System hineingetragen wird, kann auch in ihm selbst entstehen. Der Zweck dieses Abschnitts ist es, Informationen für die Betrachtung derjenigen Systeme zur Verfügung zu stellen, die das betrachtete System über eingehende Verbindungen beeinflussen.

In einem weiteren Schritt wird in einem mehrstufigen Verfahren bestimmt, ob die gegebenenfalls im System enthaltene Software eine Sicherheitsverantwortung enthält.

Bei der Bewertung der einzelnen Systeme wurden folgende Annahmen und Einschränkungen getroffen:

- Jeder Fehler, der von außen in ein System hineingetragen wird, kann auch im System selbst entstehen. Das heißt, dass durch eingehende Störungen von angrenzenden Systemen keine Gefährdungen entstehen können, die im System nicht bereits vorhanden sind.
- Ein System, das nicht sicherheitsrelevant ist, kann auch durch angrenzende Systeme nicht dazu gebracht werden, eine Gefährdung zu verursachen.

Aus diesem Grund wird bei nicht sicherheitsrelevanten Systemen darauf verzichtet, die Anfälligkeit für Störungen von außen zu betrachten.

- Bei der Betrachtung jedes einzelnen Systems wird davon ausgegangen, dass alle anderen Systeme fehlerfrei funktionieren. Dies schließt auch den Triebfahrzeugführer und anderes Personal mit ein. Mehrfachfehler werden nicht betrachtet. Eine Ausnahme hiervon bilden die Systeme, die dazu konzipiert wurden, andere Systeme zu kontrollieren, eine Fehlererkennung zu ermöglichen oder als Rückfallebene zu fungieren.

Heutige Situation

Die Anforderungen und Verfahren der Zulassung von Steuerungen in Schienenfahrzeugen unterscheiden sich heute wesentlich in den verschiedenen europäischen Ländern. Selbst innerhalb Deutschlands kommen verschiedene Ansätze in der Zulassung von Eisenbahn- und Straßenbahnfahrzeugen zur Anwendung.

In Straßenbahnen wird die gesamte Steuerung auf sicherheitsrelevante Funktionen untersucht, für die dann ein Sicherheitskonzept zu erstellen ist (VDV 161). Es ist das Ziel für sicherheitsrelevante Funktionen das Auftreten von Gefährdungen zu minimieren. In dieser Betrachtung ist es zunächst zweitrangig, ob der entsprechende Anteil der Steuerung in Hardware oder Software realisiert ist. Die Zulassungsbehörden nach BoStrab fordern immer häufiger die Erstellung einer entsprechenden Dokumentation.

Beim Nachweis der Erfüllung der EBO durch die Steuerungen von Eisenbahnfahrzeugen (Sicherheitsnachweis Fahrzeug) wurde in den letzten Jahren der Fokus verstärkt auf die Software gerichtet. In Abstimmung zwischen Eisenbahnbundesamt, den Betreibern und der Industrie wurde eine Umsetzung der Anforderungen der EN 50128 in vier Stufen vereinbart. Dieser Prozess – von der Maßgeblichkeit der ersten Anforderungen bis zur heutigen gleichsam vollständigen Gültigkeit dieser Norm – bildet den zeitlichen Hintergrund für die Gestaltung des darzustellenden Konzeptes sowie die Entwicklung des als Anwendungsbeispiel beschriebenen Fahrzeugs. In diesem Zeitraum sind die Anforderungen an Entwicklung, Test und Begutachtung sicherheitsrelevanter Software ständig gestiegen.

Die Ermittlung der Sicherheitsrelevanz der Steuerungs-Software ist damit sowohl für den im Rahmen des Sicherheitsnachweises Fahrzeug am weitesten fortgeschrittenen Prozess der Software-Zulassung, als auch für die Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes nach VDV 161 wichtig und bildet folglich den Kern des vorzustellenden Konzeptes.

Ansatz

Mit der hier vorgestellten Methode soll für jedes System eines neuen Fahrzeugs die darin enthaltene Software in sicherheitsrelevant (SIL > 0) oder nicht-sicherheitsrelevant (SIL = 0) eingestuft werden. Die Basis für diese Einstufung bildet eine vorangehende Untersuchung der funktionalen Eigenschaften des Fahrzeug und seiner Systeme, in der bereits eine Einstufung der Systeme aus funktionaler Sicht in diese beiden Kategorien stattfand.

Die Einstufung der Software erfolgt nach dem Ausschlussverfahren. Anhand von verschiedenen Fragen werden die Systeme bzw. Aktionen / Informationen aussortiert, die keine sicherheitsrelevante Software enthalten. Wird ein Teil aussortiert, bedarf es dazu einer Begründung. Am Ende des Ausschlussverfahrens bleibt die sicherheitsrelevante Software übrig.

Für jedes System X des Fahrzeugs müssen die Fragen beantwortet werden, die im nachfolgenden Entscheidungsbaum aufgeführt sind.

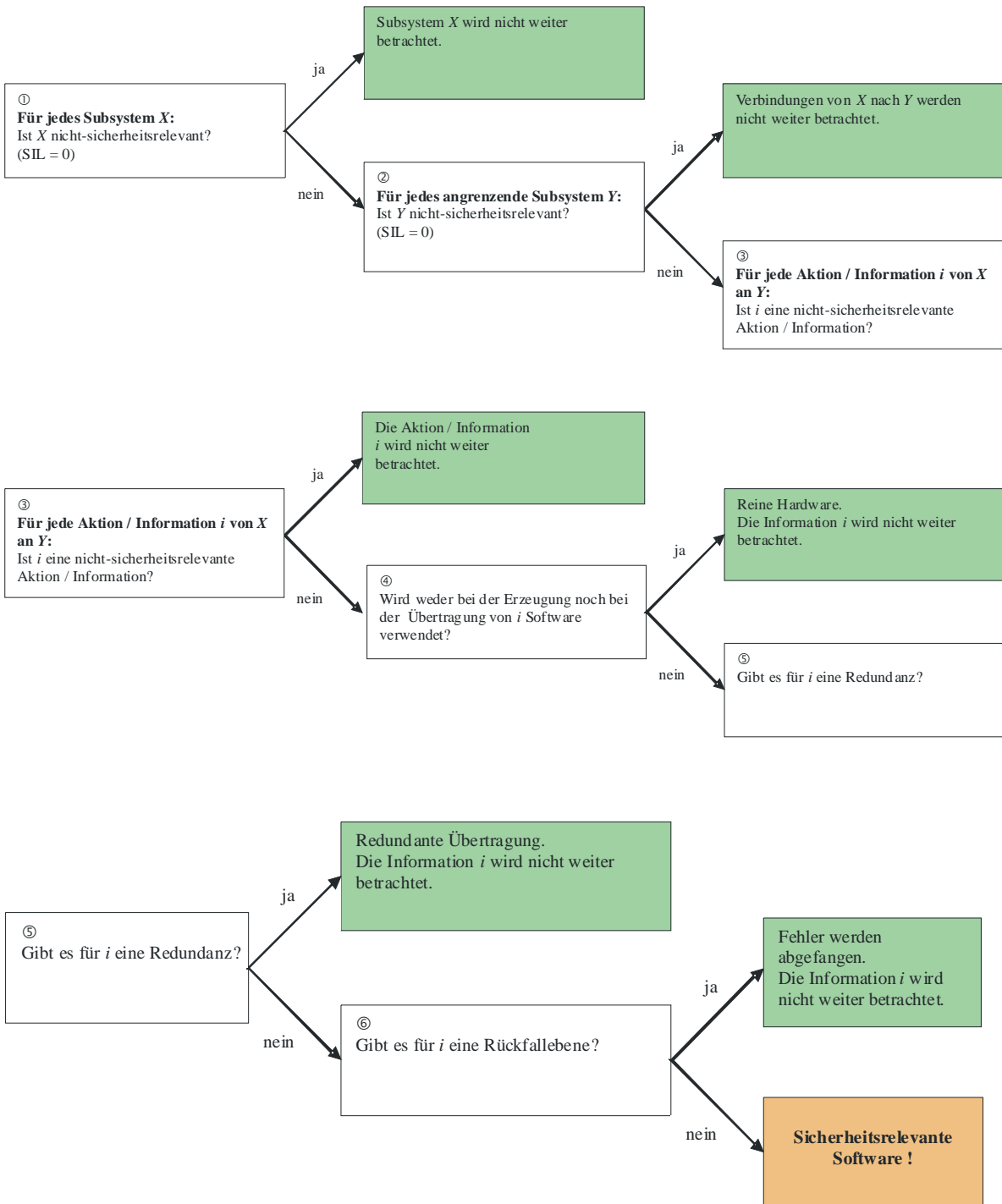
Im Zuge der Analyse der Systeme werden auch die Steuergeräte von Systemteilen (z.B. Türsteuergerät) in sicherheitsrelevant (SIL > 0) oder nicht-sicherheitsrelevant (SIL = 0) eingestuft. Dabei werden die Steuergeräte so weit wie möglich als Blackbox betrachtet. Die Steuergeräte werden zugekauft, daher ist eine Betrachtung des Innenlebens nicht sinnvoll. Die Einstufung kann vom Hersteller, in diesem Fall Alstom LHB an die Zulieferer weitergegeben werden.

Das Verfahren beruht auf einer Kaskade von Fragen, wobei mit jedem „ja“ die weitere Untersuchung beendet wird, mit jedem „nein“ wird die Betrachtung in der nächsten Ebene fortgesetzt. Am Ende steht die Aussage, dass ein Software-Anteil an einem System sicherheitsrelevant ist. Die Struktur der Kaskade wird mit den folgenden drei Bildern dargestellt.

Die Fragen ① bis ③ werden nacheinander beantwortet. Für die Fragen ④ bis ⑥ wird keine Reihenfolge festgelegt, um keinen unnötigen Aufwand zu erzeugen.

Die nachfolgenden Fragen müssen für alle Systeme / Informationen betrachtet werden. Es genügt nicht, nach der ersten Information aufzuhören, die sicherheitsrelevante Software benötigt. Der Vollständigkeit halber sollen alle Informationsflüsse betrachtet werden, sofern die entsprechenden Systeme nicht bereits aus der Betrachtung gestrichen wurden (wegen SIL = 0).

VIS und NTW können erst am Ende der Phase 2 abschließend bewertet werden. Deshalb müssen sie jetzt – ungeachtet ihrer derzeitigen Einstufung – wie sicherheitsrelevante Systeme behandelt werden.



Zu den einzelnen Fragen:

① sicherheitsrelevante Systeme

Ein System X, das nicht sicherheitsrelevant ist (SIL = 0), kann keine sicherheitsrelevante Software enthalten.

② Informationen an sicherheitsrelevante Systeme

Ist Y ein nicht-sicherheitsrelevantes System, kann aus einem Informationsfluss von X nach Y keine Gefährdung entstehen, da falsche Informationen von X nach Y nur zu solchen Fehlern führen, die auch in Y selbst auftreten können.

Y kann hier nicht nur eins der fahrzeuginternen Systeme sein. Es gibt auch noch andere Empfänger von Informationen:

- Triebfahrzeugführer (z.B. Leuchtmelder)
- Fahrgäste (z.B. Anzeigen)
- andere Verkehrsteilnehmer (z.B. Licht, Hupe)

③ sicherheitsrelevante Aktionen / Informationen

Hier gilt es, die Konsequenzen von ausbleibenden oder falschen Informationen abzuschätzen. Wichtig ist nicht nur, was passiert, wenn eine Information ausbleibt, weil ein Gerät oder ein Teil ausfällt, sondern auch, was passiert, wenn nur die Information nicht kommt oder zur falschen Zeit kommt oder ein falscher Wert übertragen wird.

Es gibt Informationen, die keine Sicherheitsrelevanz besitzen. Gleich was geschieht, sie können nicht zu einer Gefährdung führen. Selbst wenn Software bei der Erzeugung und/oder Übertragung dieser Informationen beteiligt ist, kann hieraus nicht abgeleitet werden, dass das System sicherheitsrelevante Software besitzt.

Von allen Informationen X -> Y werden im Folgenden nur diejenigen betrachtet, bei denen ein Ausbleiben / eine Verfälschung zu einer Gefährdung führt.

Darüber hinaus gibt es noch andere Dinge, die Einfluss auf die Umgebung haben, aber keine Informationen sind. Das sind Aktionen des Fahrzeugs wie z.B. bremsen, Türen schließen, etc.. Diese Dinge wurden in Phase 1 unter „Ausfälle in der Funktionalität“ behandelt. Aktionen müssen hier auch auf ihre Sicherheitsrelevanz hin untersucht werden.

Was im Folgenden für Informationen beschrieben ist, gilt im Prinzip auch für Aktionen.

④ Softwarebeteiligung

Es gibt Informationen, an denen keinerlei Software beteiligt ist. Bei dieser Untersuchung ist Sorgfalt geboten. Um eine Information hier aussortieren zu können, muss sie zu 100% in Hardware realisiert sein. Das bedeutet: Von dem Punkt, an dem die Information das System X betritt (oder von diesem erzeugt wird) bis zu dem Punkt, an dem sie X wieder verlassen hat und bei Y angekommen ist, darf keinerlei Software beteiligt sein.

Auch der Übertragungsweg von X nach Y ist von Bedeutung. Erfolgt die Übertragung von X nach Y über einen Steuerbus, ist mit Sicherheit Software beteiligt. Allerdings kann die Sicherheitsrelevanz dieser Software nur über die Bedeutung der Steuerbusse für die Übertragung von Informationen bestimmt werden.

Diese Steuerbusse sind zu Ihrer konstruktiven Handhabung in einem eigenständigen System (NTW) zusammengefasst. Neben der Erzeugung und Weiterleitung von Metainformationen (z.B. Anzahl der Fahrzeuge im Zugverband) über die Steuerbusse (das System NTW als funktioneller Anteil der Steuerung) besteht die wesentliche Aufgabe in der Übertragung von Informationen im Fahrzeug (das System NTW als Medium). Während es hinsichtlich der ersten Funktion wie alle anderen Systeme zu betrachten ist, lässt sich die Frage nach der Sicherheitsrelevanz in der zweiten Funktion erst zum Schluss beantworten, wenn alle sicherheitsrelevanten Software-Informationen und ihre Übertragungswege bekannt sind.

⑤ **Redundanz**

Hier soll geprüft werden, ob die Information noch auf einem zweiten Weg übertragen wird (beispielsweise nicht nur per Software, sondern auch über eine elektrische Leitung (fest verdrahtet)). Als Redundanz kommen in Frage

1. reine Hardware
2. bereits als sicherheitsrelevant eingestufte Software

Beim 1. Punkt (reine Hardware) muss sichergestellt sein, dass an diesem alternativen Übertragungsweg keinerlei Software beteiligt ist – auch nicht bei der Erzeugung der Information. Beim 2. Punkt kommt logischerweise nur Software anderer Systeme in Frage, da die Software des betrachteten Systems noch nicht abschließend bewertet ist.

Wichtig ist auch, dass das redundante SW-Signal nicht aus der gleichen SW-Quelle entsteht wie das gerade betrachtete. Es sei denn, dies ist eine als sicherheitsrelevant eingestufte Quelle aus einem anderen System.

Bei der Frage der Redundanz muss auch untersucht werden, ob die Information nicht nur doppelt übertragen wird, sondern auch mit der redundanten abgeglichen wird. Wenn auf beiden Übertragungswegen unterschiedliche Informationen übertragen werden, wovon eine als nicht korrekt anzusehen ist, muss sichergestellt werden, dass in diesem Falle grundsätzlich die restriktivere Information weiterverarbeitet wird. Oder aber es muss zumindest ein Fehler erkannt werden (z.B. durch Konsistenzcheck) und diese Erkenntnis muss noch die Möglichkeit zum Handeln geben.

Wenn es eine solche Redundanz gibt, kann die betrachtete Information auch im Falle eines Fehlers keinen Schaden anrichten.

⑥ **Rückfallebene**

Neben redundant ausgelegten Systemkomponenten können in der Implementierung ebenso Rückfallebenen vorhanden sein. Auch diese gilt es zu untersuchen.

Wie bei der Frage nach Redundanz kommen für eine Rückfallebene in Frage:

1. reine Hardware
2. bereits als sicherheitsrelevant eingestufte Software

Wenn eine solche Rückfallebene für sicherheitsrelevante Funktionen eines Systems vorhanden ist, kann die betrachtete Information auch im Falle eines Fehlers keinen Schaden anrichten, da die Reaktion des Systems zur sicheren Seite ausfallen wird.

Steuergeräte

Im Rahmen der Software-Betrachtungen sollen auch die Steuergeräte in die Klassen sicherheitsrelevant / nicht-sicherheitsrelevant eingestuft werden. Dazu ist für jedes System - für alle sicherheitsrelevanten Systeme - zunächst eine Liste der vorhandenen Steuergeräte notwendig. Steuergeräte werden als Blackbox betrachtet. Ihr Inneres wird nicht mehr als unbedingt zum Verständnis notwendig analysiert.

Ein Steuergerät muss dann als sicher auszulegende Komponente bewertet werden, wenn es an mindestens einer sicherheitsrelevanten Handlung beteiligt ist. In diesem Falle muss die Software des jeweiligen Steuergerätes Sicherheitsverantwortung übernehmen, die in der Implementierung zu berücksichtigen ist.

Anwendungsbeispiel

Im Rahmen der Zulassung von Fahrzeugen des Typs Regio CITADIS™ von Alstom für die RegioTram Kassel wurde das vorgestellte Konzept eingesetzt, um eine Sicherheitsbetrachtung für die Fahrzeugsteuerung zu erstellen. Diese Fahrzeuge sind dafür konzipiert auf zwei unterschiedlichen Infrastruktursystem betrieben zu werden: Sie werden einerseits auf klassischen Eisenbahnstrecken im Regionalverkehr eingesetzt. Andererseits werden sie im innerhalb der Stadt Kassel als Straßenbahnen verkehren.

Dieses Nutzungskonzept stellt hohe Anforderungen an die Fahrzeugsteuerung. Die Fahrzeuge müssen zunächst alle Eigenschaften und Funktionen für den Betrieb in beiden Netzen auf sich vereinen. Die Energieversorgung erfolgt aus zwei unterschiedlichen Fahrleitungsnetzen oder im Wechsel zwischen einem Fahrleitungsnetz und den auf dem Fahrzeug installierten Diesel-Generator-Anlagen. Die Fahrzeugsteuerung muss dazu Funktionen mit sich bringen um jeweils die beiden installierten Energieversorgungsarten anzusteuern und zu überwachen. Weitere Beispiele für unterschiedliche Funktionalitäten in beiden Netzbereichen findet man in der gesamten Fahrzeugsteuerung von der Kommunikation zwischen Strecke und Fahrzeug, über die akustischen und optischen Signale bis hin zur Steuerung der Außenspiegel.

Zweitens sind zusätzliche Funktionen vorzusehen, die Umschaltung des Betriebs zwischen beiden Netzen übernehmen. Die automatische Umschaltung der Energieversorgung ist zu steuern und geeignet zu überwachen. Für die Umschaltung zwischen den Bahnsystemen (EBO und BoStrab) ist ein hinreichend sicheres System zu installieren, das jedem System auf dem Fahrzeug erlaubt seine Funktionalität entsprechend anzupassen.

Durch das vorgenannte enthält die Fahrzeugsteuerung einen – beispielsweise im Vergleich mit anderen Regional- oder Straßenbahnfahrzeugen – vergrößerten Umfang an Funktionen. Der Aufwand bei der Strukturierung und Bewertung dieser Funktionen hinsichtlich Ihrer Sicherheitsrelevanz steigt allein durch diesen erhöhten Umfang der Funktionalität.

Ferner ist zu Berücksichtigen, dass die Zulassung durch zwei verschiedene Institutionen zu erfolgen hat: Für die Zulassung als Eisenbahnfahrzeug zeichnen – je nach Kunden – das Eisenbahnbundesamt (EBA) oder die entsprechende Länderbehörde – zumeist der LfB, der sich seinerseits wieder häufig des EBA bedient – verantwortlich. Im Bereich der Straßenbahn erfolgt die Zulassung in Länderhoheit. Die entsprechenden Behörden bedienen sich hier häufig den technischen Abteilungen der künftigen Betreiber um Dokumentation zu sichten, zu bewerten und um Tests durchzuführen. Aus diesen unterschiedlichen Konstellationen ergeben sich zum Teil gänzlich verschiedenartige Philosophien in der Herangehensweise an den Aspekt der Sicherheit. Es wurde bereit darauf hingewiesen, dass bei der Bewertung der Sicherheit von Steuerungen derzeit unterschiedliche Blickwinkel angelegt werden.

Am deutlichsten wird der Philosophie-Unterschied bei den unterschiedlichen Herangehensweisen in der Fahrgastsicherheit bei Zusammenstößen: Während im Bereich der Eisenbahn Fahrzeuge normalerweise mit einem hohen Anteil passiver Sicherheitseinrichtungen – hier die hohe Längsdruckfestigkeit – realisiert werden, wird im Straßenbahnbereich stärker auf aktive Sicherheit wie eine hohe Bremsverzögerung gesetzt.

Das vorgestellte Konzept konnte die aus diesen Rahmenbedingungen entstehenden Anforderungen sehr gut umsetzen:

- Es erlaubt eine klare umfängliche Strukturierung der Betrachtung (Unterscheidung der Systeme, Funktionen und Informationen). Insbesondere konnte die in der Engineering-Dokumentation umgesetzte Struktur angewendet werden, so dass Zusammenhänge leichter erkennbar sind, und künftige Anpassungen wenige Aufwand erfordern.
- Ferner wird die Einstufung der Sicherheitsrelevanz aus den Systemen und den darin enthaltenen Funktionen heraus durchgeführt. Es wird also weder die Sicherheitsphilosophie der Eisenbahn, noch die der Straßenbahn als Ausgangspunkt gewählt. Durch diesen grundsätzlicheren Ansatz fanden die Ergebnisse bei beiden Zulassungsbehörden gleichermaßen Anklang.

Im Rahmen der Betrachtung der 29 Systeme des Fahrzeugs wurden in der vorausgehenden Untersuchung 16 Systeme mit funktionaler Sicherheitsrelevanz herausgearbeitet. Das wichtigste an diesem Ergebnis war es, dass die übrigen 13 Systeme keiner weiteren Betrachtung zu unterziehen waren. Wie bereits erwähnt konnte die Sicherheitsrelevanz für die als Medium von anderen Systemen verwendeten Systeme Netzwerk (NTW) und Fahrzeuginformationssystem (VIS) zu diesem Zeitpunkt noch nicht endgültig eingeschätzt werden, da diese von der Sicherheitsrelevanz der übertragenen Informationen abhängt.

In der beschriebenen Betrachtung der Software wurden aus den sicherheitsrelevanten Systemen 11 herausgearbeitet, die in Ihrem Software-Anteil Sicherheitsrelevanz besitzen. Nachdem auf Basis der erstellten – durch ihre Strukturierung gut nachvollziehbaren – Dokumentation die Ergebnisse mit beiden Zulassungsbehörden als Grundlage für den Zulassungsprozess der gesamten Fahrzeugsteuerung und ihres Software-Anteils vereinbart waren, konnte somit eine Beschränkung des Aufwandes erreicht werden:

- Die Einschätzung des Risikos einer Fehlfunktion der Steuerung – durch andere geeignete Analysewerkzeuge – wurde auf die als Sicherheitsrelevant eingestuften Systeme beschränkt.
- Die Validierung der Software der Fahrzeugsteuerung wurde bei den Systemen mit sicherheitsrelevanter Software stärker vertieft.
- Die Begutachtung der Software durch eine beim EBA benannte Prüfstelle wurde auf die als sicherheitsrelevant eingestuften Software-Anteile beschränkt.

Ferner wurde durch die Ableitung der Sicherheitsrelevanz für Steuergeräte von Teilsystemen festgelegt, welche dieser Geräte die Anforderungen an die Entwicklung einer sicherheitsrelevanten Software erfüllen müssen.

Durch die Verringerung des Aufwandes konnte die Effizienz des Zulassungsprozesses – immerhin für eine vollständig neue Steuerung – verringert werden. Durch das strukturierte an den Aufbau des Entwicklungsprozesses angelehnte Vorgehen konnte die Effektivität der beteiligten Mitarbeiter erhöht werden, was im Rahmen der knappen Entwicklungszeiten sehr wertvoll ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Ansatz, der in diesem Beitrag vorgestellt und diskutiert wurde, erhebt nicht den Anspruch, eine vollständige Erfüllung der neuen europäischen Standards zu leisten. Vielmehr handelt es sich um einen pragmatischen Ansatz, um die – an sich für Signaltechnik entworfenen – Standards für die ganzheitliche Sicherheitsbewertung von Systemen anwenden zu können. Hierbei steht der Gedanke im Vordergrund, dass auch die Migration der anzuwendenden Methoden in sinnvollen Schritten erfolgen sollte und nicht in einem einzigen revolutionären Schritt. Somit stellt dieser Ansatz nur eine erste Maßnahme zur Anwendung der neuen Normen dar.

Die Stärke des gezeigten Ansatzes liegt darin, dass die einzelnen Schritte eine Detaillierung darstellen, die der zunehmenden Verfeinerung im Laufe der Entwicklung des Systems folgt. Dies birgt den Vorteil, dass die Sicherheitsbetrachtung bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Systementwicklung starten kann und schrittweise der Konkretisierung des Systems folgt. Es können frühzeitig sicherheitstechnische Inkonsistenzen aufgezeigt werden und mit deren Beseitigung kann früher – also auch kosteneffizienter – begonnen werden.

Durch diesen frühzeitigen und den Entwicklungsprozess begleitenden Ansatz ist eine enge Unterstützung des Herstellers und seiner Mitarbeiter gewährleistet, was zu einer erhöhten Effizienz und auch einer steigenden Produktqualität führt.

In der weiteren Entwicklung der Methode wird im nächsten Schritt der bisher nur umrisshaft definierte Schritt sechs mit Inhalt gefüllt und an einem Beispiel erprobt. In Folge wird der weitere Weg zu einem vollständigen Methodengerüst zur Erfüllung der Anforderungen der Standards ausgeführt.

Bibliographie

- [1] CENELEC EN 50 126.
- [2] CENELEC EN 50 128.
- [3] CENELEC EN 50 129.
- [4] EBO
- [5] BOStrab

Teststrategien für komplexe Sicherheitssysteme

Volker Knollmann⁽¹⁾, Ireneus Suwalski⁽²⁾

⁽¹⁾ DLR e.V., Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung

⁽²⁾ Siemens AG

Einleitung

Die Komplexität von Steuerungs- und Automatisierungssystemen hat in den letzten Jahren in allen Bereichen zugenommen. Auch die Entwicklung neuer Leit- und Sicherungstechnik (LST) für Eisenbahnen ist diesem Prozess unterworfen. Vor dem Hintergrund der hohen Sicherheitsverantwortung, die LST-Geräte tragen, müssen deshalb effiziente entwicklungsbegleitende Teststrategien angewandt werden, um einen fehlerfreien und sicheren Betrieb der Geräte im Feld garantieren zu können.

Das Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung (IFS) sucht daher zusammen mit dem Bereich Transportation Systems Rail Automation (TS RA) der Siemens AG nach geeigneten Verfahren, um den Anforderungen moderner Test- und Entwicklungsprozesse gerecht zu werden.

Im Mittelpunkt steht dabei eine verstärkte Formalisierung der Systembeschreibung, um in ein nachfolgenden Schritt eine methodische Ableitung von Testfällen und deren automatische Ausführung zu ermöglichen.

Die Forderung nach effizienten Teststrategien folgt nicht zuletzt aus der Tatsache, dass der Testaufwand für moderne Systeme mitunter mehr als die Hälfte der gesamten Entwicklungskosten ausmacht. Hinzu kommt, dass der Zeitbedarf für Tests und Zulassungsverfahren häufig nur schwer abzuschätzen und somit die termingerechte Inbetriebnahme neuer Geräte beim Kunden gefährdet ist.

Auf der einen Seite ist Testen also „notwendiges Übel“ und auf der anderen Seite ein Verursacher erheblicher Zeit- und Geldaufwände. Der Tester ist daher der beständigen Forderung nach Abwägung zwischen nötigen und möglichen Tests, also der Suche nach der geeigneten Testtiefe, ausgesetzt.

Warum testen?

Es ist bekannt, dass selbst kleine Softwarefehler zu erheblichen Fehlfunktionen bis hin zum vollständigen Systemversagen führen können. Herausragende Beispiele dafür sind der Absturz der Raumsonde Mariner 1 (1962; Fehler: Vertauschung eines Punktes mit einem Komma), der Rakete Ariane 5 (1996; Fehler: Überlauf einer Variablen für die gemessene Momentanbeschleunigung) oder der Marssonde Spirit (2004; Fehler: Überlauf des Flashspeichers).

Bei der Entwicklung neuer Systeme muss daher in intensiven Tests versucht werden, ein Fehlverhalten des Systems hervorzurufen, denn nur dann können aus dem Test Maßnahmen für die nächsten Entwicklungs- oder Debuggingsschritte abgeleitet werden.

Ausschlaggebend für die Wahl der Testfälle ist zunächst die Normalfunktion des Systems, also die Überprüfung des Geräteverhaltens im Regelbetrieb. Das Ziel ist, jede funktionale Anforderung durch mindestens einen Testfall abzudecken. Damit ist die Testtiefe jedoch bei weitem noch nicht ausreichend, da nicht nur der Regelbetrieb eines Gerätes simuliert und untersucht werden muss, sondern vor allem auch der Störbetrieb. Dies geschieht durch Aufschaltung von Eingangsgrößen, die im Grenzbereich der Spezifikation oder sogar darüber liegen. Typische Beispiele dafür sind das Beaufschlagen des Gerätes mit Bedienfehlern oder verfälschten Messwerten von den Sensoren (so genannte Istwert-Fehler). Mit solchen Tests wäre beispielsweise der oben genannte Fehler bei der Rakete Ariane 5 leicht aufzudecken gewesen.

Tests sind also zwingend notwendig, um das Vertrauen in das zu entwickelnde System zu erhöhen. Sie können jedoch niemals die absolute Fehlerfreiheit eines Gerätes nachweisen, da jeder Test nur eine Stichprobe aus einem praktisch unendlich großen Zustandsraum von System und Umwelt darstellt.

Beispiele für sicherheitskritische Systeme im Bahnbereich

Im Fokus der gemeinsamen Untersuchungen von IFS und Siemens TS RA stehen so genannte Fahrzeugsysteme für das europäische Zugsicherungssystem ETCS (European Train Control System).

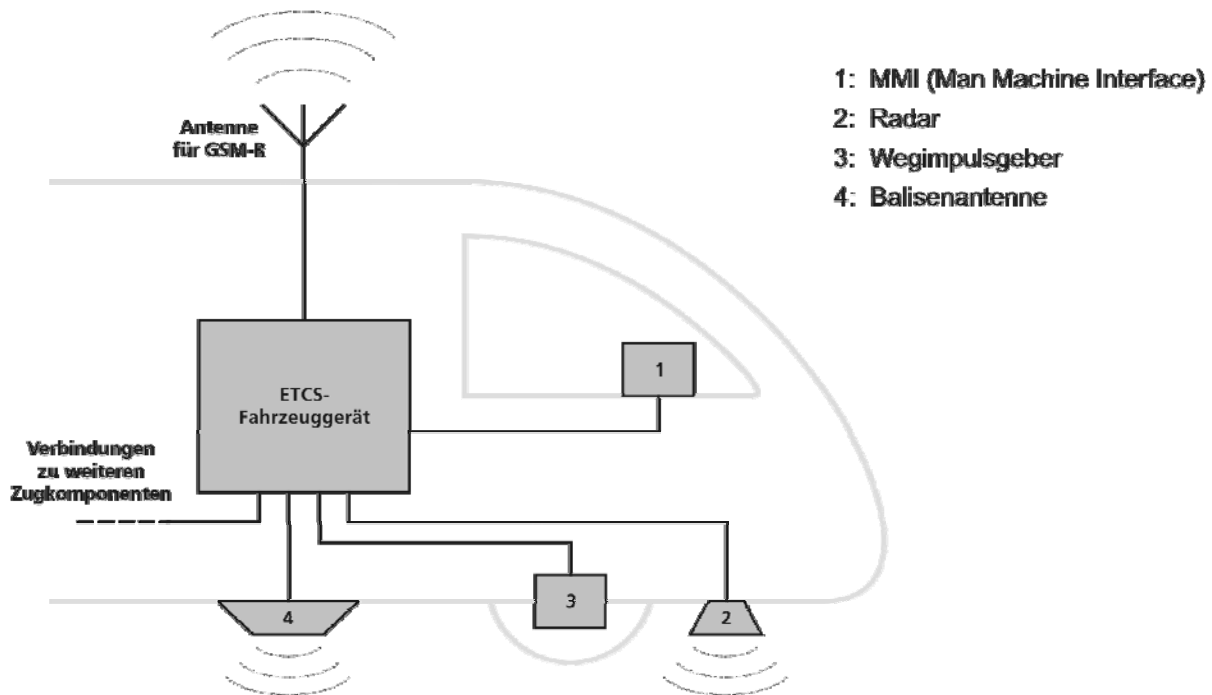


Abbildung 1: ETCS-Fahrzeuggerät und Systemumgebung

Wie die Abbildung zeigt, unterhält das Gerät vielfältige Kommunikationsbeziehungen nach außen (GSM-Funktechnik, Antennen für Transponder (Balisen), Bussysteme zu anderen Systemen im Zug) und ist auch mit eigener Sensorik ausgestattet (z. B. Wegimpulsgeber und Radar zur Ortung). Die Kommunikation mit dem Bediener erfolgt über einen Touchscreen.

Das Fahrzeuggerät ist unter anderem verantwortlich für die Positionsbestimmung des Zuges sowie für die Berechnung und Einhaltung zulässiger Höchstgeschwindigkeiten. Durch die Einleitung von Bremsvorgängen bei Geschwindigkeitsüberschreitung stellt das System sicher, dass der Zug nicht mit vorausfahrenden Fahrzeugen kollidiert oder nicht gesicherte Streckenabschnitte (u. a. mit möglicherweise falsch gestellten Weichen) befährt. Durch die Erfüllung dieser Funktionen übernimmt das Gerät einen wesentlichen Teil der Sicherheitsverantwortung für die gefahrlose Bewegung des Zuges, vor allem bei hohen Geschwindigkeiten. Der Fahrzeugführer muss sich dabei „blind“ auf das System verlassen können, da Züge aufgrund ihres langen Bremsweges in der Regel nicht auf Sicht gefahren werden können.

Die Einführung eines europaweit einheitlichen Sicherungssystems, dessen Spezifikation wie im Falle von ETCS frei zugänglich ist, führt zu einer Vielzahl von Anbietern für strecken- bzw. fahrzeugseitige Systemkomponenten. Der Vorteil dieses politisch durchaus erwünschten Effektes ist verstärkter Wettbewerb zwischen den Anbietern und damit verbundene Kostenreduzierungen bei Neuerwerb und Wartung von Geräten.

Als problematisch erweist sich jedoch die Sicherstellung der betrieblichen und technischen Interoperabilität. Das heißt, dass durch spezielle Tests nachgewiesen werden muss, dass Komponenten verschiedener Hersteller den Spezifikationen entsprechen und sowohl fehlerfrei als auch sicher und zuverlässig zusammenarbeiten. Die Bestätigung der Interoperabilität erfolgt im Falle von ETCS durch nationale „Benannte Stellen für Interoperabilität“, die ihrerseits spezielle unabhängige Referenzlabore mit entsprechenden Testreihen beauftragen.

Neben der bisher dargestellten ETCS-Funktionalität muss ein Fahrzeugsystem allerdings noch weitere Anforderungen erfüllen, die in der Regel spezifisch für ein Projekt, einen Kunden oder eine Kundengruppe sind. Beispiele dafür sind die Integration bestehender nationaler Altsysteme für Zugsicherung, die Berücksichtigung nationaler betrieblicher Besonderheiten (z. B. Deichtore auf der niederländischen Hochgeschwindigkeitsstrecke „HSL Zuid“) oder die Anpassung an den Loktyp, auf dem das System zum Einsatz kommen soll.

Die Anforderungen an ein ETCS-Fahrzeuggerät können also in mehrere Kategorien unterteilt werden, wie folgende die Aufstellung zeigt. Dabei nimmt in der Liste die Wiederverwendbarkeit der zugehörigen Testfälle von oben nach unten ab (entsprechend nehmen Aufwand und Kosten zu):

- ETCS-Grundfunktionen (sog. „Class 1 functions“)
- Generische Nicht-ETCS-Funktionen, die häufig gefordert werden
- Projekt- oder kundenspezifische Funktionen

Das größte Optimierungspotential liegt also in der effizienten Ableitung und Ausführung der projektspezifischen Tests. Eine dazu notwendige methodische oder automatisierte Unterstützung des Testvorganges (einschließlich Erstellung, Beschreibung und Ausführung der Tests) erfordert in jedem Falle eine möglichst formale Darstellung der gesamten Systemanforderungen, da nur dann eine geeignete Basis für die Anwendung ebenfalls formaler Algorithmen und Methoden gegeben ist, die letztlich in einer Automatisierung der Testvorgänge münden.

Formalisierte Anforderungsbeschreibung

Die Anforderungen der Kunden liegen heute überwiegend in textueller Form vor. Bekanntlich birgt diese Art der Darstellung stets die Gefahr von Fehlinterpretationen (besonders bei fremdsprachlichen Texten), Unvollständigkeits, Widersprüchen und impliziten Annahmen, die dem Kunden zwar als selbstverständlich erscheinen, für den Hersteller jedoch explizit aufgeführt werden müssten (oder umgekehrt).

Es gibt diverse Ansätze, diese Unzulänglichkeiten durch den Einsatz formaler oder semi-formaler Beschreibungsmittel auszugleichen. Sehr formale Notationen wie beispielsweise Petrinetze haben häufig den Nachteil einer sehr abstrakten Darstellung des Systemverhaltens, wodurch sich einem Außenstehenden, auch wenn er mit der Notation vertraut ist, die Systembeschreibung nur schwer erschließt. Beispiele für den Einsatz von Petrinetzen für die Entwicklung von Leit- und Sicherungstechnik finden sich u. a. in [CHOUKHA et al. 2000] und [SCHNIEDER 2000].

Weniger formale Beschreibungsmittel wie etwa die Verwendung von Textschablonen (siehe auch [RUPP 2004]) schaffen zwar bereits eine signifikante Verbesserung hinsichtlich der Eindeutigkeit der Beschreibung und lassen sich auch vergleichsweise leicht verstehen, entbehren dafür aber einer mathematischen Basis und sind daher hinsichtlich ihrer Syntax und vor allem ihrer Semantik zu unscharf definiert. Das erschwert die Ankopplung methodischer Verfahren zur Automatisierung des Testvorganges.

Das IFS arbeitet zusammen mit Siemens TS RA daran, durch die Verwendung von UML (Unified Modelling Language, [OMG 2004]) einen Mittelweg zwischen einer informalen, textuellen Beschreibung und einer vollständig abstrakten, formalen Notation zu finden. UML ist eine graphische Modellierungssprache, die vor allem in der Informatik bereits eine weite Verbreitung gefunden hat. Sie basiert auf einem objektorientierten Ansatz und erlaubt sowohl die Beschreibung der statischen Systemstruktur als auch des dynamischen Systemverhaltens. Die UML verfügt jedoch nicht über eine vollständige mathematische Basis, so dass sie „nur“ zur Gruppe der semi-formalen Beschreibungsmittel zählt.

Durch Erweiterung klassischer UML-Beschreibungen durch sogenannte „Action-Semantics“ (ebenfalls definiert in [OMG 2004]) kann der Formalisierungsgrad des Modells jedoch soweit erhöht werden, dass eine Simulation des Modells möglich wird. Diese „Action Semantics“ definieren elementare

Operationen zur Beschreibung von Objektverhalten und Objektinteraktion, also z. B. das Erzeugen oder Vernichten von Objektinstanzen, den Austausch von Signalen und Events, den Aufruf von Methoden oder den Zugriff auf Attribute. Bei der Simulation von Zustandsdiagrammen wird beispielsweise das Versenden von Events verwendet, um Transitionen benachbarter (parallel ausgeführter) Zustandsmaschinen auszulösen.

Da in den „Action Semantics“, wie der Name schon andeutet, nur eine Semantik aber keine Syntax und keine Semiotik enthalten ist, bietet jeder Toolhersteller seine eigene toolspezifische Implementierung der „Action Semantics“ an. Dabei handelt es sich für gewöhnlich um eine spezielle „Programmiersprache“ (also eine textuelle Notation), deren Mächtigkeit die von der OMG spezifizierten Semantik (oder einer Untermenge davon) entspricht. Mit Hilfe dieser Programmiersprachen werden dann beispielsweise in Zustandsautomaten Bedingungen für einen Zustandswechsel definiert oder auszuführende Aktionen beim Betreten oder Verlassen eines Zustands. Da das UML-Modell durch die Anreicherung mit „Action-Semantics“-Elementen ausführbar und simulierbar wird, spricht man in diesem Zusammenhang auch von „Executable UML“ oder kurz „xUML“.

In Anlehnung an die Prinzipien des MDD-Prinzips (Model Driven Development), soll nun unter Rückgriff auf xUML folgendes methodisches Vorgehen realisiert werden (siehe auch Abb. 2 und 3):

1. Übersetzung der Kundenanforderungen in ein UML-Modell. Das Modell umfasst überwiegend funktionale Aspekte des zu implementierenden Systems und kaum Informationen über die spätere Realisierung. Es handelt sich also um ein Black-Box- oder GrayBox-Modell.
2. Erweiterung des Modells um „Action-Semantics“-Elemente, die das Modell ausführbar und damit simulationsfähig machen.
3. Validierung des Modells gegen die Kundenanforderungen durch Simulation. Der Kunde sollte in diesen Schritt mit eingebunden werden.

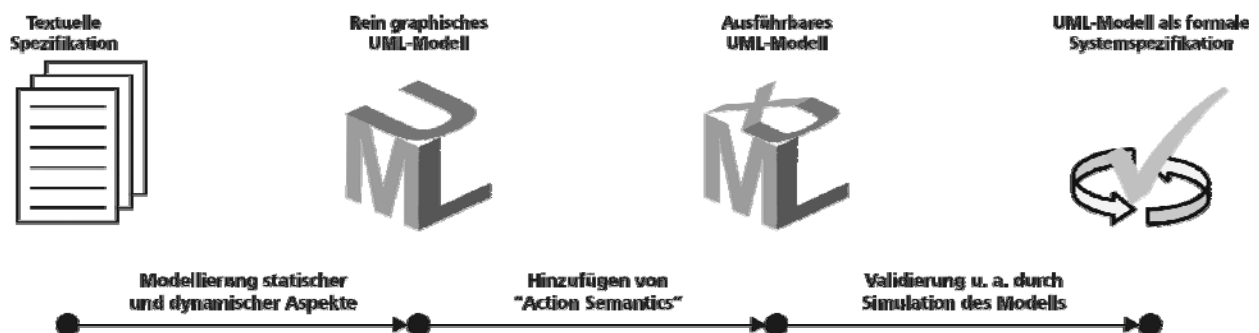


Abbildung 2: Übergang von der textuellen und informalen Spezifikation zum validierten und ausführbaren UML-Modell.

4. Nach der Validierung kann parallel die Entwicklung des Gerätes und die Erstellung von Testfällen begonnen werden. Beide verwenden das Modell als Grundlage, das Modell wird damit zur Anforderungsspezifikation. Die einzelnen Entwicklungsschritte werden gegen das Modell verifiziert. Testvektoren und Testsequenzen können aus der Simulation abgeleitet werden (z. B. durch die Aufzeichnung von Bedienhandlungen an der Simulation).
5. Testfälle werden in Form von UML-Sequenzdiagrammen hinterlegt. Sie bieten eine übersichtliche Darstellung und können leicht wiederverwendet oder angepasst werden. Die Sequenzdiagramme zeigen die Interaktion zwischen Testablaufsteuerung, Testumgebung und Prüfling. Dazu muss ein BlackBox-Modell der Testumgebung hinterlegt sein.
6. Die Sequenzdiagramme können bei Bedarf automatisiert in ein XML-Dokument (Extensible Markup Language) überführt werden, das dann zur Steuerung der Testumgebung verwendet wird. Eine zugehörige XML-Format-Spezifikation (XML-Schema) wird derzeit am IFS erarbeitet [EBRECHT 2004].

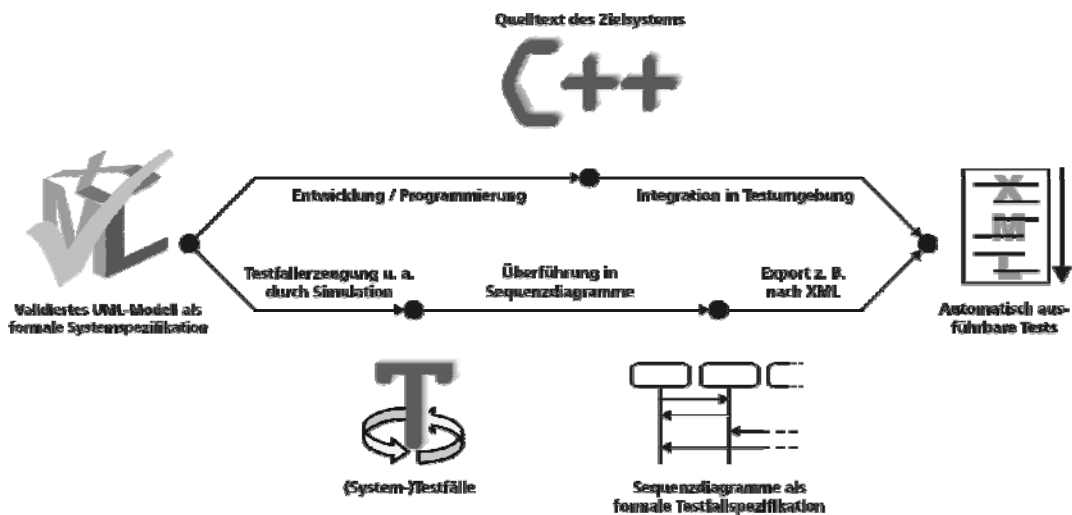


Abbildung 3: Übergang vom xUML-Modell zum automatisch ausführbaren Test

Diese Methode muss von einem geeignetem Requirements-Engineering (kurz „RE“) begleitet werden, das eine bidirektionale Zuordnung initialer Kundenanforderungen zu Modellkomponenten und Testfällen erlaubt. Das erleichtert das Einpflegen bzw. Verfolgen von Anforderungsänderungen und ermöglicht eine Aussage über den Implementierungsstand von Modell und Testfällen. Die Bedeutung des RE und die wichtige Verknüpfung von Anforderungs- und Testspezifikation wird ausführlich in [RUPP 2004] vertieft und speziell für den Eisenbahnbereich u. a. auch in [BIKKER 2002] behandelt.

Komponenten des UML-Modells

Wie oben bereits erwähnt besteht ein Modell prinzipiell aus den statischen und den dynamischen Systemeigenschaften. Erste werden in UML in Form von Klassen- und Strukturdiagrammen beschrieben, während letztere überwiegend als Zustands- und Sequenzdiagramme hinterlegt werden. Ergänzt wird das Modell durch Anwendungsfalldiagramme, in denen für typische Nutzungsszenarien die Interaktion des Systems mit seiner Umwelt gezeigt wird (für eine Beschreibung aller Diagrammartentypen siehe auch [OMG 2004]).

Neben der Modellstruktur ist aber vor allem die Menge der im Modell enthaltenen Systemfunktionen interessant. Dazu muss man sich vor Augen halten, dass ein Modell immer nur den Teil der Realität abbildet, der für den Einsatzzweck des Modells relevant ist. Andere Teile werden nicht oder nur verkürzt wiedergegeben.

Im hier zu entwickelnden UML-Modell sollen auf einer relativ hohen Ebene die funktionalen Kundenanforderungen an ein Fahrzeuggerät implementiert werden. Daraus folgt, dass beispielsweise die Architektur des Zielsystems nicht oder nur sehr grob erfasst wird. Ebenso werden viele Kommunikationsbeziehungen zwischen Subsystemen nicht in die Modellierung einbezogen. Andererseits ist aber sehr viel Sorgfalt auf die Schnittstellen zur Außenwelt zu legen. Das Innere der Black Box, die das Fahrzeuggerät symbolisiert, kann also nahezu beliebig von der späteren Realisierung abweichen, wichtig ist nur, dass das richtige Schnittstellenverhalten erzeugt wird.

Da das Modell vornehmlich der Validierung des funktionalen Systemverhaltens dient, kann auch auf eine Echtzeitfähigkeit weitestgehend verzichtet werden, da die Echtzeitfähigkeit des Zielsystems in hohem Maße von seiner Architektur abhängt, die nicht im Modell enthalten ist. Nichtsdestotrotz sollten aber Echtzeitbedingungen als so genannte „Constraints“ zur späteren Referenz im Modell hinterlegt werden (das Modell soll ja die Spezifikation ersetzen).

Ein kritischer Punkt bei der Isolierung der funktionalen Anforderungen aus den Dokumenten des Kunden ist das Erkennen impliziter Annahmen, die in der Regel auf Basis eines domänenspezifischen „Grundlagenwissens“ getroffen wurden, das für alle am Projekt Beteiligten stillschweigend als

einheitlich vorausgesetzt wurde. Vielfach ist das Domänenwissen aber bei weitem nicht so einheitlich wie vermutet, speziell wenn Fachleute aus verschiedenen Bereichen der Domäne zusammentreffen.

Ein Beispiel soll die Tragweite impliziter Annahmen verdeutlichen. Eine typische Anforderung an das Fahrzeugsystem kann lauten: „Das System hat die Einhaltung der ihm erteilten Fahrerlaubnis sicherzustellen.“. Unter Rückgriff auf Domänenwissen können daraus die folgenden funktionalen Anforderungen abgeleitet werden (die Auflistung ist exemplarisch und daher unvollständig):

- Das System muss mindestens eine Fahrerlaubnis empfangen und speichern können.
- Die Fahrerlaubnis muss Angaben über die Länge der freigegebenen Strecke und die maximal erlaubten Geschwindigkeiten auf den darin enthaltenen Streckenabschnitten enthalten.
- Das System muss seine Position und Geschwindigkeit kennen.
- Das System muss zu jeder Zeit die Geschwindigkeit berechnen, aus der der Zug zum Ende der Fahrerlaubnis noch zum Stillstand gebracht werden kann.
- Das System muss zu jeder Zeit die aktuelle Geschwindigkeit gegen die berechnete maximal zulässige Geschwindigkeit sowie die maximale Streckengeschwindigkeit vergleichen.
- Das System muss bei Überschreitung der berechneten oder vorgegebenen Höchstgeschwindigkeit einen automatischen Bremseneingriff vornehmen.
- Das System muss das Bremsvermögen, die Länge und die Masse des Zuges kennen, um den Bremsweg berechnen zu können.

Dieses einfache Beispiel zeigt den enormen Einfluss impliziter Annahmen und domänenspezifischen Wissens. Der Vorteil der modellbasierten Entwicklung, wie sie hier vorgeschlagen wird, ist die Aufdeckung und die explizite Darstellung dieser Anforderungen zu einem frühen Entwicklungszeitpunkt, nämlich direkt bei der Analyse der Kundenanforderungen und deren Umsetzung in UML. Ohne die explizite UML-Darstellung impliziter Kundenanforderungen kann das Modell nicht ausführbar gemacht werden oder nicht den Kundenerwartungen entsprechen. Die korrekte Interpretation der Kundenanforderungen ist somit sichergestellt.

Selbstverständlich kann auch das Domänenwissen im Bereich Eisenbahn und LST durch formale Modelle vereinheitlicht und eindeutig erfasst werden. Einen umfassenden Beitrag dazu liefern [BJØRNER et al. 1999a] und [BJØRNER et al. 1999b].

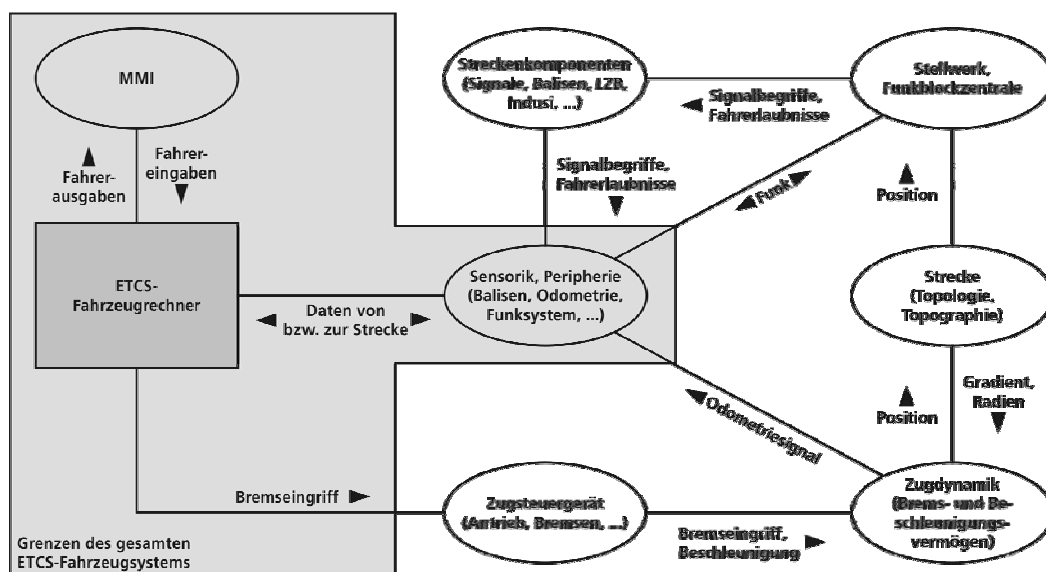


Abbildung 4: Überblick über zusätzlich benötigte Modellkomponenten für die Simulation eines Fahrzeuggerätes (vereinfacht)

In diesem Kontext ist zu berücksichtigen, dass das für die Simulation notwendige Modell über die zu entwickelnde Komponente hinausgeht. Für die Stimulation der Eingänge des Fahrzeuges während der Simulation muss beispielsweise eine einfache Implementierung von Zugdynamik, Strecke und streckenseitiger Sicherungstechnik hinterlegt sein. Im Sinne des oben eingeführten Modellbegriffs kann die Darstellung dieser Komponenten zwar stark verkürzt erfolgen, jedoch müssen die externen Schnittstellen des Fahrzeuggerätes korrekt bedient werden (s. Abb. 4).

Die Beschreibung von Testszenarien erfordert ähnlich wie die eben erläuterte Simulation die Einbindung spezieller Komponenten in das UML-Modell. Dazu muss vorausgeschickt werden, dass ein wichtiger Teil der Tests als Hardware-in-the-Loop-Test (HiL-Test) stattfindet. Das bedeutet, dass ein vollständig integrierter Prüfling bestehend aus Zielhard- und Zielsoftware an seinen realen Schnittstellen zur Außenwelt mit Signalen beaufschlagt wird, die einem bestimmten Betriebsszenario des Gerätes entsprechen. Das Gerät wird also in eine Simulation seiner Umgebung eingebunden. Durch Protokollierung des Verhaltens des Prüflings kann dann online oder offline überprüft werden, ob sich das Gerät spezifikationskonform verhalten hat.

Mit Hinblick auf die ebenfalls per UML zu erfassenden Testabläufe ist daher das Gesamtmodell durch ein Abbild der Testumgebung zu ergänzen. Dabei handelt es sich ebenfalls um ein BlackBox-Modell, das die Schnittstellen der Testumgebung (erzeugt die Stimuli für den Prüfling gemeint) zur Ablaufsteuerung (enthält das Szenario) und zum Prüfling spezifiziert. Die Testumgebung kann man als Umsetzer bzw. Interface betrachten, die basierend auf Softwarefunktionsaufrufen den Prüfling mit physikalischen Signalen versorgt. Von außen gesehen statet die Testumgebung den Prüfling also mit einer Softwareschnittstelle aus, die von der Ablaufsteuerung zur Umsetzung des Testszenarios angesprochen wird. Diese Softwareschnittstelle ist daher zur Modellierung von Testszenarien ebenfalls im UML-Modell zu hinterlegen. Ähnlich wie bei der Erfassung von Zugdynamik und Streckenkomponenten ist der interne Aufbau der Testumgebung für das UML-Modell nachrangig.

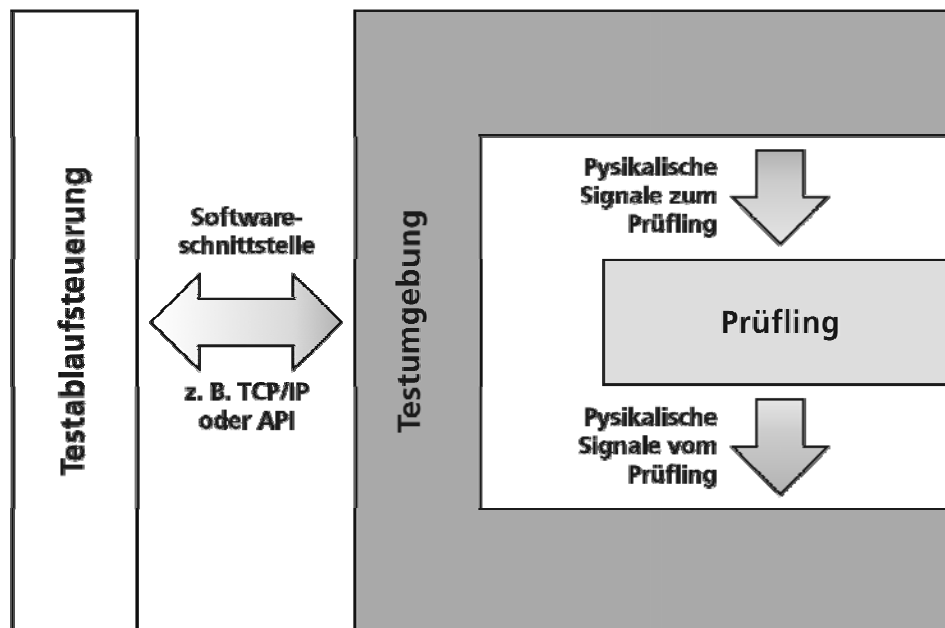


Abbildung 5: Zusammenspiel zwischen Testablaufsteuerung, Testumgebung und Prüfling bei der Hardware-in-the-Loop-Simulation

Eine Möglichkeit, alle bisher erwähnten Komponenten zu einer konsistenten Beschreibung zusammenzuführen, ist die Verwendung eines generischen Modells von strecken- und fahrzeugseitiger LST als Ausgangsbasis, das dann in den relevanten Punkten (hier vor allem bei der Zugsicherungstechnik) um detailliertere Beschreibungen ergänzt wird. Ein solches generisches Modell, das zug- und streckenseitige Funktionen gleichermaßen enthält und auf der Grundlage von Petrinetzen realisiert wurde, stellt [MEYER ZU HÖRSTE 2004] vor.

UML-basierte Ansätze für Stellwerke (also rein streckenseitige Funktionen) wurden unter anderem bereits von [ARABESTANI und GAYEN 2000] und [JANOTA et al. 2002] vorgestellt. Die großen Vorteile durch die Verwendung von UML während der Systemanalyse werden auch in dem Artikel [TROG und ERIKSSON 2004] herausgestellt. Den Schritt hin zum ausführbaren UML-Stellwerksmodell hat das EuroInterlocking-Projekt getan. Ähnlich zu der hier gezeigten Methode werden dort UML-Modelle mit Action-Semantic-Elementen versehen und somit simulierbar gemacht ([COURCEY-BAYLEY 2004]).

Am IFS entsteht gerade ein entsprechendes Modell eines Fahrzeuggerätes, das die Realisierbarkeit der hier vorgestellten Methoden beweisen soll. Der momentane Arbeitsstand umfasst die Berechnung und Überwachung von Bremskurven, eine einfache Zugdynamik sowie ein einfaches Streckenmodell. Ein in sich geschlossenes Modell, an dem weitere Untersuchungen vorgenommen werden können (beispielsweise die Integration von Testfallspezifikationen) wird voraussichtlich zum Ende des Jahres vorliegen.

Testfallspezifikation durch Sequenzdiagramme

Die Zulassung eines Fahrzeuggerätes für den öffentlichen Einsatz erfordert den Nachweis der Funktionsfähigkeit und Spezifikationskonformität am fertigen Gesamtsystem. Das Gerät wird dazu den oben bereits erwähnten HiL-Tests unterzogen.

Die „UNISIG-Spezifikationen“ ([UNISIG 2003]) legen dazu eine Reihe von virtuellen Zugfahrten entlang einer fiktiven Strecke fest, in deren Verlauf jede Funktion eines Fahrzeuggerätes mindestens einmal angesprochen wird. Die Fahrt an sich ist als eine Abfolge von Ereignissen definiert, wobei jedes Ereignis durch die Zustandsänderung bzw. Informationsübertragung an einer der Systemschnittstellen gekennzeichnet ist. Die TSI spezifiziert darüber hinaus zu jedem Ereignis das zugehörige Sollverhalten des Fahrzeugs. Nur ein Fahrzeug, das in allen Testsequenzen den Vorgaben entsprechend reagiert, wird als spezifikationskonform und damit interoperabel akzeptiert.

Das Testszenario ist also durch eine Abfolge von Nachrichten, Ereignissen bzw. Informationen definiert, die zwischen dem Prüfling und der Testumgebung ausgetauscht werden. Dieses Vorgehen ist repräsentativ für die Klasse der System- oder Schnittstellentests, in denen der Prüfling als Black Box betrachtet und korrektes Schnittstellenverhalten abgeprüft wird.

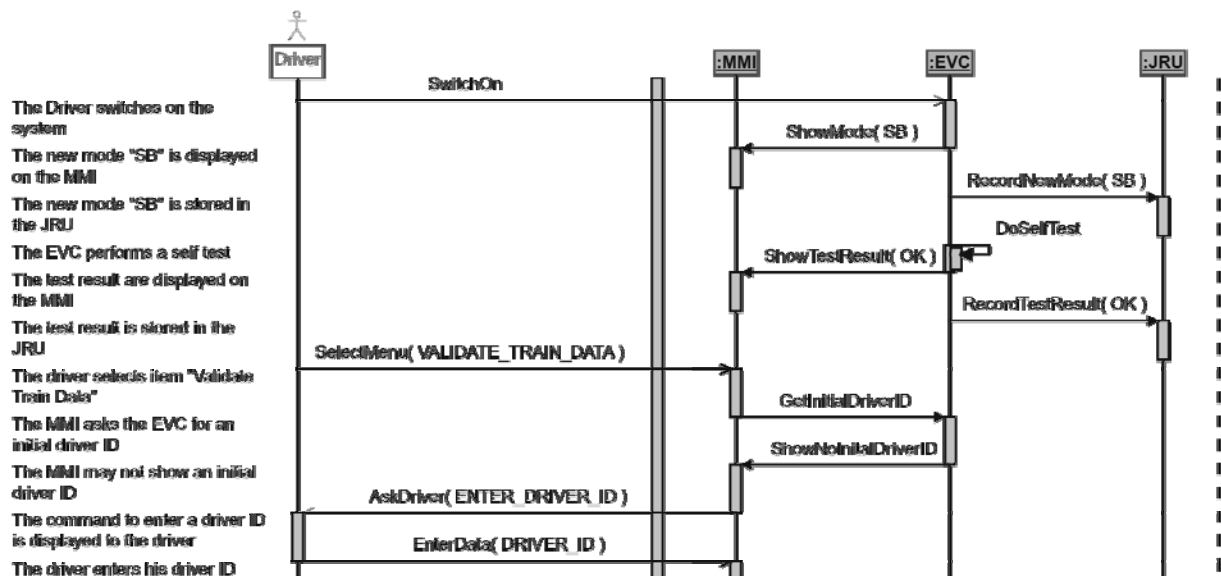


Abbildung 6: Exemplarisches Sequenzdiagramm für den Anfang einer Testsequenz (hier: UNISIG-Testsequenz für Interoperabilität)

Um die Testspezifikation analog zur Systemspezifikation in das Gesamtmodell aufnehmen zu können, muss sie in geeigneter Weise formalisiert werden. Dafür bietet sich die Verwendung von UML-Sequenzdiagrammen an (Abb. 6). In Sequenzdiagrammen wird eine Abfolge von Ereignissen zwischen

Objekten erfasst, wobei die Ereignisse entweder Methodenaufrufen oder direkten Datenübergaben (in Form sogenannter Events) entsprechen. Alternativ können auch zuvor spezifizierte Anwendungsfälle („Use Cases“) aufgerufen werden, die dann mehrere Schritte bzw. Objektinteraktionen kapseln.

Die Verwendung von Sequenzdiagrammen bietet eine Reihe von Vorteilen:

- Die Darstellung ist erheblich übersichtlicher als die üblicherweise verwendeten textuellen oder tabellarischen Testfallbeschreibungen.
- Es können im Sequenzdiagramm nur Methodenaufrufe definiert werden, die im zugehörigen Klassendiagramm des aufgerufenen Objektes deklariert wurden. Auf diese Weise ergibt sich bereits während der Modellierung eine einfache Konsistenzprüfung der Schnittstellen von Prüfling und Testumgebung.
- Die formalisierten Testszenarien können in Bibliotheken erfasst und an anderer Stelle wiederverwendet werden. Eine Anpassung ist aufgrund der übersichtlichen Darstellung leichter möglich als beispielsweise im Quelltext von fest programmierten Testsequenzen.
- Die Sequenzdiagramme können automatisiert in andere Darstellungsformen (z. B. XML) überführt werden.

Vor allem der letzte Punkt verspricht eine erhebliche Arbeitserleichterung, da der Export des Sequenzdiagramms genutzt werden kann, um die Testumgebung anzusteuern. Auf diese Weise kann der Testablauf automatisiert werden, wie auch [SCHIEBER 2003] und [GÜHMANN und RIESE 2002] für den Einsatz in der Automobilindustrie zeigen. Wie bereits erwähnt arbeitet das IFS momentan an der Entwicklung eines XML-Formates, mit dem sich die durch die TSI geforderten Systemtests beschreiben und automatisiert durchführen lassen. Die Erzeugung entsprechender XML-Dokumente aus Sequenzdiagrammen ist als nächster Entwicklungsschritt vorgesehen.

Die Erstellung von Sequenzdiagrammen zur Spezifizierung von Testszenarien kann auf mehreren Wegen erfolgen. Die einfachste Lösung ist die manuelle Erstellung neuer Diagramme bzw. die Anpassung vorhandener Diagramme. Ebenso ist aber auch eine automatisierte Erzeugung denkbar, z. B. durch Aufzeichnung von Bedienhandlungen an der Simulation. Diese Variante bietet darüber hinaus den Vorteil, dass die Simulation bereits Sollwerte für das Testergebnis liefert.

Liegen die Testspezifikationen in einem formalen Format vor, kann neben der automatisierten Testdurchführung auch eine automatisierte Testauswertung vorgenommen werden. Das setzt eine Protokollierung des Testverlaufs voraus, die bei HiL-Tests aber in der Regel gegeben ist, schon alleine, um eine spätere manuelle Auswertung zu ermöglichen.

Die Erprobung der hier vorgestellten Konzepte erfolgt am IFS unter Nutzung des Bahnlabors RailSiTe® (Railway Simulation and Testing), einem von zwei anerkannten Referenzlaboren zur Durchführung von Interoperabilitätstests für ETCS-Geräte. Die Umsetzung der Konzepte ist noch nicht abgeschlossen, aber die ersten Zwischenergebnisse sind ermutigend. Die Erstellung ausführbarer UML-Modelle konnte am Beispiel eines einfachen Zugsicherungssystems gezeigt werden, dessen Spezifikation in Zusammenarbeit mit Siemens erstellt wurde und momentan erweitert wird. Die Spezifikation eines XML-Formates zur Beschreibung von Testsequenzen ist ebenso wie die automatische Auswertung von im Labor durchgeführten Simulationen in einem fortgeschrittenen Stadium.

Zusammenfassung

Testen ist integraler Bestandteil jeder Entwicklung und wird dennoch in Aufwand und Bedeutung häufig falsch eingeschätzt. Speziell im Bereich der Leit- und Sicherungstechnik für Eisenbahnen muss in erheblichem Umfang getestet werden, um den Sicherheitsanforderungen und den Interoperabilitätskriterien für die Zugsicherungssysteme gerecht zu werden.

Das IFS und Siemens TS RA untersuchen gemeinsam den verstärkten Einsatz formaler Ansätze in der Entwicklung, um den Testaufwand zu reduzieren und gleichzeitig eine erhöhte Produktqualität sicherzustellen. Die wichtigsten Aspekte der Untersuchung sind die Erstellung und Verwendung

ausführbarer UML-Modelle als Systemspezifikation bzw. Entwicklungsgrundlage sowie eine formalisierte Beschreibung von Testabläufen mit Hilfe von Sequenzdiagrammen. Die Automatisierung des Testablaufs, die mit Hilfe des Bahnlabors RailSiTe am IFS erprobt wird, verspricht zusammen mit einer automatisierten Testauswertung eine erheblich Reduzierung des Zeitaufwands für die Tests. Durch Kopplung der automatisierten Testausführung mit der formalen Spezifikation von Testabläufen (Sequenzdiagramme) sollen künftig noch effizientere Tests ermöglicht werden.

Literatur

- [ARABESTANI und GAYEN 2000] ARABESTANI, S. und J.-T. GAYEN (2000). Prinzip der Vererbung bei der objektorientierten Analyse am Beispiel der funkbasierten Bahnübergangsteuerung. In: [SCHNIEDER 2000], S. 11 – 24.
- [BIKKER 2002] BIKKER, G., und M. SCHROEDER (2002). Methodische Anforderungsanalyse und automatisierter Entwurf sicherheitsrelevanter Verkehrsleitsysteme mit kooperierenden Werkzeugen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. VDI Verlag, Fortschritt-Berichte VDI Nr. 529, Reihe 12, Düsseldorf
- [BJØRNER et al. 1999a] Bjørner, D., J. Braad und K. S. Morgensen (1999). Models of Railway Systems: Domain. In: [LARSEN und PETERSEN 1999]
- [BJØRNER et al. 1999b] Bjørner, D., J. Braad und K. S. Morgensen (1999). Models of Railway Systems: Requirements. In: [LARSEN und PETERSEN 1999]
- [CHOUIKHA et al. 2000] CHOUIKHA, M., S. EINER, M. MEYER ZU HÖRSTE und E. SCHNIEDER (2000). Ansätze zur Entwicklung von Eisenbahnleitsystemen auf der Basis von Petrinetzen. In: [SCHNIEDER 2000], S. 57 – 84.
- [COURCEY-BAYLEY 2004] DE COURCEY-BAYLEY, C. (2004). Modelling interlocking system requirements in UML using state diagrams and object constraint/action language. In: [SCHNIEDER 2004].
- [EBRECHT 2004] Ebrecht, L. und M. Meyer zu Hörste (2004). Formal Test Description - the central element for the automation of the process of testing. In: [SCHNIEDER 2004].
- [GÜHMANN und RIESE 2002] GÜHMANN, C. und J. RIESE (2002). Testautomatisierung in der Hardware-in-the-Loop Simulation. VDI / VDE Symposium zur Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren – Autorex 2002. 15. – 16. April 2002, Mannheim.
- [JANOTA et al. 2002] JANOTA, A., K. RÁSTOCNÝ und J. ZHRADNIK (2002). UML-based Specification of a Railway Interlocking and Signalling System. In: [SCHNIEDER 2002], S. 131 – 142.
- [LARSEN und PETERSEN 1999] LARSEN, P. G. und J. S. PETERSEN, Hrsg. (1999). Proceedings of the FMERail Workshop No. 3. www.ifad.dk/Projects/fmerail/fmerail3.htm
- [MEYER ZU HÖRSTE 2004] MEYER ZU HÖRSTE, M. (2004). Methodische Analyse und generische Modellierung von Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. VDI Verlag, Fortschritt-Berichte VDI Nr. 571, Reihe 12, Düsseldorf
- [OMG 2004] OMG (2004). Unified Modelling Language Superstructure Specification, Version 2.0. Object Management Group. www.uml.org. Stand: Oktober 2004.
- [RUPP 2004] RUPP, C. (2004). Requirements-Engineering und -Management. Hanser Fachbuchverlag, München.
- [SCHIEBER 2003] SCHIEBER, R. (2003). Integrated Test Services. Beitrag zum deutschsprachigen Artisan-Benutzerforum D.A.CH. 15. – 16. Mai 2003, Stuttgart. http://www.artisansw.com/seminars/DACH_UserForum_2003presentations.zip
- [SCHNIEDER 2000] SCHNIEDER, E., Hrsg. (2000). FORMS 2000 – Formale Techniken für die Eisenbahnsicherung. VDI Verlag, Fortschritt-Berichte VDI Nr. 441, Reihe 12, Düsseldorf.

[SCHNIEDER 2002] SCHNIEDER, E., Hrsg. (2002). International Workshop on Software Specification of Safety Relevant Transportation Control Tasks. VDI Verlag, Fortschritt-Berichte VDI Nr. 535, Reihe 12, Düsseldorf.

[SCHNIEDER 2004] SCHNIEDER, E. und G. TARNAI, Hrsg. (2004). FORMS/FORMAT 2004 - Formal Methods for Automation and Safety in Railway and Automotive Systems / Proceedings of Symposium FORMS /FORMAT 2004. 02. – 03. Dezember 2004, Braunschweig. Technische Universität Braunschweig.

[TROG und ERIKSSON 2004] TROG, C. und L.-H. ERIKSSON (2004). Spezifikation von Stellwerkslogik mit formalen Methoden. In: „Signal + Draht“, Nr. 1+2/2004, S. 18 – 21, Tetzlaff Verlag, Hamburg.

[UNISIG 2003] UNISIG. (2003): Test Plan. Subset 076 der Technical Specification for Interoperability (TSI). Version 2.2.2, 18.06.2003. <http://www.aEIF.org/ccm/doclist.asp>

Passagierführung im Terminal

Mikroskopische Simulation des Übergangs von Passagieren vom Terminal in einen Bus und umgekehrt

Andreas Deutschmann⁽¹⁾, Dorothee Bernhard⁽²⁾

⁽¹⁾ DLR e.V., Flughafenwesen und Luftverkehr

⁽²⁾ Fraport AG

Einleitung

Der geplante Einsatz des Großraumflugzeugs A380 ab 2006, stellt die luftseitige ebenso wie die landseitige Luftverkehrsinfrastruktur vor neue Herausforderungen, an deren Bewältigung das DLR in vielfältiger Weise beteiligt ist. Auch der Flughafen Frankfurt bereitet sich auf den Betrieb mit dem A380 vor.

Bis zu 800 Passagiere können mit einem einzigen dieser neuen Großraumflugzeuge gleichzeitig auf einem Flughafen ankommen. Zusätzlich zur generell erwarteten Steigerung des Passagier- und Besucheraufkommens auf dem Flughafen werden Abfertigungsprozesse am Flughafen im Falle des A380 höhere Spitzenaufkommen bewältigen müssen. Ob und wie dies ohne Einschränkungen der Sicherheit und des Komforts für Passagiere und Besucher erreicht werden kann, wird deshalb im Vorfeld der Einführung des A380 auch am Flughafen Frankfurt durch die Fraport AG untersucht.

Im Hinblick auf den Reisekomfort ist dabei nicht nur das Erreichen des Anschlussfluges von entscheidender Bedeutung, sondern natürlich auch eine gute Anbindung an die bodengebundenen Verkehrsmittel. So bietet die Fraport AG ihren Kunden neben der Skyline eine kostenlose Busverbindung zwischen Terminal 1 und 2, als Bindeglied zum Schienenfernverkehr, sowohl für Reisende als auch Besucher des Flughafens an. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob das zukünftig erwartete Fahrgastaufkommen mit den vorhandenen Transportkapazitäten zwischen Terminal 1 und 2 hinsichtlich eines gewünschten Qualitätsstandards bewältigt werden kann.

Der von Fraport betriebene Simulator „TOFAS-Terminal“ ermittelt die Auswirkungen des erhöhten Passagieraufkommens auf die Wartezeiten der Passagiere sowie Flächenbelastungen ausgewählter Terminalbereiche. Als Ergebnis dieser Simulationen wurde in Bezug auf die genannte Busverbindung ein zu Spitzenzeiten grenzwertiger "Level of Service" (verfügbarer Platz pro Passagier) an der Bushaltestelle in Terminal 2 festgestellt. Um evtl. notwendige Maßnahmen zur Einhaltung des IATA-Service Levels besser bewerten zu können, wurden mit dem im DLR entwickelten mikroskopischen Simulationsprogramm TOMICS Simulationen durchgeführt, in denen unter anderem individuelle Wechselwirkungen von unterschiedlichen Passagieren mit und ohne Gepäck sowie Gepäckwagen berücksichtigt wurden.

Als Ergebnis der Simulationen konnte abgeleitet werden, unter welchen Randbedingungen gewünschte Qualitätsstandards bezüglich des Komforts verletzt werden und welche Maßnahmen denkbar sind, um dem Qualitätsverlust entgegenzuwirken.

Das Simulationsprogramm TOMICS

TOMICS ist eine Simulationssoftware zur mikroskopischen Modellierung von Passagierbewegungen im Flughafenterminal. Die hohe Flexibilität von TOMICS bei der Beschreibung der dynamischen und statischen Modellelemente ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung der Passagierströme in ausgewählten Flughafenbereichen bis hin zum gesamten Flughafenterminal. Die nutzerfreundliche Eingabe von Umfelddaten über Datenbankanbindung und umfangreiche Interaktionsmöglichkeiten während des Simulationslaufes gestatten die Simulation verschiedener Planungsszenarien als Grundlage für Analysen zum Infrastrukturbedarf, als Unterstützung der Planungsprozesse bei Baumaßnahmen oder zur Optimierung des operativen Betriebs.

Ursprünglich zu Forschungszwecken konzipiert, wurde bei der Entwicklung von TOMICS auf ein Höchstmass an Flexibilität Wert gelegt. Für den Nutzer bietet TOMICS daher die Möglichkeit, Verkehrsflächen und Infrastruktureinrichtungen mit der von ihm gewünschten Genauigkeit abzubilden. Die Modellerstellung kann dabei interaktiv oder mittels einer Modelldatei, in der Lage und Eigenschaften der einzelnen Modellelemente hinterlegt sind, erfolgen. Für den Modellaufbau stehen Standardelemente zur Verfügung, deren Eigenschaften über Attribute vom Nutzer leicht beeinflusst werden können. Durch Kombination vorgefertigter Standardelemente lassen sich weitere Standardelemente entsprechend den Anforderungen an die Simulation generieren. Darüber hinaus bietet die offene Architektur von TOMICS die Möglichkeit, das bestehende System zur Bearbeitung spezieller Fragestellungen problemlos zu erweitern.

Um das Verkehrsgeschehen realitätsnah abzubilden, simuliert TOMICS die Bewegungen der einzelnen Passagiere. Dabei beeinflussen Flächenbelastungen, Gruppenzugehörigkeiten oder Hindernisse individuell die Wege und Geschwindigkeiten der einzelnen Personen und führen zu realistischen Bewegungsmustern. Passagierströme können damit explizit abgebildet werden, was z.B. Voraussetzung zur Bestimmung von Flächenbelastungen ist. TOMICS ist daher nicht nur für die strategische Planung, sondern auch für die taktische Planung des operativen Betriebs geeignet.

TOMICS bietet eine nutzerfreundliche Grafikoberfläche mit einer 2D-Visualisierung des Verkehrsgeschehens und interaktiven Steuerungsmöglichkeiten über Menüs und Pop-Up-Windows. TOMICS kann leicht mit anderen Simulations- oder Auswertemodulen oder mit mehreren anderen TOMICS-Simulationen gekoppelt werden, was eine Vielzahl von weiteren Anwendungsmöglichkeiten eröffnet. Für die Ergebnisdarstellung während der Simulation können aggregierte Belastungskenngrößen in Diagrammform eingeblendet werden. Für die detaillierte Analyse nach dem Simulationslauf stehen die relevanten Daten in einer SQL-Datenbank zur Verfügung.

Eingangsdaten

Die spezifischen Daten, die dieser Studie zu Grunde liegen, wurden durch die Fraport AG zur Verfügung gestellt.

Folgende Informationen liegen vor:

- das Layout des Wartebereiches
- den heutigen Anteil der Passagiere, die den Busshuttle zwischen Terminal 1 und 2 nutzen
- den prognostizierten Anteil der Passagiere, die den Busshuttle zwischen Terminal 1 und 2 nutzen
- Passagierflussinformationen (von Terminal in den Wartebereich)
- Bustaktzeiten
- Buskapazität
- Nutzerquoten, die den Shuttlebus vom Fernbahnhof kommend nutzen.

Die Simulationsszenarien

In diesem Abschnitt werden einzelne Simulationsszenarien näher beschrieben.

Der dieser Studie zu Grunde liegende Passagierstrom wurde einer TOFAS¹ Simulation entnommen, in der eine verkehrsreiche Stunde², in der zukünftig auch der A380 erwartet wird, abgebildet wurde.

Abbildung 1 illustriert den Passagierstrom vom Flugzeug durch das Terminal zum Busshuttle.

¹ TOFAS ist ein von Fraport verwendetes Simulationsprogramm.

² bezüglich des erwarteten Passagieraufkommens

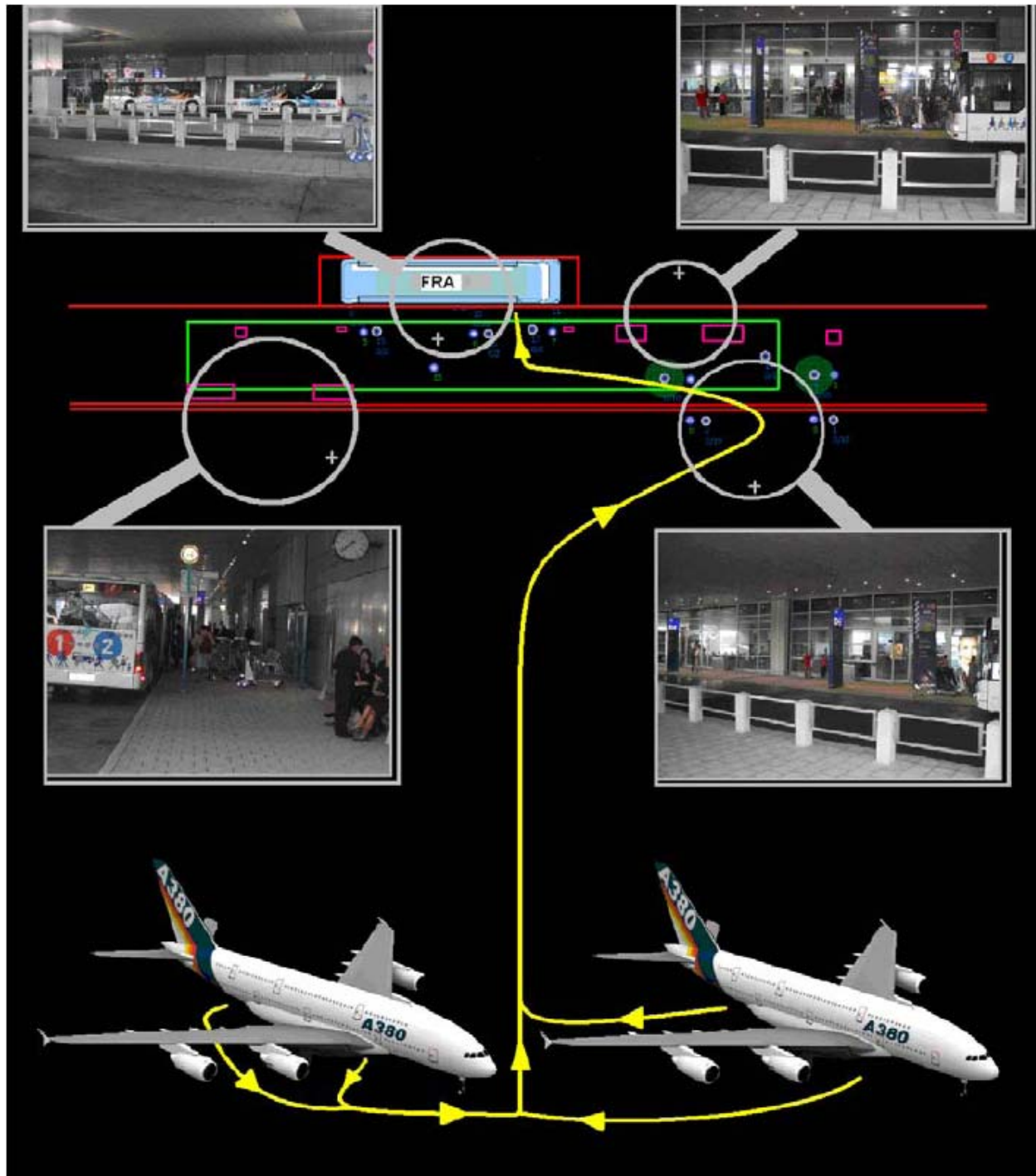


Abbildung 1 illustriert den Passagierfluss vom Flugzeug durch das Terminal bis hin zum Shuttlebus.

Basisszenario

Das Basisszenario beschreibt den ungestörten Übergang von Passagieren aus dem Shuttlebus in das Terminal. Passagiere vom Terminal in den Bus wurden in diesem Szenario nicht simuliert. Ebenso gibt es keine weiteren Flughafengäste, die sich außerhalb des Terminals bewegen.

Es treten lediglich Wechselwirkungen zwischen den aussteigenden Personen auf. Weiter wurde angenommen, dass alle Passagiere das Terminalgebäude betreten. Keiner Person wurde ein Koffer oder ein Gepäckwagen zugeordnet.

Gemeinsamkeiten aller Szenarien (außer Basisszenario)

In allen Szenarien, außer dem Basisszenario, werden Wechselwirkungen zwischen Passagieren untersucht, die aus dem Bus und dem Terminal kommend aufeinander treffen.

Die aus dem Terminal kommenden Personen können mit bzw. ohne Handgepäck oder mit einem Gepäckwagen die Wartefläche vor dem Terminal im Bereich der Bushaltestelle betreten. Reisende mit Gepäckwagen stellen diesen an zufällig gewählten Plätzen innerhalb des Wartebereiches ab. Ist der Bus bereits eingetroffen, begeben sie sich zu einem der drei Buseingänge und betreten den Bus. Befindet sich kein Bus in der Wartezone, nehmen die Reisenden zufällig gewählte Positionen innerhalb des Wartebereiches ein.

Passagiere die mit dem Bus eintreffen tragen durchweg Handgepäck mit sich. Ihre Zahl variiert im Verlauf der simulierten Stunde zwischen 20 und 43. Insgesamt können maximal sechzig Personen mit dem Bus transportiert werden.

Verlässt eine Person den Bus, versucht sie ggf. einen im Wartebereich befindlichen Gepäckwagen zu übernehmen. Gepäckstücke auf den Wagen gestellt und der Reisende verlässt den Wartebereich. Dazu stehen zwei Aus- bzw. Eingänge zum Terminal zur Verfügung.

Szenarien im Detail

Im Detail werden folgende Szenarien untersucht:

- a) 20% der aus TOFAS stammenden Passagiere nutzen den Bus zum Fernbahnhof; es treten nur Wechselwirkungen zwischen Busaus- und Einsteigern mit Gepäck und Gepäckwagen auf.
- b) 25% der aus TOFAS stammenden Passagiere nutzen den Bus zum Fernbahnhof; es treten nur Wechselwirkungen zwischen Busaus- und Einsteigern mit Gepäck und Gepäckwagen auf.
- c) 20% der aus TOFAS stammenden Passagiere nutzen den Bus zum Fernbahnhof; es treten Wechselwirkungen zwischen Busaus- und Einsteigern mit Gepäck und Gepäckwagen sowie zusätzlich den Wartebereich passierenden Personen ebenfalls mit Gepäck und Gepäckwagen auf.
- d) 25% der aus TOFAS stammenden Passagiere nutzen den Bus zum Fernbahnhof; es treten Wechselwirkungen zwischen Busaus- und Einsteigern mit Gepäck und Gepäckwagen sowie zusätzlich den Wartebereich passierenden Personen ebenfalls mit Gepäck und Gepäckwagen auf.

Die Geschwindigkeiten der simulierten Personen (nach "Pedestrian Planning and Design, William H. Whyte, John Fruin") werden erheblich durch das mitgeführte Gepäck beeinflusst. So reduziert sich die Geschwindigkeit um 10% wenn ein Gepäckwagen mitgeführt wird und um 30% beim Tragen von Gepäck.

Die Qualitätsparameter

Für einen Flughafenbetreiber ist nicht nur die Abwicklung des Flugverkehrs von Bedeutung. Um attraktiv zu sein, muss neben Sicherheits- auch Komfortaspekten Beachtung geschenkt werden.

In dieser Studie wurden die nachfolgend benannten Qualitätskriterien untersucht:

- Reisende, die aus dem Terminalbereich kommen, dürfen nicht mehr als einen Shuttlebusse verpassen (wenn diese bereits voll besetzt wegfahren)
- Es darf zu keine gravierenden Verlängerung (auf mehr als zwei Minuten) der Zeit zwischen Verlassen des Busses und Betreten des Terminals kommen
- Die Zeit zum Durchqueren des Wartebereiches für unbeteiligte Personen darf sich nicht mehr als verdreifachen

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Simulationen gegenübergestellt und ausgewertet sowie identifizierte Engpässe vorgestellt und entsprechende Schlussfolgerungen gezogen.

Basisszenario

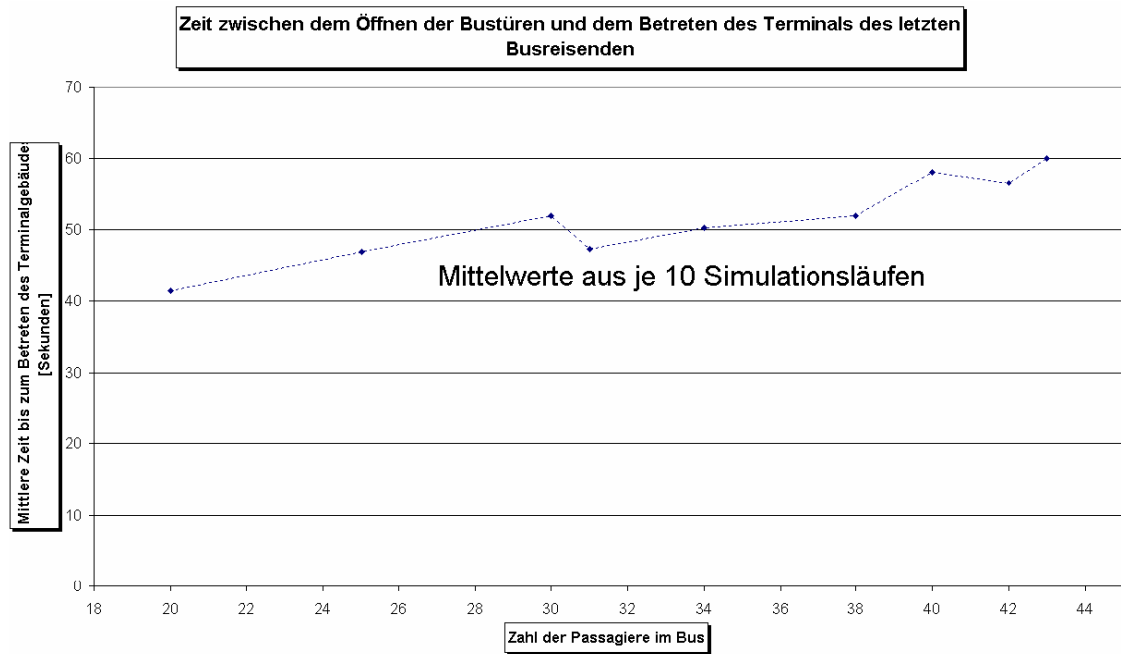


Abbildung 2 zeigt wie sich die Prozessdauer des Verlassens des Busses bis zum Betreten des Terminalgebäudes in Abhängigkeit von der Zahl der Buspassagiere darstellt.

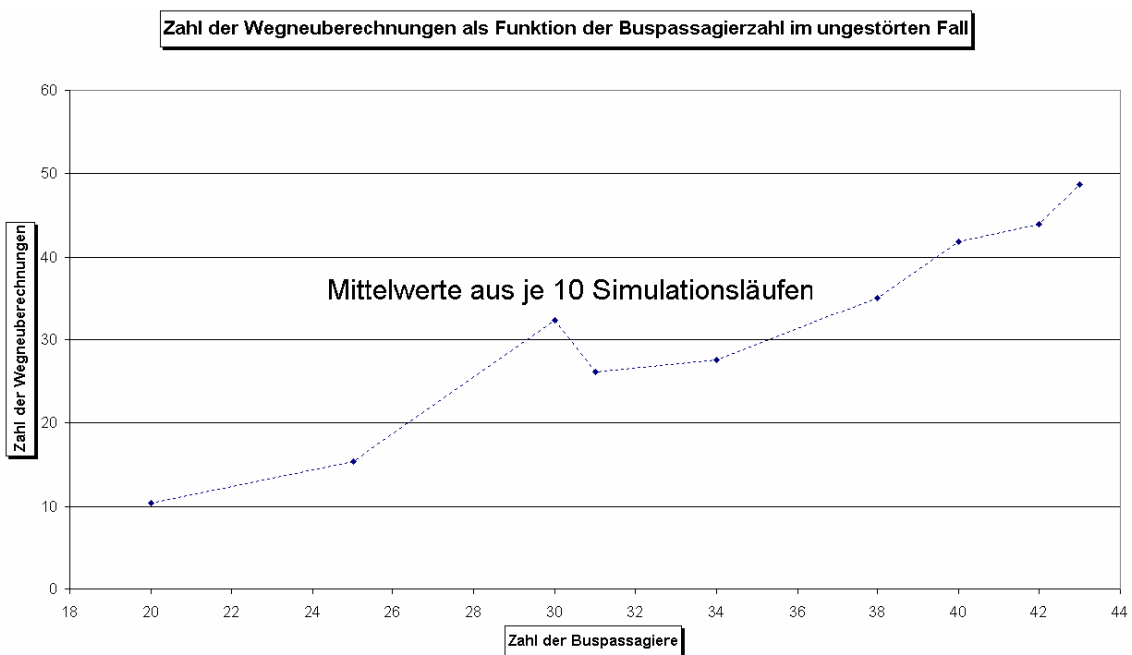


Abbildung 3 zeigt wie sich die Zahl der Wegneuberechnungen als Maß für die Zahl der Wechselwirkungen zwischen den Personen als Funktion der beteiligten Personen verhält.

Aus den Abbildungen in diesem Unterabschnitt geht hervor, dass im ungestörten Fall (d.h. ohne Wechselwirkungen mit weiteren Personen aus dem Terminal) die Zeit die vom Öffnen der Bustüren benötigt wird, bis der letzte Flughafengast das Terminal betritt, von 40 für 20 Personen auf 60 Sekunden für 43 Reisende erhöht. Dieser Effekt kann zu großen Teilen darauf zurückgeführt werden, dass die Durchflussrate der Bustüren begrenzt ist. Sechzehn Sekunden der Gesamtsteigerung sind auf diese Weise erklärbar. Weitere fünf Sekunden können mit Wechselwirkungen der Reisenden untereinander im Bereich der Wartefläche erklärt werden. Dies wird durch die zunehmende Zahl der Wegneuberechnungen³, die ein Maß für die Zahl der auftretenden Wechselwirkungen zwischen Personen und Objekten darstellt, mit zunehmender Personenzahl belegt.

Vergleich der Szenarien a und b

In den Szenarien (a) und (b) treten ausschließlich Personen miteinander in Wechselbeziehung, die aus dem Shuttlebus aussteigen und ins Terminal gehen sowie Reisende, die aus dem Terminal kommen und in den Bus einsteigen. Letztere Gruppe führt zum Teil Gepäckwagen mit sich, die im Wartebereich, in Anlehnung an die Realität, ungeordnet abgestellt werden.

Diese Gepäckwagen können von den Busaussteigern übernommen werden. Diese Übernahme, d.h. das Aussteigen aus dem Bus, das Gehen zum Gepäckwagen und das anschließende Verlassen des Wartebereiches mit Gepäckwagen führt im Vergleich zum Basisszenario zu gestiegenen Prozesszeiten für den Übergang zum Terminal. Diese werden durch Abbildung 4 illustriert. Aus dieser Abbildung geht ebenfalls hervor, dass unter den getroffenen Annahmen, die Transferzeit zwischen Bus und Terminal nicht von der Zahl der Personen abhängt, die miteinander in Wechselwirkung treten können. Entscheidend sind Zahl und Abstellpositionen der Gepäckwagen. Dies manifestiert sich in der Zahl der Wegneuberechnungen, die ein Maß für Wechselwirkungen mit Hindernissen darstellt. Reisende die keinen Gepäckwagen bekommen bzw. benötigen, begeben sich auf kürzestem Weg zum Terminaleingang.

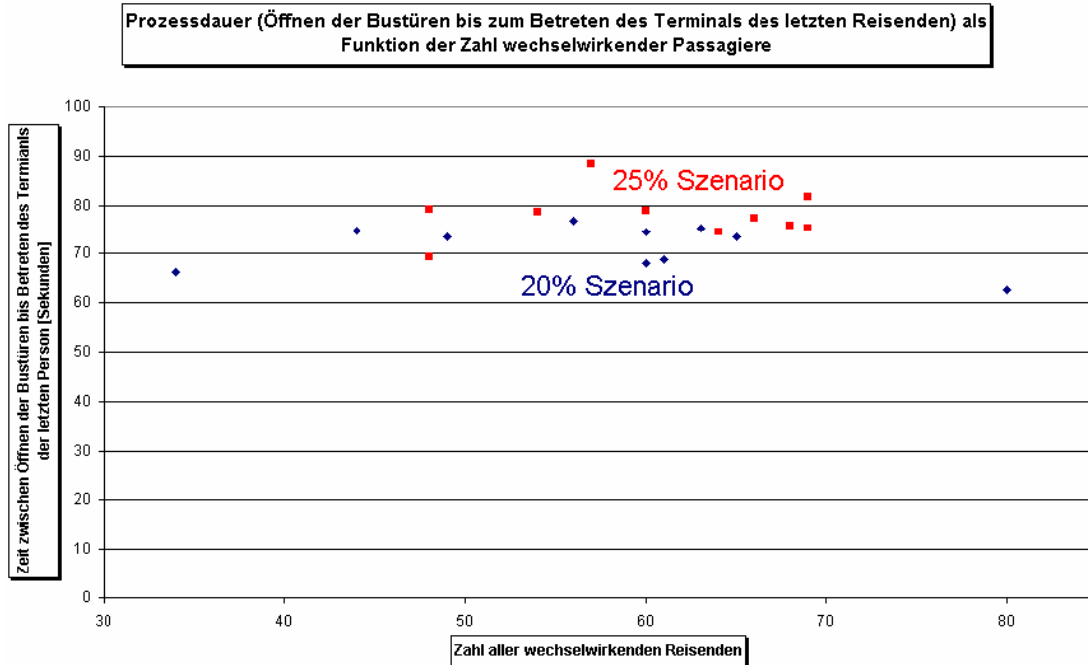


Abbildung 4 zeigt wie sich die Dauer des Aussteigevorganges (die Zeit vom Öffnen der Bustüren bis zum Betreten des Terminals des letzten Busreisenden) in Abhängigkeit von der Zahl der miteinander in Wechselbeziehung stehenden Personen verhält.

³ Tritt eine Wechselwirkung zwischen zwei Personen oder einer Person und einem Objekt ein, kann es erforderlich werden, den Weg der beteiligten Personen neu zu berechnen. Dieser Vorgang wird Wegneuberechnung genannt.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass in diesem Szenario in allen Fällen weniger als 90 Sekunden benötigt werden, um den Bus zu verlassen, einen Gepäckwagen entgegenzunehmen und ins Terminal zu gelangen.

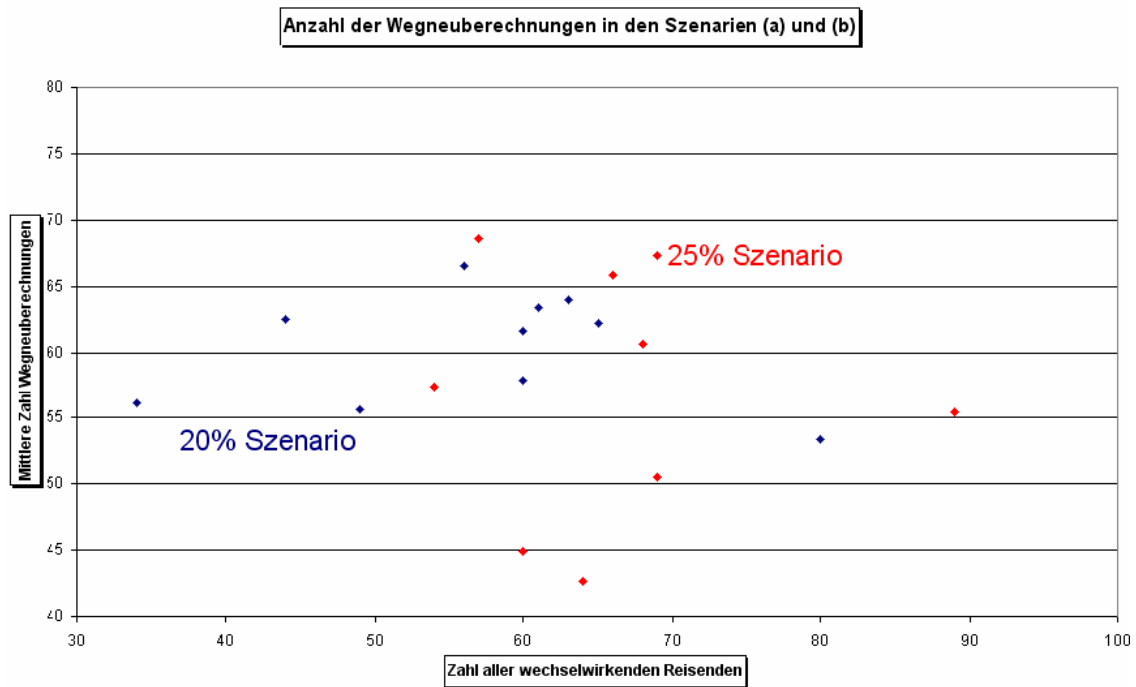


Abbildung 5 zeigt die Zahl der Wegneuberechnungen als Maß für die Zahl der tatsächlichen Wechselwirkungen als Funktion der in Wechselbeziehung stehenden Personen.

Vergleich der Szenarien (c) und (d)

Im Vergleich zu den Szenarien (a) und (b) wurden in den Szenarien (c) und (d) zusätzlich einhundert Personen kontinuierlich über einen Zeitraum von 55 Minuten verteilt (alternierend ohne Gepäck, mit Handgepäck und mit Gepäckwagen) simuliert, die den Wartebereich durchqueren wollen.

Auch hier wird die Zeit zwischen dem Öffnen der Bustür bis zum Betreten des Terminals des letzten Buspassagiers hauptsächlich durch die Suche und Übernahme eines Gepäckwagens bestimmt. Die Zahl der Personen, die miteinander in Wechselbeziehung treten können, wirkt sich unter den getroffenen Annahmen dicht auf die Übergangszeit zwischen Bus und Terminal aus. Der Einfluss der quer laufenden Personen wirkt sich auf die Dauer des beschriebenen Prozesses nicht aus.

Die Zeit die quer laufende Personen zum durchqueren des Wartebereichs benötigen, hängt stark von der Zahl und der Position der abgestellten Gepäckwagen ab. Sind diese ungünstig positioniert, kann sich die entsprechende Zeit verdoppeln, was bezogen auf die in 5 beschriebenen Qualitätsparameter in einer akzeptablen Größenordnung liegt.

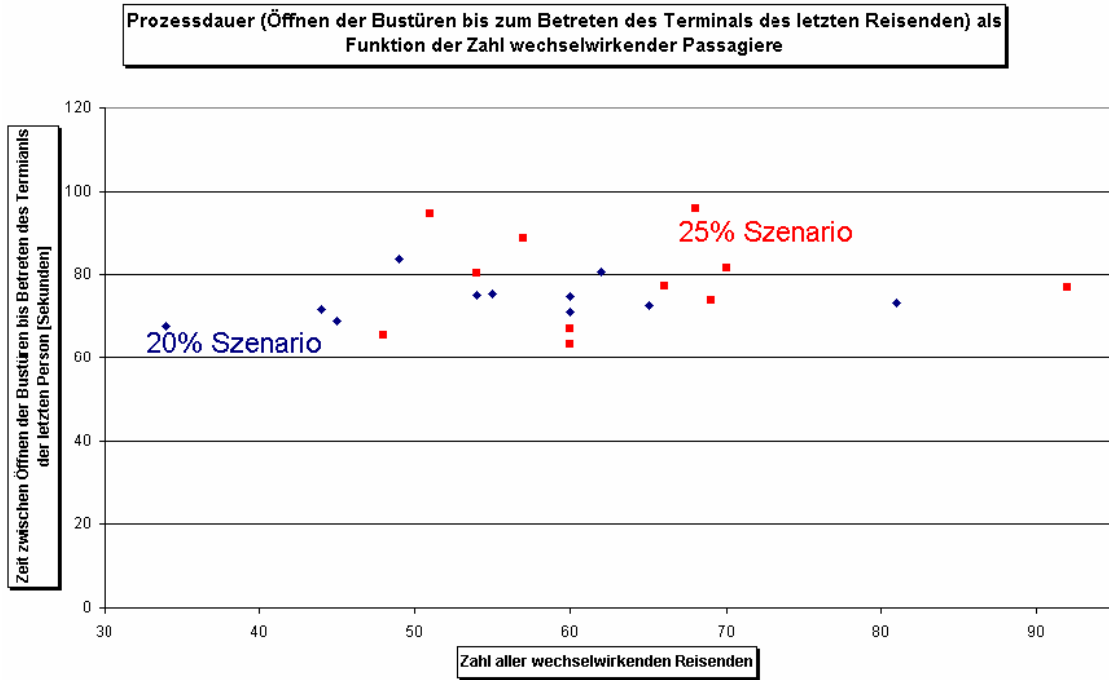


Abbildung 6 zeigt wie sich die Dauer des Aussteigevorganges (die Zeit vom Öffnen der Bustüren bis zum Betreten des Terminals des letzten Busreisenden) in Abhängigkeit von der Zahl der miteinander in Wechselbeziehung stehenden Personen verhält.

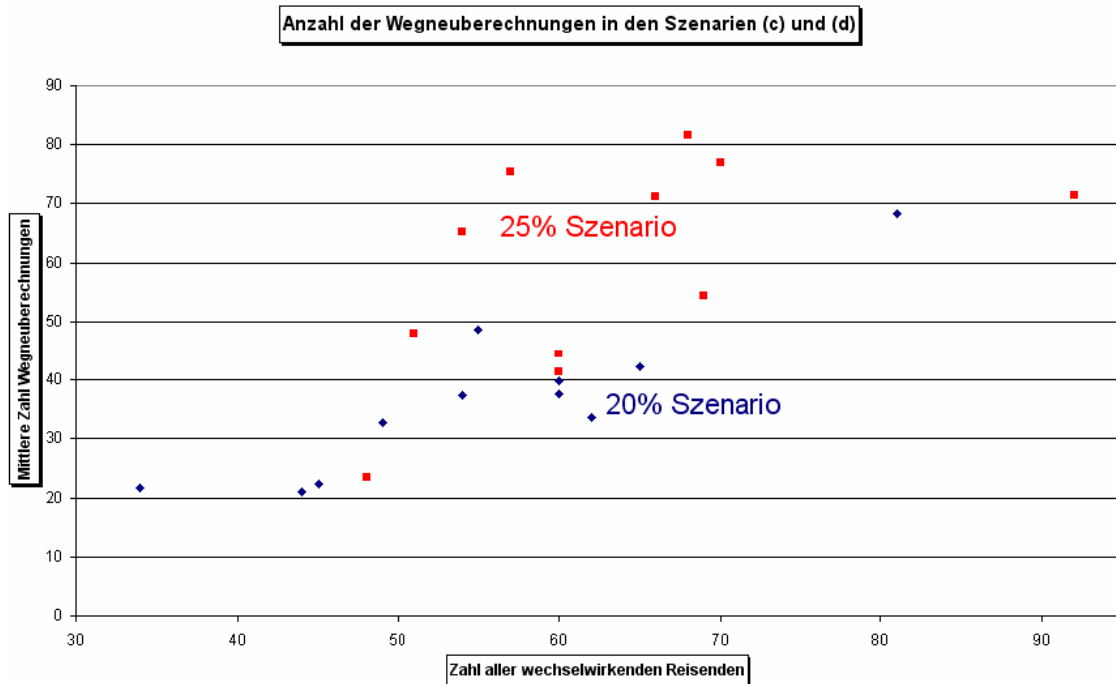


Abbildung 7 zeigt die Zahl der Wegneuberechnungen als Maß für die Zahl der tatsächlichen Wechselwirkungen als Funktion der in Wechselbeziehung stehenden Personen.

Identifizierung der Engpässe und Schlussfolgerungen

In den Simulationen wurden verschiedene Engpässe deutlich, die sich behindernd auf alle Personen auswirkten. Hauptursache für diese Engpässe sind die willkürlich abgestellten Gepäckwagen.

Engpässe sind:

- der Eingangsbereich des Terminals
- die Kante des Wartebereiches direkt von den Bustüren
- der Bereich der Sitzbänke
- der Bereich vor den Bushinweisschildern

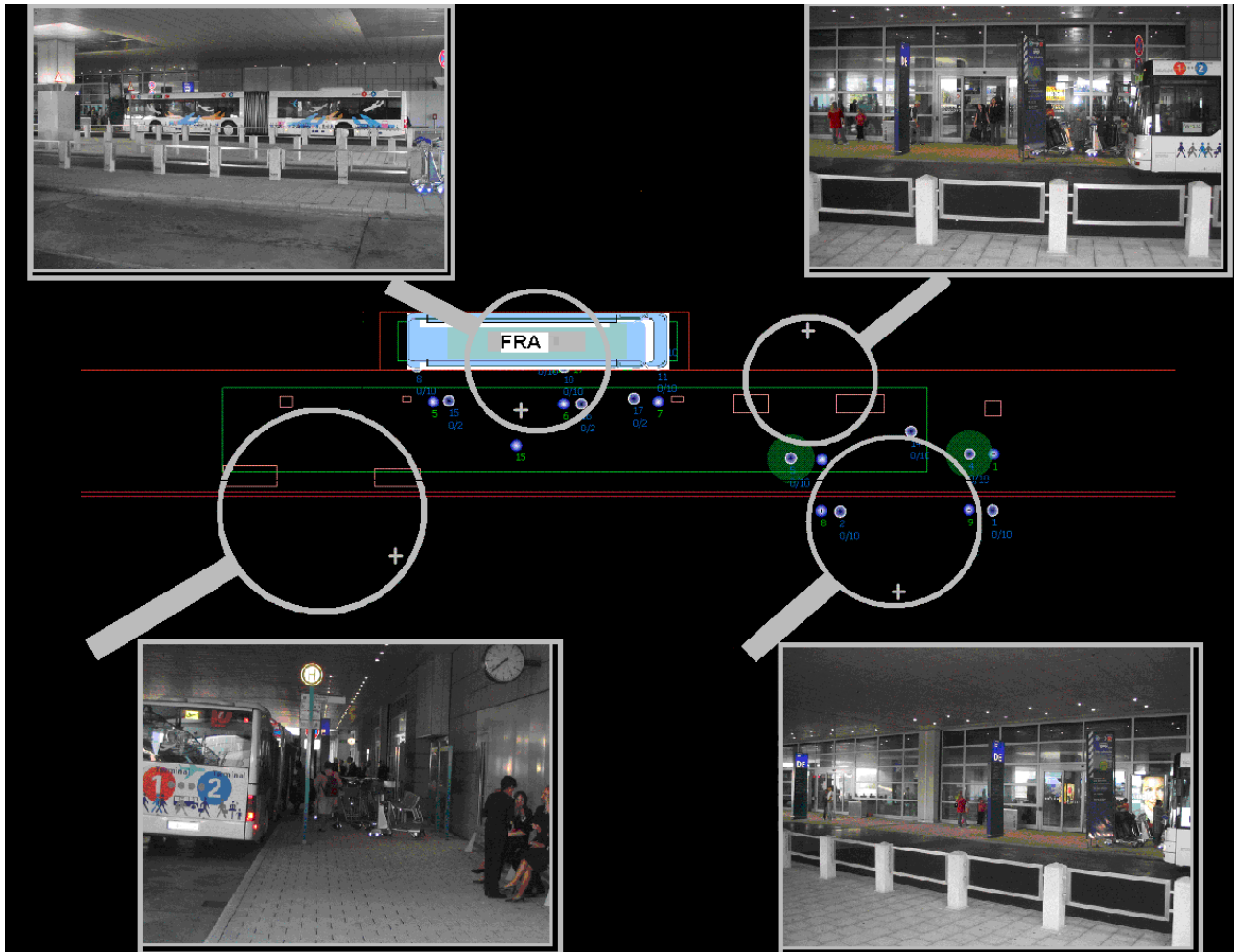


Abbildung 8 zeigt die ermittelten Engpässe in der Simulation und verdeutlicht diese anhand von Originalaufnahmen.

Die Auswertung der Szenarien ergibt, dass auch bei einem wachsenden Anteil von Reisenden (von 500 auf 650 pro Stunde), die das Busshuttle zum Fernbahnhof nutzen möchten, kaum Einbußen im Komfort zu erwarten sind. So wird die Zeit zwischen Verlassen des Busses und dem Erreichen des Terminaleinganges maßgeblich durch die Zahl der vorhandenen Gepäckwagen beeinflusst. Die Zahl der im Wartebereich befindlichen Personen ist eher von untergeordneter Bedeutung. Zudem konnte das TOFAS Ergebnis bestätigt werden, nach dem kein Reisender mehr als einen Bus verpassen würde.

Die Wartefläche ist hinreichend groß, um auch den erwarteten Steigerungen gerecht zu werden, ohne dass die Sicherheit einzelner Personen darunter leidet. D.h. niemand muss auf die Busfahrbahn ausweichen. Auch Zeit, die am Terminal vorbeigehende Personen zum durchqueren des Wartebereiches benötigen, wird in den meisten Fällen nicht mehr als verdoppelt, was wiederum bezogen auf dieses kurze Teilstück akzeptabel ist.

Verkehrssimulation als Managementinstrument

Peter Vortisch⁽¹⁾, Peter Wagner⁽²⁾

⁽¹⁾ PTV, Planung Transport Verkehr AG

⁽²⁾ DLR e.V., Institut für Verkehrsforschung

Verkehrsmodelle im Verkehrsmanagement

Maßnahmen und Strategien

Wer Verkehrsmanagement betreibt, versucht den Verkehrsablauf mit geeigneten Maßnahmen so zu beeinflussen, dass er einem gewünschten Zustand näher kommt als ohne Verkehrsmanagement. Wie dieser Zielzustand aussieht, ist von politischen und örtlichen Gegebenheiten abhängig, und neben den naheliegenden Zielen Stauvermeidung und Ressourcenschonung kann Verkehrsmanagement zur Bewältigung von Großveranstaltungen oder Notfallsituationen eingesetzt werden.

Zur Beeinflussung des Verkehrs stehen dem Verkehrsmanagement eine Reihe von Maßnahmen zur Verfügung, die in unterschiedlichen Zeithorizonten realisiert werden können. Das beginnt beim strategischen Verkehrsmanagement, wo durch langfristigen Baumaßnahmen erst die Voraussetzungen für ein später einzusetzendes operatives Verkehrsmanagement geschaffen werden, und endet bei der kurzfristigen Anpassung einer Signalsteuerung im Online-Betrieb.

Es hat sich gezeigt, dass zur Erreichung der Ziele im Verkehrsmanagement ein koordinierter Einsatz der Einzelmaßnahmen erforderlich ist. Aus den einzelnen Maßnahmen werden deshalb Steuerungsstrategien zusammengesetzt, die jeweils bei Vorliegen einer bestimmten Situation ausgelöst werden. Strategien werden also im Planungsprozess vorbereitet und kommen dann im Online-Betrieb zum Einsatz. Derzeit gibt es auch Forschungsbestrebungen, Strategien online automatisch zu bilden.

Da der Einsatz von Strategien meistens auf bestimmte Ausgangssituationen abgestimmt ist, besteht in Verkehrsmanagementsystemen der Bedarf, die aktuelle Verkehrssituation im zu managenden Gebiet möglichst gut zu kennen. Dazu ist der Einsatz von Detektionseinrichtungen notwendig. Die reine Detektion ist aus Aufwandsgründen meist nicht flächendeckend, so dass zusätzlich Schätzverfahren eingesetzt werden, um die nicht detektierten Teile des Netzes abzudecken.

Die einsetzbaren Steuerungsmaßnahmen unterscheiden sich im Grad ihrer Verbindlichkeit für den Verkehrsteilnehmer. Eingriffe in die Signalsteuerung sind verbindlich, wohingegen eine Umleitungsempfehlung dem Fahrer noch die Wahl lässt, ob er sie befolgt. Die am wenigsten verbindliche Maßnahme in diesem Sinn ist die Verbreitung von Information, ohne dass dabei eine Handlungsempfehlung gegeben wird.

Warum (und welche) Verkehrsmodelle?

Modelle sind allgegenwärtig. Jeder Mensch macht sich Modelle der Realität, die den Sinn haben, sich leichter in der Realität zurechtzufinden. Ein Modell ist immer eine Abstraktion der Realität oder auch eines anderen, komplizierten Modells. Modelle werden entweder mit dem Ziel entwickelt, besser zu verstehen, oder, vor allem im Bereich des Verkehrs, besser prognostizieren zu können. Mit Prognose ist dabei nicht nur die Prognose der Zukunft gemeint, sondern auch eine Vorhersage im Sinne einer Bewertung, d.h. die Beantwortung der Frage „was passiert wenn diese Maßnahme ergriffen wird“.

Traditionelle Modelle im Verkehrsbereich sind die Planungsmodelle, die die Grundlage für die Beurteilung mittel- und langfristiger Änderungen der Verkehrsinfrastruktur (z.B. Neu- und Umbau von Strassen) darstellen. Zu diesem Zweck ist es ausreichend, nur eine mittlere Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf die Infrastrukturmaßnahmen zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass solche Modelle keine „Dynamik“ im Sinne einer zeitlichen Veränderung des Verkehrsflusses abbilden können. Der typische Vertreter dieser Modellgruppe ist die statische Verkehrsumlegung.

Aufgrund der weiter steigenden Auslastung der Verkehrsinfrastruktur werden die zeitlichen Verläufe der Verkehrsbelastungen über den Tag in der Planung immer stärker berücksichtigt. So ist eine neue Generation dynamischer Verkehrsumlegungsmodelle entstanden, die langsam den Weg in die Planungspraxis findet.

Bei Fragestellungen, bei denen es um die Bewertung dynamischer Vorgänge geht, wie das im Verkehrsmanagements aber auch bei der lokalen Verkehrssteuerung der Fall ist, sind Ansätze heranzuziehen, die noch stärker auf die Dynamik der Verkehrsflüsse eingehen. Dynamik bedeutet aber immer, dass eine Simulation des zu untersuchenden Systems durchgeführt werden muss, weil dynamische Fragestellungen nur in Lehrbuchbeispielen analytisch lösbar sind.

Diese Simulationssysteme fallen je nach der Art, wie sie den Verkehr nachbilden, in eine von zwei großen Klassen: mikroskopische und makroskopische Modelle. Bei den Makromodellen wird der Verkehr durch aggregierte Größen wie Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlere Geschwindigkeit beschrieben. Einzelne Fahrzeuge tauchen in diesen Modellen nicht auf.

Dagegen werden in den mikroskopischen Verkehrssimulationsmodellen die Bewegungen jedes einzelnen Fahrzeuges im betrachteten Verkehrsnetz simuliert. Es ist sehr wahrscheinlich, dass eine solche Simulation nicht in der Lage ist, das Verhalten eines einzelnen Fahrzeuges (bzw. seines Fahrers) korrekt abzubilden. Erwartet werden kann aber, dass die Simulation statistisch korrekt wiedergibt, was auf der Strasse passiert, und nach allem, was in den letzten Jahren zur Kalibrierung von mikroskopischen Verkehrsflussmodellen erforscht wurde, erfüllen die meisten Modelle diese Erwartung weitgehend.

Bei der Simulation eines so komplexen Systems wie es das Verkehrssystem darstellt ist es nicht überraschend, dass sich im Laufe der Jahre verschiedene Softwaresysteme für die mikroskopische Simulation von Verkehr am Markt etabliert haben. Das reicht von sehr einfachen Simulationsprogrammen die nur die (kinematische) Bewegung von Fahrzeugen über eine Kreuzung abbilden, über mehr oder weniger offene Software wie sie viele Hochschulinstitute entwickelt haben, bis zu voll ausgerüsteten kommerziellen Modellen (VISSIM, AIMSUN, PARAMICS als die Marktführer), die im Prinzip jede Fragestellung aus dem Bereich des Verkehrsmanagements bearbeiten können.

Modelleinsatz im Verkehrsmanagement

Es gibt im Verkehrsmanagement verschiedene Aufgaben, bei denen Simulationsmodelle eingesetzt werden können:

- Offline zur Bewertung der Wirkung von Strategien bei deren Entwicklung
- Online zur Verkehrslageschätzung und Prognose in der Zentrale
- Online im Steuerungsgerät

Die Varianten werden im folgenden erläutert.

Strategieentwicklung offline

Wie oben erläutert, werden die beim Management eingesetzten Strategien nicht ad-hoc im Betrieb gebildet, sondern sind das Produkt eines vorgelagerten Planungsprozesses. Bei der Entwicklung der Steuerungsstrategien können Verkehrsmodelle eingesetzt werden, um die Wirkung der Strategie nachzubilden und zu bewerten.

Dazu ist es notwendig, dass die einzelnen Maßnahmen im Modell abgebildet werden können. Für die harten Steuerungsmaßnahmen wie Signalsteuerung oder Streckensperrung ist das in den Modellen meist einfach; schwieriger ist die Abbildung der weichen, empfehlenden Maßnahmen. Zu ihrer Modellierung müssen Annahmen über die Akzeptanz bei den Verkehrsteilnehmern gemacht werden.

Verkehrslageschätzung und Kurzfristprognose online

Für die Verkehrslageschätzung sollen möglichst alle Informationen, die über den Verkehr im betrachteten Gebiet Auskunft geben können, herangezogen werden. Dazu gehören neben den aktuellen Messdaten und Verkehrsmeldungen auch verkehrsplanerisches Wissen und historische Daten. Ein Verkehrssimulationsmodell kann dabei der geeignete Rahmen für die Fusion aller Datenquellen sein. Durch ein Verkehrsmodell wird sowohl die planerische Information konkretisiert als auch die Vorstellung davon formalisiert, nach welchen Gesetzmäßigkeiten sich Verkehr bewegt. Da eine Aufgabe bei der Verkehrslageschätzung darin besteht, die punktuellen Informationen aus den verteilten Messstellen zu ergänzen, indem man sie sozusagen auf das ganze Netz interpoliert, ist eine gute Abbildung dieser Gesetzmäßigkeiten Voraussetzung, gegenüber den reinen Messdaten einen Mehrwert zu schaffen.

Für die meisten Steuerungs- und Informationszwecke ist über den aktuellen Zustand hinaus auch ein Blick in die Zukunft hilfreich, d.h. neben der Verkehrslageschätzung soll auch die weitere Entwicklung in der nächsten Zeit geschätzt werden. Dabei interessiert nicht nur der weitere Verlauf, wenn sich nichts an den Randbedingungen ändert, sondern es sollen auch Aussagen gemacht werden über unterschiedliche mögliche Verläufe, je nach dem, wie steuernd in den Verkehr eingegriffen wird. Im Idealfall weiß eine Zentrale sehr genau über den aktuellen Verkehrszustand im gesamten Straßennetz Bescheid und kann geeignete Steuerungsstrategien auswählen, indem sie jederzeit mit Hilfe eines Prognoseverfahrens die zu erwartenden Wirkungen der alternativen Maßnahmen berechnet und die günstigste Strategie auswählt.

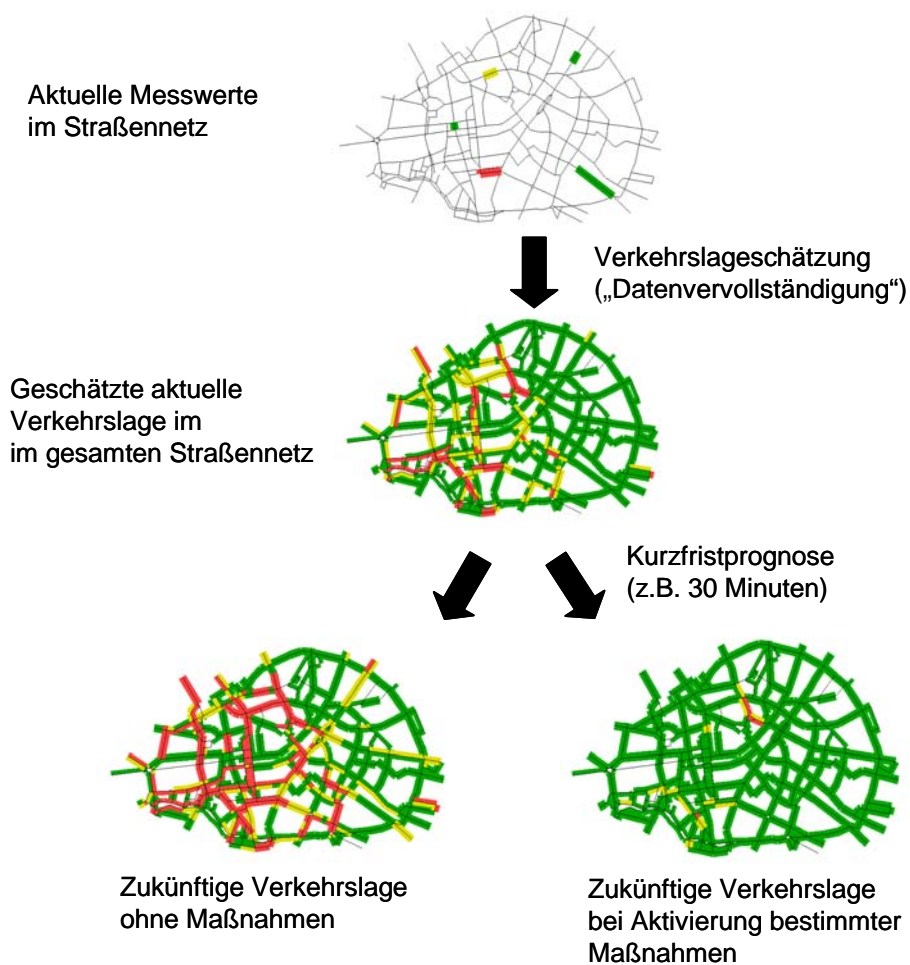


Abbildung 1: Prinzipieller Ablauf von Detektion, Verkehrslageschätzung und Kurzfristprognose unter Berücksichtigung verschiedener Steuerungsstrategien

Online im Steuerungsgerät

Auch lokale Steuerungsverfahren können auf Simulationsmodelle zurückgreifen. Es gibt zum Beispiel Lichtsignalsteuerungsverfahren, die mit Hilfen von Verkehrsflussmodellen aus den Messwerten der benachbarten Kreuzungen ableiten, mit wie viel Verkehr im nächsten Umlauf zu rechnen ist. Das bekannteste dieser Verfahren ist das in England entwickelte SCOOT, bei dem ein makroskopisches Pulkauflösungsmodell zur Verkehrsabbildung verwendet wird.

Mit diesen im Steuerungsverfahren eingebetteten Modellen wird normalerweise keine Bewertung mehrerer Steuerungsvarianten gemacht, sondern nur die kurzfristige Bewegung des Verkehrs zwischen den der Anlage bekannten Detektionspunkten vorhergesagt.

Beispiel: Verkehrsmanagementzentrale Berlin

Im Rahmen der Errichtung der Verkehrsmanagementzentrale in Berlin wurde ein simulationsbasiertes Verfahren implementiert, um aus räumlich verteilten Messwerten die Gesamtverkehrslage zu schätzen und eine Kurzfristprognose mit einem Horizont von 30 Minuten zu berechnen. Zusätzlich werden die aktuellen Meldungen einer Verkehrsredaktion in die Berechnungen einbezogen. Die Berechnungsergebnisse werden im Internet angezeigt (www.vmzberlin.de) und werden alle 15 Minuten aktualisiert. Auf die berechnete Verkehrslage setzen verschiedene Informationsdienste auf, darunter auch ein dynamisches Routenplanungssystem.

Eigens für die Verkehrslagebestimmung wurden in Berlin etwa 250 Detektoren installiert. Zum Einsatz kamen dabei autonome Überkopfdetektoren, die mit Solarstrom gespeist werden und ihre Messwerte per Mobilfunk an die Zentrale übermitteln (so genannte Traffic Eyes der Firma Siemens). Erfasst werden Verkehrsstärke und mittlere Geschwindigkeit in 5-Minuten-Intervallen, wobei eine Übertragung an die Zentrale nur bei wesentlichen Änderungen der erfassten Größen ausgelöst wird. Ergänzt werden die dedizierten Detektoren durch die Induktionsschleifendetektoren auf den Autobahnteilstücken des Berliner Netzes, auf denen eine Linienbeeinflussungsanlage betrieben wird. Insbesondere der südliche Teil des Autobahnringes ist vollständig mit Messschleifen ausgerüstet.

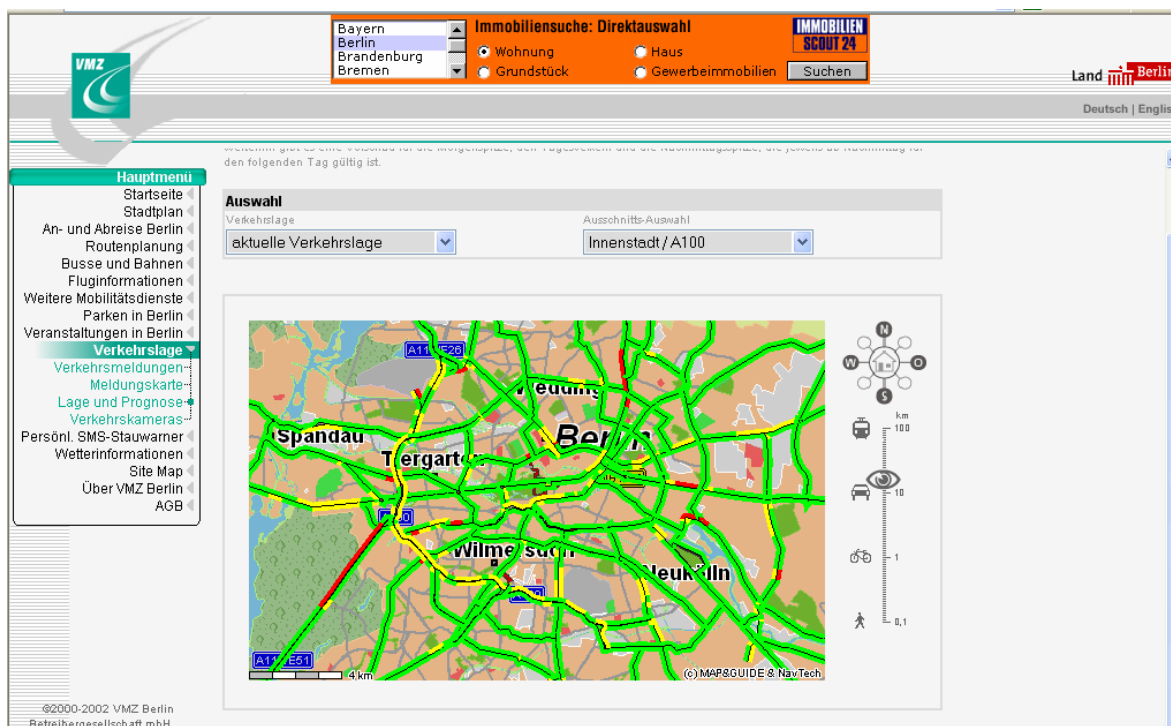
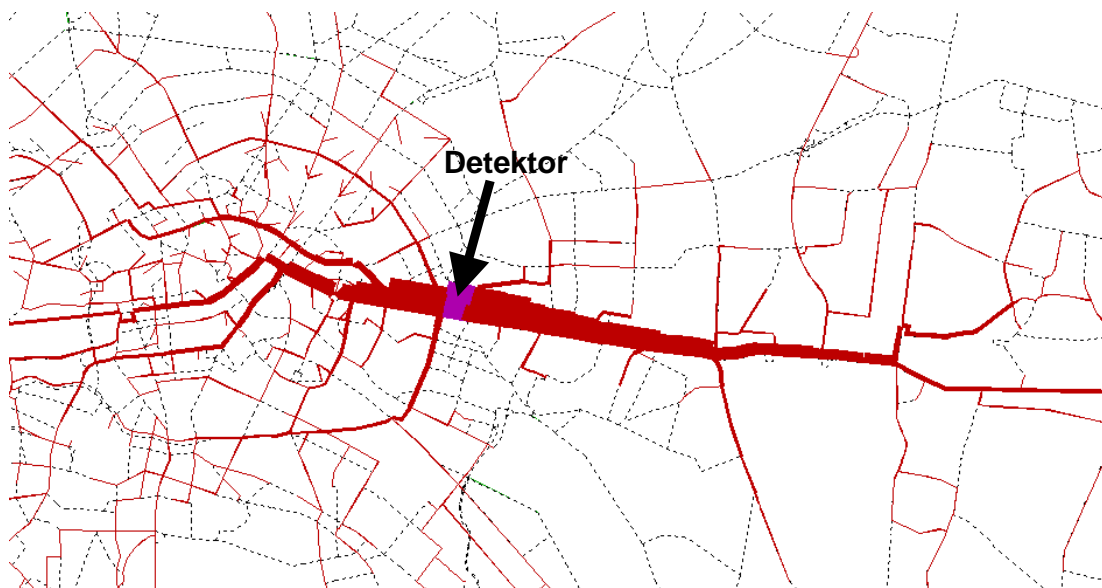


Abbildung 2: Berechnete Verkehrslage auf der Website der Verkehrsmanagementzentrale Berlin

In der Verkehrsmanagementzentrale Berlin wird außerdem Verkehrsredaktion betrieben, die permanent mit einem Redakteur besetzt ist. In das Redaktionssystem werden zum einen Meldungen aus anderen Quellen importiert und zum anderen kann der Redakteur selbst Verkehrsmeldungen manuell erzeugen. Importiert werden die Meldungen der Landesmeldestelle, soweit sie den Zuständigkeitsbereich der VMZ betreffen, und die Baustellenmeldungen der Koordinierungsstelle des Berliner Senats. Beim Import werden die Meldungen auf das Straßennetzmodell der VMZ verortet und, soweit möglich, werden die verkehrlichen Wirkungen der Meldungen aus den mitgelieferten Attributen geschätzt, z.B. bei den Baustellen aus der Anzahl gesperrter Fahrstreifen.

Zur Schätzung der Verkehrslage wird zunächst mit aggregierten Messwerten für einen Horizont von einer Stunde eine Routenschätzung durchgeführt. Die aktuell im Netz gefahrenen Routen werden berechnet, in dem die Meldungsinformation, also z.B. Behinderungen durch Baustellen, im Straßennetzmodell eingetragen werden und dann eine Verkehrsumlegung berechnet wird. Die Verkehrsnachfrage stammt dabei aus zuvor aufbereiteten Fahrtenmatrizen, die für jeden Tagestyp im Stundenraster vorliegen.

Danach wird auf Basis der aktuellen Messwerte der letzten Minuten eine kurzfristige Verkehrslage berechnet, indem die gemessenen Verkehrsmengen auf den geschätzten Routen durch das Straßennetz propagiert werden. Dabei werden bestimmte Zustandsgrößen, insbesondere Rückstaus, von einem Berechnungszeitpunkt zum nächsten weitergereicht. Dem Verfahren liegt die Idee zu Grunde, dass sich die an einem Messquerschnitt erfasste Verkehrsmenge aus verschiedenen Strömen zusammensetzt, die sich vor und nach dem Messquerschnitt im Netz verzweigen. Wenn man weiß, aus welchen Strömen der gemessene Wert zusammengesetzt ist, kann man die Anteile der einzelnen Ströme entlang deren Routen im Netz verteilen. Jeder Detektor kann so seine Verkehrsströme über das Netz verteilen, und auf jedem Link ergibt sich als Summe all dieser propagierten Ströme die dort geschätzte Gesamtverkehrsstärke. Das Prinzip ist in der folgenden Abbildung veranschaulicht.



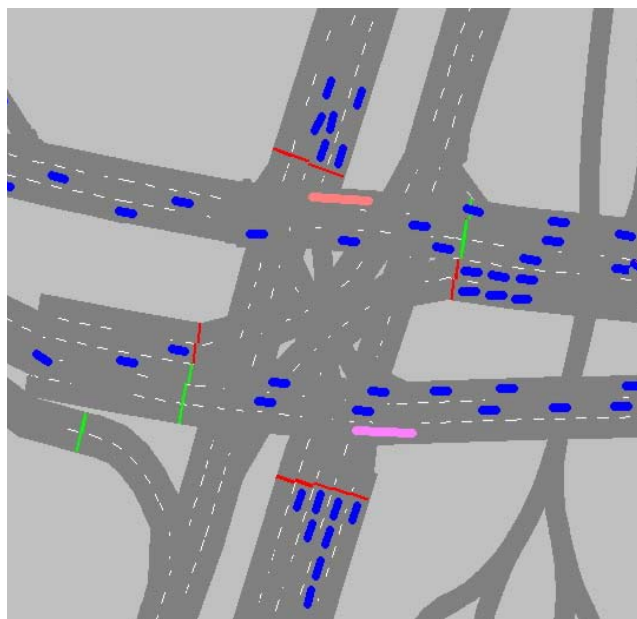
**Abbildung 3: Darstellung des Routenbündels, das durch einen Detektor verläuft.
Die Balkenhöhe gibt die Verkehrsstärke an.**

Beispiel: Berlin Kantstrasse

Ampeln sind nie richtig geschaltet, oder? Um herauszuarbeiten, ob diese Einschätzung eher subjektiv (Typ: der Schalter an dem man selbst ansteht ist immer der, der am langsamsten abgearbeitet wird) oder auch objektiv richtig ist, wurde vom Institut für Verkehrsforschung der DLR im Sommer 2003 in Zusammenarbeit mit Prof. N.H. Gartner eine Messkampagne in der Berliner Kantstrasse durchgeführt.

Ziel war es, Daten zu erheben, mit deren Hilfe man die Qualität der aktuellen LSA-Schaltung überprüfen kann, und Verbesserungsvorschläge machen zu können. Das sollte mit den von Gartner entwickelten Optimierungsprogrammen möglich sein und liefert gleichzeitig eine Abschätzung, wie viel Reisezeitersparnis durch ein solches Koordinierungsverfahren zu erreichen ist.

Zu diesem Zweck wurde mit diesen Daten eine Verkehrssimulation mit VISSIM aufgesetzt. Die Kantstrasse in Berlin verbindet den Westteil der Stadt und die Stadtautobahn A 111 mit der Innenstadt (Bahnhof Zoo). Auf einer Länge von 3.6 km befinden sich 19 Kreuzungen, auf denen zum Teil erhebliche Querverkehre kreuzen. Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes wurde am 12.6.2003, von 15:00-18:00 eine Messkampagne durchgeführt mit dem Ziel, alle Verflechtungsmatrizen an den 19 Kreuzungen zu erheben. Um den dafür notwendigen Aufwand nicht zu groß werden zu lassen, wurden die Kreuzungen von drei Teams nur jeweils einen Teil der Zeit beobachtet, und entsprechende Stundenwerte hochgerechnet. An der Kreuzung Messedamm/Kantstrasse wurde ein Messfahrzeug postiert, das mit Hilfe von drei Videozählsystemen die Verflechtungsmatrizen über die gesamte Zeit an dieser Kreuzung bestimmen konnte. Vom Tiefbauamt gestellt wurde die aktuell vorliegende Lichtsignalanlagenkoordination, die als Referenzfall für die nachfolgenden Untersuchungen dient.



**Abbildung 4: Darstellung der Kreuzung Messedamm
im VISSIM Simulator**

Die Optimierungsprogramme benötigen als zusätzlichen Inputparameter die Dauer der so genannten Umlaufzeit, das ist die Zeit die eine LSA für einen gesamten Zyklus benötigt. Als Funktion dieser Umlaufzeit berechnet das Programm dann die optimale Konfiguration für alle LSA entlang der Kantstrasse. Diese Konfiguration wird dann in VISSIM eingelesen, und die Simulation liefert dann die relevanten Größen wie die durchschnittliche Wartezeit an den einzelnen Kreuzungen, Reisezeiten, Verkehrsstärken und vieles andere mehr.

Das Ergebnis ist in Abbildung 5 zu sehen. Das beste Ergebnis (im Sinne der durchschnittlichen Verlustzeit pro Fahrzeug und Kreuzung) ergibt sich für eine Umlaufzeit von 68 s, das zweitbeste Ergebnis liegt mit 84 s in der Nähe der tatsächlichen Einstellung der LSA in der Kantstrasse. Insgesamt ergibt sich eine Einsparung der Wartezeiten von etwa 8% wenn man dem Optimierungsvorschlag folgte. Das interessanteste Ergebnis ist aber vielleicht, dass die Verbesserung durch die Optimierung vor allem zugunsten der Seitenstrassen gehen, nicht zugunsten der Koordinierung auf der Kantstrasse selbst. Von daher kann man vermuten, dass die aktuelle Einstellung das Ziel verfolgte, die Koordinierung entlang der Kantstrasse zu optimieren.

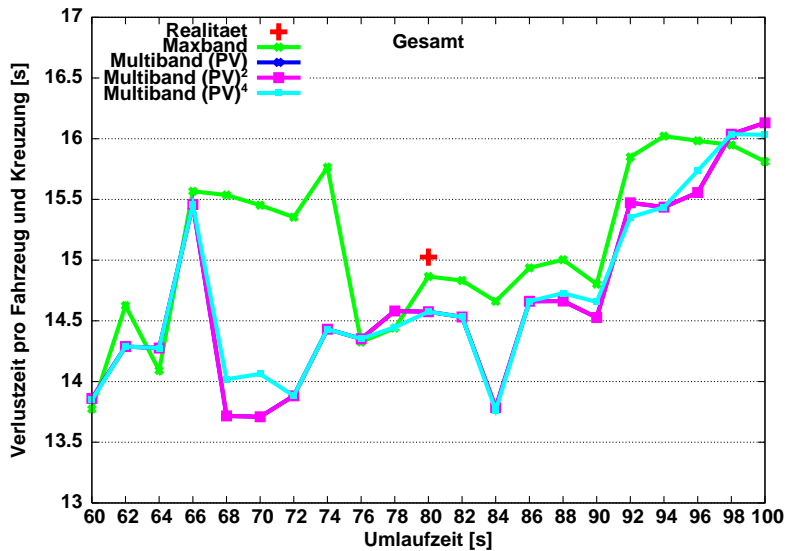


Abbildung 5: Verlustzeit als Funktion der Umlaufzeit, wie sie die Kombination von Optimierung und VISSIM-Simulation ergibt.

Beispiel: Störungsmanagement INVENT

Im Rahmen des Forschungsprogramms INVENT des BMBF war unter anderem die Aufgabenstellung, ein Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe Störungen in städtischen Netzen begegnet werden kann. Bei INVENT stehen vor allem neue Verfahren des Verkehrsmanagement im Fokus, die zum Teil auf der Möglichkeit aufsetzen, Routenempfehlungen individualisiert den Reisenden zur Verfügung zu stellen. Bei Störungen im städtischen Netz stellt sich oft die Frage, wie man ein gewünschtes Ergebnis, zum Beispiel die partielle Sperrung eines hoch belasteten Bereiches, erreichen kann. Das wichtigste Instrument des Operators in der Verkehrsleitstelle ist dabei die Schaltung der LSA. Allerdings ist nicht klar, wie ein ganzes System von LSA zu schalten ist, um Verkehr aus einem bestimmten Bereich anzuleiten, aber gleichzeitig einen zu starken Zustrom zu vermeiden. Hier hilft ebenfalls eine entsprechend angepasste Simulation weiter. In der Simulation lässt sich ein bestimmter Bereich der

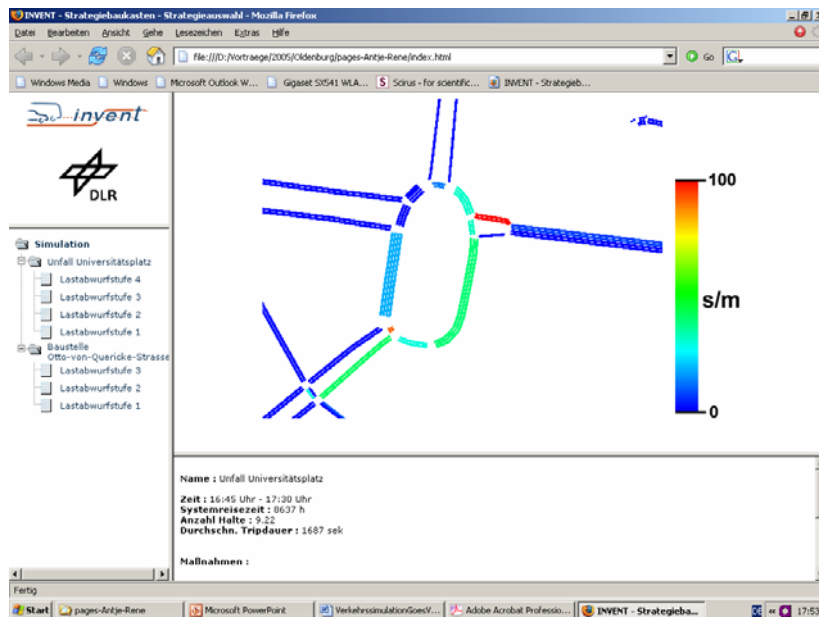


Abbildung 6: Darstellung des Ergebnisses einer Störfallsimulation; verschiedene Szenarien werden dargestellt aus denen der Operator dann die beste auswählt.

Stadt nämlich sehr einfach unattraktiv machen, in dem fiktiv sehr viel längere Reisezeiten angenommen werden. Damit zieht Verkehr aus den betroffenen Gebieten ab, das Ziel wird also erreicht. Die Umsetzung in eine Strategie, also eine entsprechende Schaltung der LSA, wird ebenfalls aus der Simulation entnommen. In der Simulation wird nämlich eine adaptive LSA-Schaltung verwendet, die sich auf die geänderten Ströme einstellt. Somit kann die richtige LSA-Schaltung direkt in eine Verkehrsleitzentrale eingespielt werden; das funktioniert in der Realität natürlich nur, wenn die Fahrer auch entsprechend informiert werden.

Beispiel: Stadtinfo Köln / Weltjugendtag

Ziel dieses Projektes war es, mit Hilfe des luftgestützten Verkehrslageerfassungssystem AN-TAR den Verkehr rund um den Weltjugendtag zu erfassen und der Polizei eine Prognose als Entscheidungsunterstützung zur Verfügung zu stellen. Ein Teilprojekt bestand dabei darin, die Verkehrsdaten aus verschiedenen Quellen (Quelle/Ziel Matrix von NRW, Zählschleifendaten der Autobahn wie auch der Stadt Köln, die Pilgerstrommatrix vom Weltjugendtagsbüro) in eine Simulation einzuspielen und auf der Grundlage einer konsolidierten simulierten Verkehrslage eine Prognose zu fahren, die den voraussichtlichen Verkehrszustand in einer halben Stunde darstellt.

Interessanterweise traten an diesem Wochenende nur relativ geringe Verkehrsstörungen auf, was daran lag, dass die Autofahrer in der Tat Köln weiträumig umfahren haben. Aus diesem Grund war der Weltjugendtag kein echter Hätetest, der Normalfall sah tatsächlich aus wie in Abbildung 8.



Abbildung 7: Der Zeppelin, der die DLR Kameras für die Verkehrslageerfassung während des Weltjugendtages 2005 transportiert hat.

Die Simulation konnte dabei auf Erfahrungen aufbauen, die einige Jahre zuvor im Projekt stadtinfoKöln gemacht wurden. Auch hier ging es darum, auf der Basis einer so genannten Verkehrsnachfrageschätzung und der aktuellen (online) Zählschleifendaten eine Prognose des Verkehrszustandes eine Stunde in die Zukunft zu erstellen. Das System, das in Zusammenarbeit mit dem ISB der RWTH Aachen und dem ZAIK der Universität zu Köln aufgebaut wurde, arbeitet auch heute noch in der Verkehrsleitstelle der Stadt Köln.

Alle fünf Minuten, nachdem die neuen aktuellen Daten eingelaufen sind, startet der Algorithmus, der den aktuellen Simulationszustand mit den neuen Daten vergleicht. Durch Hinzufügen bzw. Wegnahme von Routen in der Simulation kann eine Annäherung an den realen Verkehrszustand erreicht werden, die dann die Grundlage einer schnellen Simulation darstellt. Nach etwa drei Minuten hat die Simulation die Prognose für die nächste Stunde erstellt, das System läuft also 20 mal schneller als die reale Zeit. Der dahinter stehende Simulationsalgorithmus ist ein radikal vereinfachtes mikroskopisches Modell des Verkehrs in Köln, ein so genanntes Warteschlangenmodell.

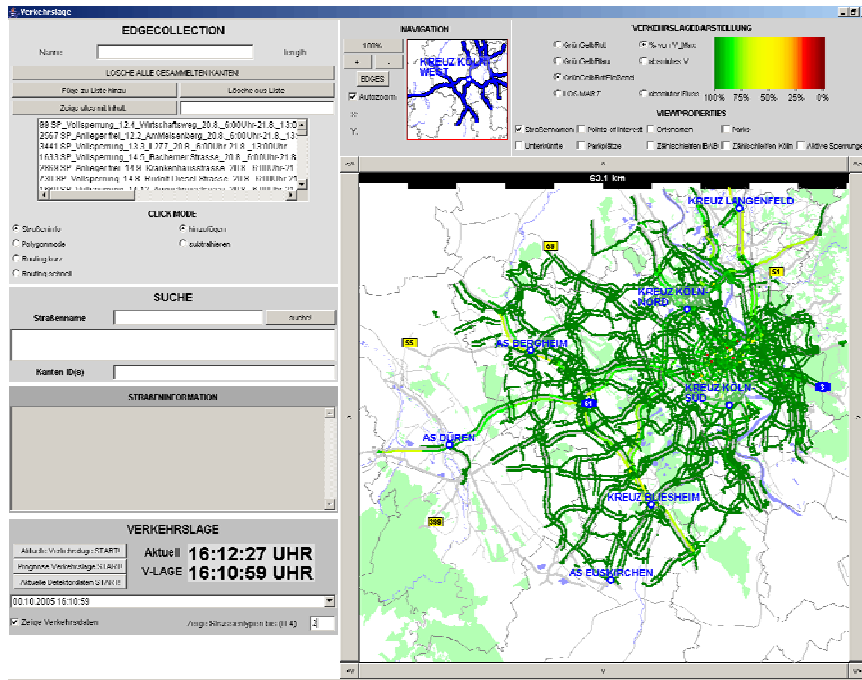


Abbildung 8: Aus dem Simulationsmodell abgeleitetes Verkehrslage

Wie gut das funktioniert, ist auf der Abbildung 9 zu erkennen. Der rechte Plot zeigt die Simulation an einem Rosenmontag, bei dem irrtümlicherweise die Verkehrsnachfrage eines normalen Montags unterstellt wurde. Dennoch schafft es das Verfahren, sich zumindest in Richtung auf die Realität zu bewegen, d.h. es korrigiert die komplett fehlerhafte Verkehrsnachfrage zu einem guten Teil. Der linke Plot zeigt dann wie es richtig gemacht wird, das Verfahren schafft es die Abweichung zwischen Realität und Simulation von etwa 20% auf 14% zu reduzieren.

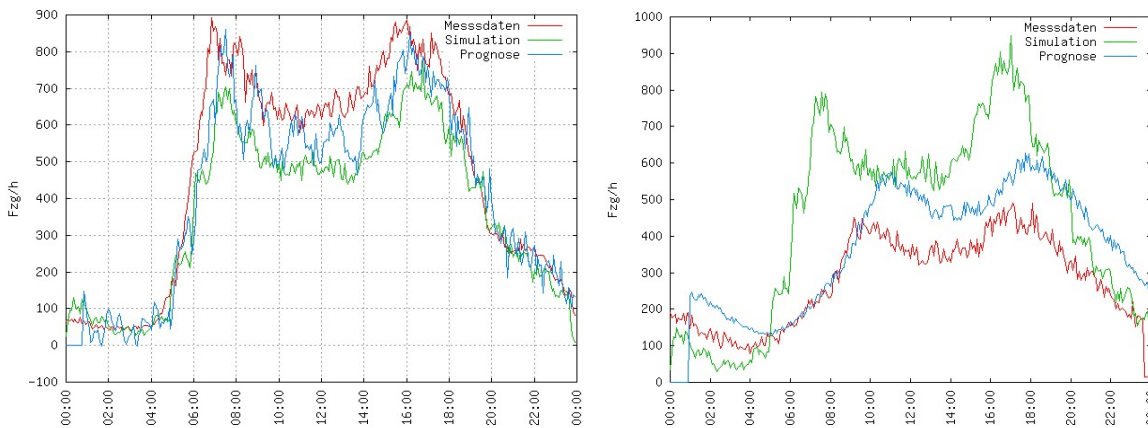


Abbildung 9: Prognose des Verkehrs in Köln. Rechts der Rosenmontag, links ein normaler Montag. In beiden Bildern ist die blaue Kurve die Simulation der Prognose des Verkehrs eine Stunde in die Zukunft, verglichen mit dem Verkehr wie er tatsächlich zur Prognosezeit geherrscht hat (rote Kurven).

Virtuelles Verkehrsmanagement im Traffic Tower

Michael Bonert⁽¹⁾, Lutz Rittershaus⁽²⁾

⁽¹⁾ DLR e.V., Institut für Verkehrsforschung

⁽²⁾ Bundesanstalt für Straßenwesen

Das Verkehrsaufkommen steigt stetig und das Verkehrsmanagement wird zunehmend komplexer. Zur Sicherung der Mobilität wurden sowohl auf Seiten der Betreiber der Verkehrsinfrastruktur als auch auf Seiten von Forschung und Entwicklung zahlreiche Aktivitäten etabliert, um die Ausnutzung der vorhandenen Straßeninfrastruktur zu optimieren. Ein probates Mittel um die Zugänglichkeit für Innovationen in diesen Bereich zu optimieren ist die Standardisierung von Technologien. Hierzu finden sich Prozesse in allen Bereichen der Verkehrssteuerung.

So steht beispielsweise in der durch starke Herstellerabhängigkeit geprägten Welt der Innerortssteuerung in den kommenden Jahren die Einführung eines neuen Kommunikationsstandards bevor. Mit OCIT (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems) soll eine hersteller-unabhängige Kommunikation der Einzelkomponenten, wie Sensoren, LSA oder Steuerungsrechner auf XML Basis ermöglicht werden.

Im Bereich der Tunnelsteuerung hat nach den schweren Brandunfällen 1999 im Mont-Blanc- und im Tauerntunnel sowie 2001 im Gotthard-Tunnel das Thema Tunnelsicherheit auf fachlicher und politischer Ebene eine höhere Priorität erhalten. Die Erfahrungen aus diesen schweren Brandunfällen führten zu einer Fortschreibung der RABT (Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Tunnelanlagen). Neben neuen Vorgaben für die Tunneltechnik und -ausstattung wurden durch die RABT 2003 auch die organisatorischen Anforderungen an die Tunnelbetreiber erhöht.



[Quelle: Bast 15.01.2003]

Abbildung 1: Verkehrsrechnerzentralen des Bundes

Basissoftware des Bundes für Verkehrsrechnerzentralen

Um die Mobilität auf deutschen Bundesfernstraßen für die Zukunft zu sichern, wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) das Programm zur Verkehrsbeeinflussung auf Bundesautobahnen für den Zeitraum von 2002 bis 2007 fortgeschrieben.

Mit der Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen um z.B. temporäre Standstreifenfreigabe, Zuflussregelung und dynamischer Wegweisung mit integrierten Stauinformationen steigen auch die Anforderungen an Rechnerzentralen, die diese Anlagen steuern. Bis zum Jahre 2007 sollen ca.1200 km der deutschen Autobahnen mit Beeinflussungsanlagen ausgestattet werden. Die ist verbunden mit dem kontinuierlichen Ausbau der Verkehrsrechnerzentralen (VRZ). Um diesen Ausbau in den nächsten Jahren zu gewährleisten, wird aktuell eine einheitliche Basissoftware für VRZn entwickelt, die allen Bundesländern für ihre Zentralen zur Verfügung stehen wird.

Von großer Bedeutung ist auch die Qualifizierung des Bedienpersonals von Verkehrsrechnern. Die immer komplexer werdenden Steuerungsaufgaben erfordern entsprechend ausgebildete Operatoren, um eine hohe Qualität der Verkehrsbeeinflussung sicherzustellen.

Aufbau Traffic Tower

Um diese Prozesse von Seiten der Forschung zu unterstützen, entwickelt das DLR den Traffic Tower, die erste *virtuelle* Verkehrsmanagement-Zentrale Deutschlands. Dabei wird, ähnlich zu Simulatoren in der Luftfahrt, eine sog. „Human Integrated Simulation“ Anlage geschaffen.

Die Ausstattung des Traffic Towers orientiert sich dabei an realen Verkehrszentralen und es entsteht eine voll funktionsfähige Verkehrszentrale in einer virtuellen Umgebung.

Kern der Anlage ist die Kopplung von Verkehrsrechner und Verkehrssimulation, wodurch ein Simulator für Verkehrszentralen entsteht. In der Anlage werden bisher nur einzeln existierende Komponenten als „closed loop“ zusammen gefügt (siehe Abbildung 2)

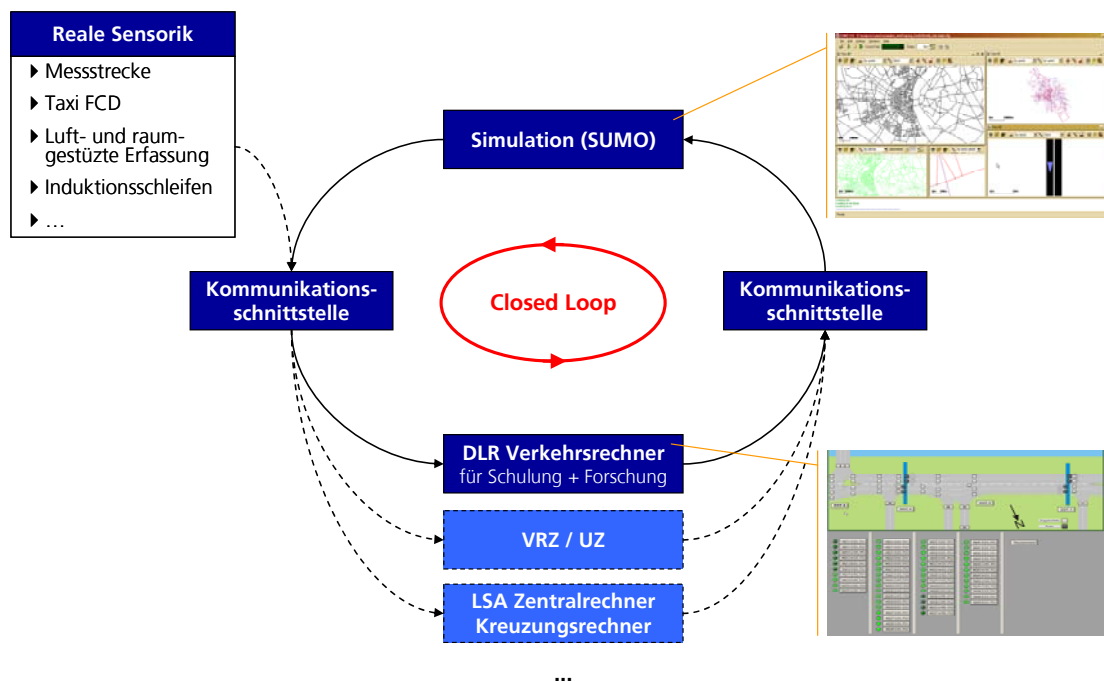


Abbildung 2: Funktionsprinzip Closed Loop

Mit dem DLR Verkehrsrechner entsteht ein für Forschungs- und Trainingszwecke geeigneter Verkehrssteuerungsrechner für die Bereiche Innerorts, Außerorts und Tunnelsteuerung. Die Kommunikationsschnittstelle ermöglicht es, neben dem DLR Verkehrsrechner auch externe Verkehrsrechner in den Traffic Tower zu integrieren. Als Verkehrssimulation wird derzeit die DLR Eigenentwicklung „SUMO“ genutzt. Der Einsatz weiterer Simulationsprodukte soll möglich sein.

Derzeit ist ein Prototyp entwickelt, der den Closed Loop für einen Berliner Autobahnabschnitt realisiert. Für den Abschnitt der Stadtautobahn A100 zwischen Kreuz Schöneberg und Tunnel Ortsteil Britz wurde die Topologie der Strecke inklusive der Verkehrssteuerungsinfrastruktur nachgebildet (siehe Abbildung 3). Dies beinhaltet eine digitale Karte des betrachteten Netzes sowie die georeferenzierte Lage von Sensorik und Aktorik. Auf Basis realer Verkehrsdaten wurde eine Nachfrage entwickelt, die einem „typischen Werktag“ auf dieser Strecke entspricht.

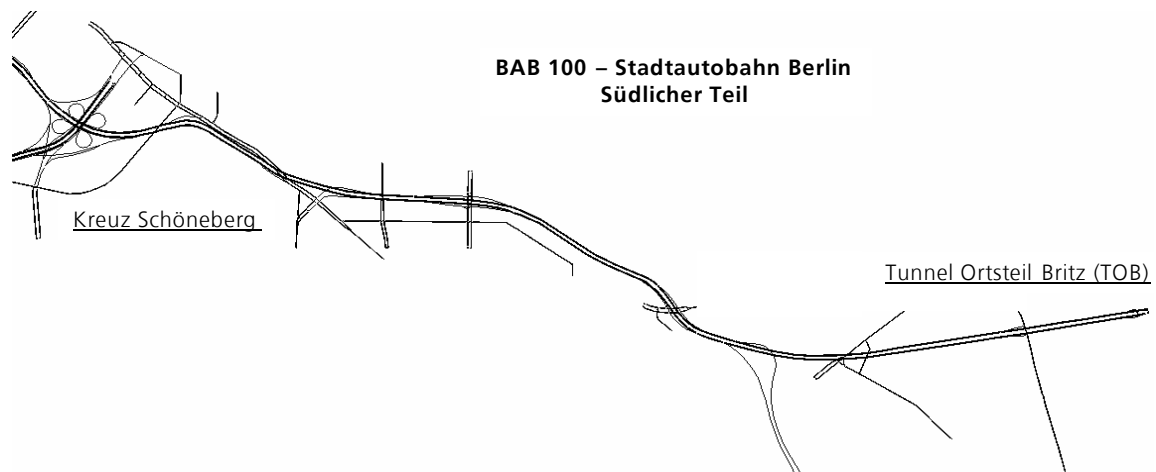


Abbildung 3: Streckenabschnitt Closed Loop Prototyp

Als Gegenstück zur Simulation wurde eine einfache Unterzentrale entwickelt. Diese empfängt die von der Simulation generierten Sensordaten und ermöglicht einem Operator die Eingabe von Steuerungsbefehlen. Hier können sowohl einzelne Anzeigenquerschnitte angesteuert als auch einfache Schaltprogramme, wie beispielsweise zur Schaltung eines Geschwindigkeitstrichters, realisiert werden (siehe Abbildung 4).

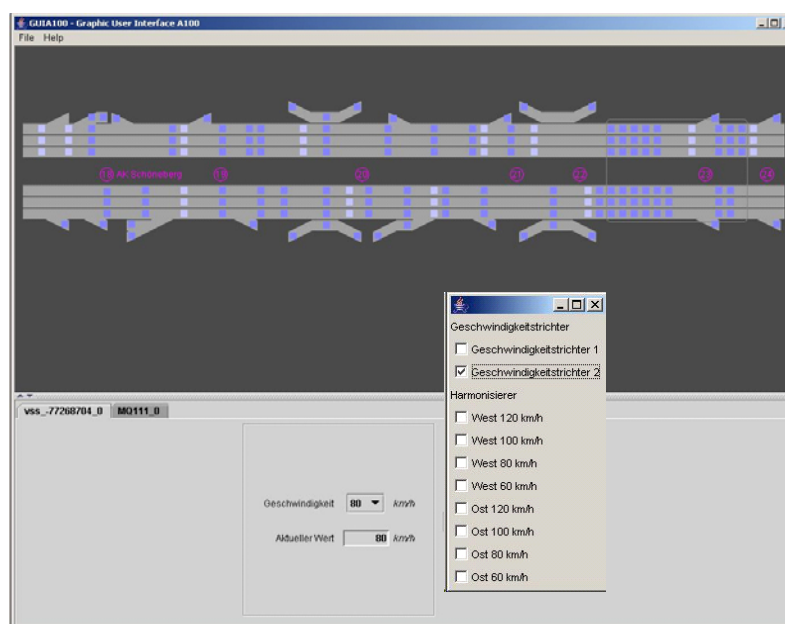


Abbildung 4: Prototyp Unterzentrale

Traffic Tower Verkehrsrechner

In der Vollversion des Traffic Tower Verkehrsrechners sollen dann alle, auch in der Realität vorhandenen Steuerungsmöglichkeiten enthalten sein. Dabei soll der Verkehrsrechner die „klassischen“ Grenzen der Verkehrssteuerung (Außerorts, Innerorts, Tunnel) überwinden und zur „virtuellen“ Verkehrssteuerung aller Bereiche geeignet sein.

Ebenso sollen im Verkehrsrechner beliebige Netze und Anlagen abgebildet werden können, so dass der Operator seine „gewohnte“ Umgebung vorfindet.

Um diesem hohen Anspruch gerecht zu werden, wurde ein Systemdesign gewählt, dass sich am Basissystem des Bundes für VRZ orientiert. Mit dem Datenverteiler als Grundgerüst können bestehende wie auch neue Module zur Verkehrssteuerung integriert werden. Er bietet vielfältige Ansatzpunkte für Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

Das DLR kann so die (Weiter-)Entwicklung unterstützen und den aktuelle Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung in diese Systeme integrieren.

Simulation SUMO

Die derzeit im Traffic Tower verwendete Simulation „SUMO“ ist eine Eigenentwicklung des Institutes für Verkehrsforschung. Dieses mikroskopische Modell bildet die topologischen Eigenschaften der Straße ab, wie bspw. Mehrspurverkehr, Lichtsignalanlagen und Wechselverkehrszeichen. SUMO wurde insbesondere für die Simulation komplexer Straßennetze entwickelt und kann derzeit ca. 300.000 Fahrzeuge in Echtzeit simulieren. Als Simulationsmodell wird ein kontinuierliches, kollisionsfreies Fahrzeugfolgemodell genutzt.

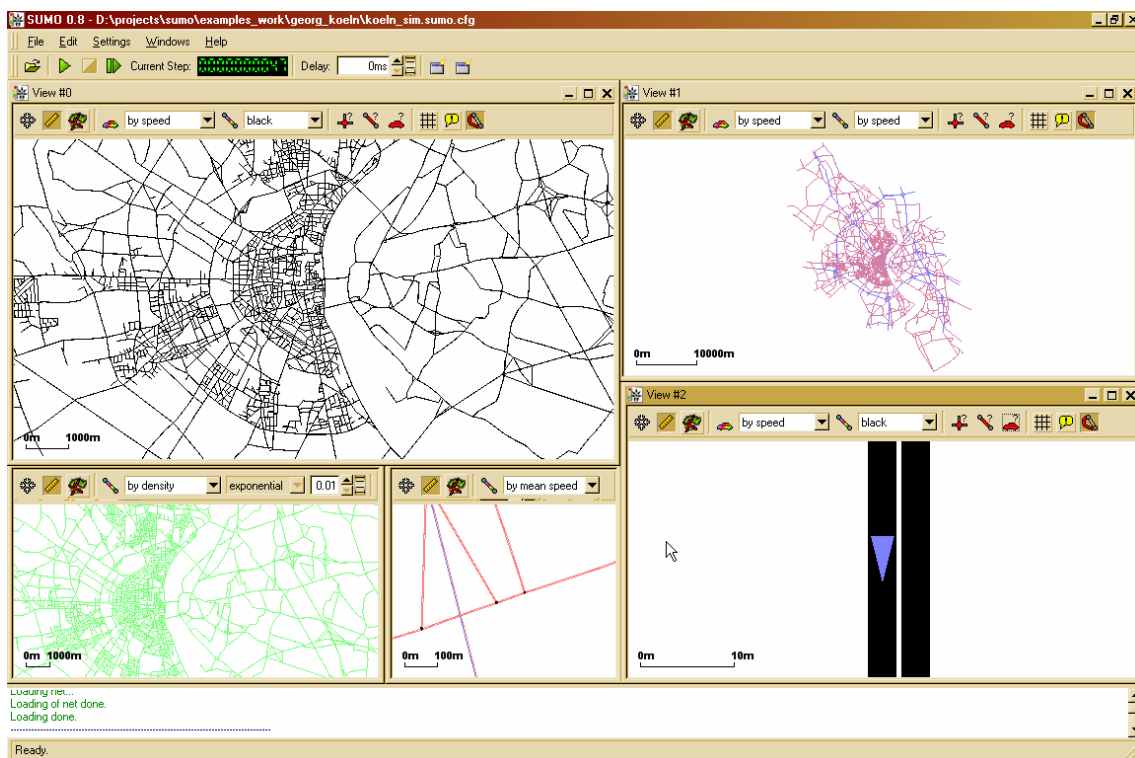


Abbildung 5: Simulation SUMO

Messstrecke als „realer Arm“ des Traffic Towers

Neben dem „Closed Loop“ Betrieb können auch Verkehrsdaten aus realen Quellen über die Kommunikationsschnittstelle in das System integriert werden („Open Loop“). So zum Beispiel von der Messstrecke des Instituts am Ernst-Ruska-Ufer. Sie stellt den „realen Arm“ des Traffic Towers dar.

Die Messstrecke ist ein ca. anderthalb Kilometer langer vierstreifiger Autobahnzubringer zur BAB 113 nach Berlin Mitte. Die Straße wurde vom DLR mit Sensorik zur Verkehrsdatenerfassung ausgestattet, wie Induktionsschleifen, Kameras und Radarsensoren. Zwei Schilderbrücken tragen die Überkopfsensorik, freie Sensorplätze ermöglichen die einfache Installation von neuen, zu testenden Sensoren. Die Datenübertragung erfolgt zum einen über das Standardprotokoll der Außerortssteuerung (TLS) und zum anderen über Glasfaserkabel mittels TCP/IP Protokoll. Abbildung 6 zeigt eine Übersicht der Messstrecke.

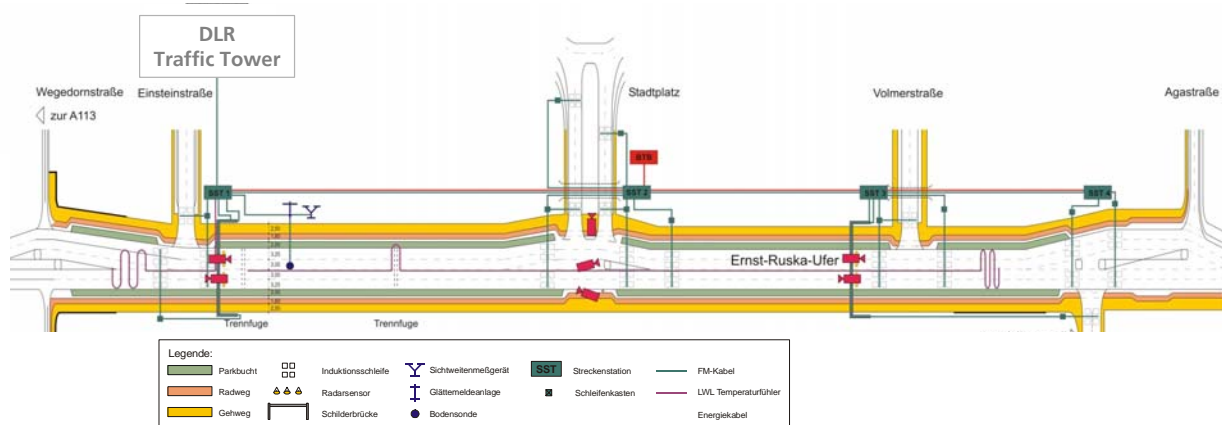


Abbildung 6: DLR Messstrecke Ernst-Ruska-Ufer

Anwendungsfelder des Traffic Towers

Neben der Entwicklung der Anlage Traffic Tower als Werkzeug für die Forschung werden parallel auch die Forschungs- und Entwicklungsfelder des Traffic Towers aufgebaut.

Der Traffic Tower ermöglicht es, Auswirkungen von Maßnahmen oder Eingriffen in den Verkehr aufzuzeigen. Er schließt technologisch und inhaltlich an die Aktivitäten des DLR zur Verkehrsdatenerfassung an und realisiert so die gesamte Systemkette des Verkehrsmanagements bis hin zur Ausgabe von Informationen und Steuerungsbefehlen.

Für den Betrieb des Traffic Towers werden folgende Themenfelder vorbereitet:

1. Verkehrssystemmanagement

Im Bereich Verkehrssystemmanagement sollen neue Technologien entwickelt und in Verkehrsmanagementsysteme integriert. Hierzu werden bspw. neue Strategien zum Verkehrsmanagement erarbeitet und getestet. Im Fokus stehen dabei die Nutzung flächiger Verkehrsdaten im Verkehrsmanagement (Luft- und raumgestützte Erfassung, FCD)

2. Katastrophen und Großereignisse

Der Bereich beschäftigt sich mit dem Verkehrsmanagement bei Katastrophen und Großereignissen. Ziel ist es, die gesamte Kette von der Datenerfassung bis hin zur Ausgabe zum Verkehrsmanagement zu realisieren und so ein System zur Entscheidungsunterstützung für Operatoren und Sicherheitskräfte zu schaffen.

3. Operatoren im Verkehr

Der Bereich befasst sich mit der Mensch-Maschine-Schnittstelle bei Verkehrssteuerungssystemen. Ziel ist es, mit den Traffic Tower die Aus- und Weiterbildungen von Verkehrsoperatoren zu unterstützen.

Schulungen und Ausbildung von Operatoren

Einen wichtigen Part des Traffic Towers stellen Schulung und Training dar. Schwerpunkte sind die Schulung von Entscheidungsträgern und das operationelle Training von Operatoren im Verkehrsmanagement.

Mit dem Projekt „ATOP“ (Auswahl und Training von Operatoren) wurde ein Projekt begonnen, das sich wissenschaftlich mit der Schulung von Verkehrsoperatoren beschäftigt. Ziel ist es, ein Curriculum und Trainingseinheiten für Operatoren zu erstellen und zu validieren.

Am Projekt ist neben dem Institut für Verkehrsforschung auch die Abteilung Luft- und Raumfahrtpsychologie des Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin beteiligt, so dass die Schulungen auf Basis verkehrswissenschaftlicher und psychologischer Kenntnisse entwickelt werden kann.

Aktuell befindet sich das Projekt in der Analysephase. Ziel ist es hier, ein Anforderungsprofil für Operatoren in den Einsatzbereichen Außerorts, Innerorts und Tunnelsteuerung zu entwickeln. Grundlage bildet hierzu eine Erhebung in 3 Tunnelzentralen, 4 Verkehrsleitzentralen und 5 Verkehrsrechnerzentralen, in der die Eigenschaften und Aufgaben von Operatoren erfasst und bewertet werden. Bisher wurden 49 Operatoren aus 8 der 12 Einrichtungen befragt. Nach Abschluss der Befragungen werden die Daten ausgewertet und das Anforderungsprofil erstellt.

Auf Basis dieses Anforderungsprofils wird ein Curriculum erarbeitet, das die Themen der Ausbildung für Operatoren beschreibt und deren Inhalte skizziert. Einzelne Schulungsinhalte werden anschließend ausgearbeitet und in Testschulungen validiert.

Dem DLR Traffic Tower stehen so verlässliche Schulungsmodulare zur Verfügung. Er kann so einen Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit durch besser ausgebildete Operatoren leisten.

Verkehrsmanagement bei Großereignissen und Katastrophen

Wie schon erwähnt, schließt der Traffic Tower technologisch wie inhaltlich an die Aktivitäten des DLR zur Verkehrsdatenerfassung an. Er realisiert so die gesamte Systemkette des Verkehrsmanagements von der Datenerfassung bis zur Ausgabe von Informationen und Steuerungen.

Im Fokus steht hier die Nutzung flächigen Verkehrsdaten. Durch die Integration dieser Verkehrsdaten entsteht eine neue Dimension des Verkehrsmanagements, die insbesondere zur Unterstützung des Managements von Großereignissen und Katastrophen genutzt werden kann.

Mit der Realisierung der Systemkette soll ein Tool zur Entscheidungsunterstützung für Krisenmanager entwickelt werden. Kernpunkt dieses System ist die Darstellung einer aktuellen Verkehrslage und einer Prognose für die nächsten 30-60 Minuten. Diese werden durch die Simulation des Traffic Towers auf Basis von aktuellen Verkehrsdaten berechnet. Durch die Nutzung der Simulation ermöglicht es der Traffic Tower hier auch unterschiedliche Maßnahmen im Vorhinein zu testen und zu bewerten. Weitere Features können die Routenplanung für Einsatzkräfte oder Errechnung optimaler Standorte für Einsatzdepots aufgrund der aktuellen Lage sein.

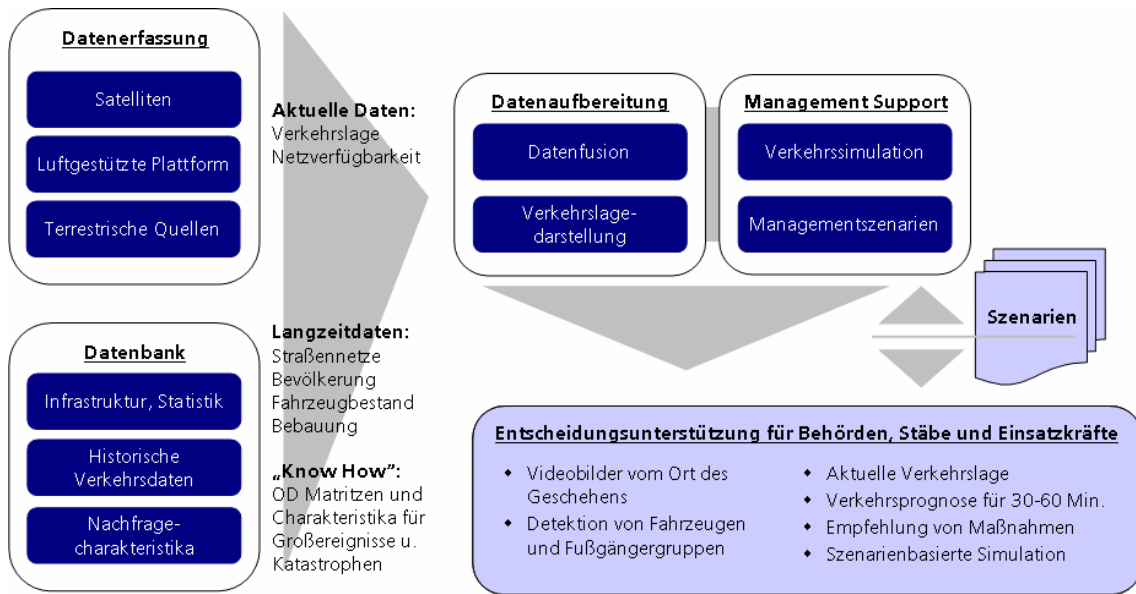


Abbildung 7: Systemkette für Großereignisse und Katastrophen

Die bereitgestellten Live-Bilder vom Fluggerät bieten zusätzlich visuelle Eindrücke vom Ort des Geschehens. Die Georeferenzierung der Bilder ermöglicht die automatisierte Darstellung innerhalb einer digitalen Karte.

Zum Weltjugendtag 2005 in Köln wurde ein Teil dieses Systems bereits entwickelt: Für die Polizei Köln wurde ein Luftmonitoring via Zeppelin und eine Verkehrslagedarstellung auf Basis der Verkehrssimulation realisiert.

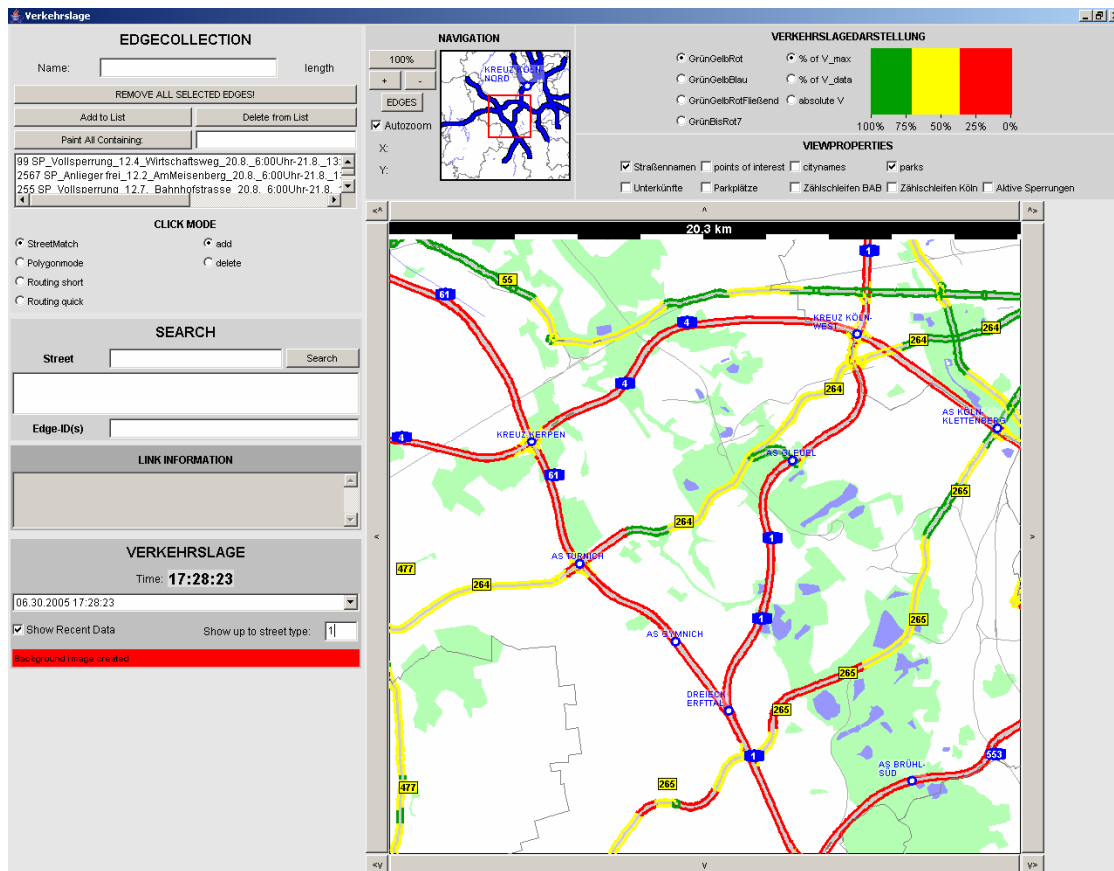


Abbildung 8: Weltjugendtag 2005: Darstellung der Verkehrslage

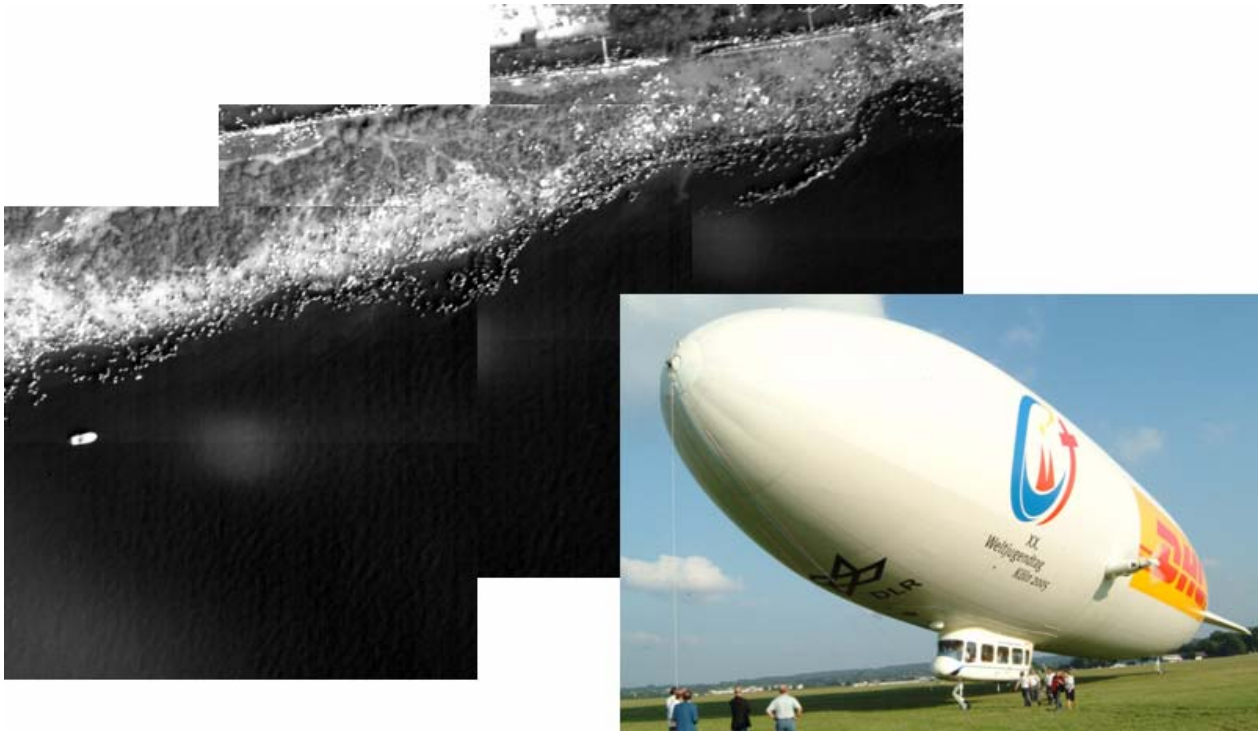


Abbildung 9: Weltjugendtag 2005 Überflug Rheinufer und Zeppelin

Neben diesem System zur Entscheidungsunterstützung bietet der Traffic Tower auch im Vorfeld von Großereignissen und Katastrophen Möglichkeiten zur Unterstützung:

Es können z.B. schon im Planungsprozess einer Großveranstaltung Simulationen und Testläufe der geplanten Verkehrsmaßnahmen durchgeführt und ihre Wirkung überprüft werden. Unterschiedlichste Szenarien können im Traffic Tower durchgespielt sowie Verkehrsoperatoren und Hilfskräfte auf mögliche Krisen und Störfälle vorbereitet werden.

Zum Katastrophenmanagement wie z.B. bei Hochwasser, Massenevakuierungen oder anderen Großschadenslagen können neben dem Training der Operatoren und der Überprüfung der Maßnahmen auch konzertierte Übungen mit Hilfskräften, wie Katastrophenschutz und Polizei, durchgeführt werden. In „virtuellen Übungen“ kann das Zusammenspiel von Verkehrsmanagern und Rettungskräften geübt werden.

Sicherer Schienenverkehr mit GALILEO

Thomas Strang⁽¹⁾, Michael Meyer zu Hörste⁽²⁾, Xiaogang Gu⁽³⁾

⁽¹⁾ DLR e.V., Institut für Kommunikation und Navigation

⁽²⁾ DLR e.V., Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung

⁽³⁾ Bombardier Transportation RailControlSolutions

Thomas.Strang@dlr.de, Michael.MeyerzuHoerste@dlr.de, Xiaogang.Gu@de.transport.bombardier.com

Einführung

Mit GALILEO entsteht ein globales Satelliten-Navigationssystem, das aufgrund seiner Eigenschaften neben den bisher bekannten klassischen Ortungs- und Navigationsanwendungen auch vielfältige erweiterte Verkehrsanwendungen und Dienste ermöglicht [Gisz05]. Hierzu zählt auch eine Modernisierung der Zugsicherungstechnik. Denn auch heute stoßen immer noch Züge mit Zügen, Baufahrzeugen, Arbeitergruppen oder anderen Verkehrsteilnehmern zusammen, obwohl dies durch eine umfangreiche und aufwändige Technik wie einer nahezu flächendeckenden Ausrüstung der Gleise mit Achszählern und Gleisstromkreisen vermieden werden soll. Erfahrungen aus der Luftfahrt mit dem *Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS)*⁴ [ADS-B] oder dem neuen maritimen *Automatic Identification System (AIS)* [USCG, Mak] zeigen, dass das Problem der Kollisionsvermeidung auch durch weitgehend infrastrukturunabhängige Systeme deutlich verbessert werden kann.

In diesem Beitrag wird dazu ein konkreter, infrastrukturunabhängiger Ansatz vorgestellt, bei dem unter Verwendung von GALILEO Informationen über Position, Geschwindigkeit und andere wichtige Werte im Rahmen einer Zug-Zug-Kommunikation ausgetauscht werden. Diese Informationen können von anderen Bahnfahrzeugen in der Region ausgewertet werden und von der Information über kritische Zustände (Traffic Alert - TA), über Lösungsvorschläge (Resolution Advisory – RA) bis hin zu steuernden Eingriffen (i.d.R. Bremsen) reichen. Das System wird als „Railway Collision Avoidance System - RCAS“ bezeichnet.

Heutige Situation der Zugsicherungstechnik

Heute erfolgt die Einstellung und Zuordnung von so genannten Fahrstraßen zu einem exakt definierten Zug mit Hilfe von Stellwerken. Hierbei werden alle Gleisfeldelemente (Weichen, etc.) in die richtige Lage gebracht und verschlossen. Dann werden die Signale auf „Fahrt“ gestellt. Die Züge sind mit einem Sicherungssystem ausgerüstet, das bei einer Vorbeifahrt an Signalen, die nicht auf „Fahrt“ stehen, automatisch eine Bremsung auslösen. Die Sicherheit des Verfahrens hängt sowohl von der korrekten Arbeitsweise des Stellwerks, als auch des zugseitigen Sicherungssystems ab und ist leider nicht perfekt: Neben menschlichem Versagen [Bay05] resultieren die viele Unglücke und Katastrophen [Free05] aus mehreren, zum Teil gravierenden Nachteilen der heutigen Situation der Zugsicherungstechnik in diesem Bereich:

- Fahrzeuge oder Züge, die nicht mit dem zugseitigen Sicherungssystem ausgerüstet sind, können an Signalen ungehindert vorbeifahren. Solche Fahrzeuge sind z. B. Baufahrzeuge, ausländische Fahrzeuge oder auch Waggongruppen.
- Im Fall von Störungen im Stellwerk oder im fahrzeugseitigen Sicherungssystem findet keine Überwachung statt.
- Bestimmte Bereiche des Eisenbahnnetzes in Deutschland und Europa sind – aufgrund der geringen Verkehrsdichte – nicht mit Stellwerks- und Übertragungstechnik für die fahrzeugseitige

⁴ Auch in der Luftfahrt wird an der nächsten Generation von Kollisionswarnsystemen gearbeitet [ADS-B]. Das Prinzip des sogenannten *Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B)* ist dem des maritimen AIS recht ähnlich: In regelmäßigen Abständen wird die per GPS ermittelte aktuelle Position per Broadcast abgestrahlt.

Sicherungstechnik ausgerüstet. Die Fahrzeuge die ausschließlich diese Bereiche befahren, sind ebenfalls nicht mit dem Sicherungssystem ausgerüstet.

- Die infrastrukturabhängige Verbauung von Signalen ist teuer und unflexibel. Die Position der Signale, gekoppelt mit den Zugsicherungselementen, die bei Vorbeifahrt eines Zuges ggf. dessen Bremsung veranlassen, ist fest. Die temporäre Montage von Signal- und Zugsicherungselementen ist aufgrund des Aufwands sehr selten.

Aus den genannten Gründen kommt es immer wieder zu Zusammenstößen von beweglichen Einheiten auf den Gleisen (Züge, Baufahrzeuge, Zweiwegebaumaschinen, etc.). Ebenso kommt es häufig zu einem Zusammenprall zwischen einem Zug und einem Straßenfahrzeug oder gar Fußgängern auf einem Bahnübergang. Dies kann seine Ursache in einer Störung des Bahnübergangs oder in einem Fehlverhalten des Straßenverkehrsteilnehmers haben. Typische Unfallursachen sind, dass ein Straßenfahrzeug zwischen Vollschranken eingeschlossen wird und diesen Bereich nicht mehr verlassen kann oder dass Straßenverkehrsteilnehmer regelwidrig Halbschranken umfahren. Die technische Überwachung des Raumes zwischen den Schranken (sog. Freiraumüberwachung) weist zwei Nachteile auf: Zum einen kann ein Zug über ein Fahrzeug, das nach dem Schließen des Bahnübergangs im Freiraum erkannt wird, nicht mehr gewarnt oder gestoppt werden. Zum anderen ist eine sichere Erkennung eines Hindernisses noch immer nicht mit der erforderlichen Verlässlichkeit möglich. So kann ein Fahrzeug möglicherweise den Freiraum vor dem Herannahen des Zugs bereits wieder verlassen haben.

Ansatz

Die Idee des hier vorgestellten Verfahrens ist es, analog zum TCAS/ADS-B oder dem maritimen AIS Informationen über Position, Geschwindigkeitsvektor und andere wichtige Werte aus bestimmten bewegten Einheiten (Züge, Baufahrzeuge, Zweiwegebaumaschinen, etc.) oder in reduziertem Umfang aus bestimmten Infrastruktureinheiten abzustrahlen. Die Züge bestimmen ihre Position und ihren Bewegungsvektor und übertragen ihn direkt an alle Züge oder Fahrzeuge in einem bestimmten Bereich, der im Wesentlichen durch die Reichweite der RCAS-Sendeinheiten limitiert ist. Die empfangenden Züge können nun per Vergleich der Bewegungsvektoren erkennen, ob die Gefahr einer Kollision vorliegt. In Abbildung 1 ist das grundsätzliche Zusammenspiel der verschiedenen RCAS-Schlüsselkomponenten skizziert.



Abbildung 1: RCAS-Komponenten im Zusammenspiel

Bei dem System sind zwei Aspekte von besonderem Interesse, die sich nicht aus der Analogie zu TCAS/ADS-B und maritimem AIS ableiten lassen: Zum einen schränkt die mechanische Spurführung die Eingriffsmöglichkeiten der Triebfahrzeugführer (Tf) drastisch ein. Dieser kann im Prinzip nur seinen Zug in einer Dimension⁵ bremsen oder beschleunigen. Zum anderen erfolgt die Einstellung der Fahrstraßen durch den Fahrdienstleiter (Fdl) im Stellwerk, so dass bestimmte Konflikt-Warnungen sowohl an den Fdl als auch an den Tf ausgegeben werden müssen.

Darüber hinaus muss beachtet werden, dass die Bewegungsvektoren von Bahnfahrzeugen, vollkommen regulär, (nahezu) auf einander zeigen dürfen. Beispielsweise erfordern das Kuppeln von Halbzügen sowie das Nachschieben solche „Konflikte“. Ebenso ist beim „fliegenden“ Überholen und Ausweichen auf Hochgeschwindigkeitsstrecken eine solche Situation zulässig. Selbst die Bewegungsvektoren von sich begegnenden Zügen weisen bei einer Relativgeschwindigkeit von 300km/h nur 3m aneinander vorbei, in Kurven z. T. noch weniger. Auf Grund des sehr deterministischen Fahrverhaltens von Zügen sind diese Situationen alle erkennbar und klassifizierbar, so dass ein RCAS zur Warnung von Tf und Fdl vorstellbar ist. Wenn eine echte Kollisionssituation auftritt, hat der Tf nach der Erkennung der Kollision nur noch die Möglichkeit eine Bremsung auszulösen. Der Fdl hat im Stellwerk auf Grund der Weicheneinstellung auf Seiten der Infrastruktur weitere Lösungsmöglichkeiten.

Zur Bestimmung der Position kann insbesondere das Satellitennavigationssystem GALILEO verwendet werden, ggf. ergänzt um lokale Elemente (z.B. in Tunneln) oder differentiellem Overlay-System, um die Genauigkeit der Positionsinformation bis in den cm-Bereich zu verbessern. Die hochgenaue Positionsinformation ist Voraussetzung für eine gleisspurselektive Auslegung des Verfahrens. Bei Überfahrt gleisseitig verbauter Balisen⁶ ergibt sich eine weitere Quelle zur Gleisspur-Identifikation, so dass bei kombinierter Betrachtung das Sicherheitslevel im Vergleich zur aktuellen Situation der Zugsicherungstechnik erhöht wird.

In der Auswertung der Bewegungsvektoren liegt eine der wesentlichen Herausforderungen des Verfahrens. Die Bewegungsvektoren dürfen wie erwähnt regulär aufeinander zeigen (z.B. Kuppeln, Nachschieben) bzw. fast aufeinander zeigen (z.B. gegenläufige Züge auf parallelen Gleisspuren). Hier liegt ein bedeutender Unterschied zum TCAS/ADS-B, wo die Flugsicherung grundsätzlich dafür zuständig ist, Flugzeuge 3-dimensional zu staffeln. Die Identifikation der Gleisspuren des Verkehrs in der Umgebung eines Zuges erfolgt in der RCAS-Empfangeinheit im Zug einerseits über die von den jeweiligen RCAS-Sendeinheiten ausgestrahlten präzisen Positionsinformationen per Mapping auf eine Streckenkarte. Diese topologischen Streckenkarten sind in allen ETCS⁷-ausgerüsteten Zügen vorhanden. Andererseits kann die Korrektheit der ermittelten Gleisspuren anhand von Gleisspurkennungen überprüft werden, sofern diese von den jeweiligen RCAS-Sendeinheiten mit übermittelt wurden (siehe auch Abbildung 2).

Neben der Positionsinformation und der aktuellen Geschwindigkeit übermittelt eine RCAS-Sendeinheit auch einen topologischen Streckenvektor (geplanter Streckenverlauf). Im *elektronischen Buchfahrplan mit Verzeichnis der Langsamfahrstellen – EBULA* liegt die gesamte Strecke des Zuges in nicht gesicherter Form vor. Eine „gesicherte“ Aussage liegt zugeseitig für die nächsten 5-30 km vor. Hat eine RCAS-Empfangeinheit eines anderen Zuges ebenfalls Kenntnis über den topologischen Streckenvektor dieses Zuges, so kann aus der Überlagerung beider Vektoren wiederum ein potentieller Konflikt abgeleitet werden. Stimmen gesicherter/geplanter topologischer Streckenverlauf und der per

⁵ Diese Dimension folgt dem Gleisverlauf und ist keine kartesische Koordinate.

⁶ Eine Balise ist ein passiver Transponder, der bei der Überfahrt durch einen Zug angeregt wird und anschließend Nachrichten an den Zug sendet [MzH04]. Man unterscheidet generell zwei Typen: Festdatenbalisen, die einen festen Datensatz übertragen und transparente bzw. schaltbare Balisen, die an eine Signalquelle gekoppelt sind und in Abhängigkeit vom anliegenden Signal verschiedene Datensätze übertragen können. Balisen werden u.a. zur Übermittlung einer Identität zur topologischen Ortsreferenzierung („elektronischer Kilometerstein“) verwendet, können aber auch umfangreichere Nachrichten übermitteln.

⁷ Das neue European Train Control System (ETCS) im European Rail Transport Management System (ERTMS) bildet die technische Grundlage für den interoperablen Bahnbetrieb in Europa.

Map-Matching ermittelter Position der RCAS-Sendeeinheit nicht überein, kann dies bereits als Warnmeldung an andere RCAS-Empfänger übermittelt werden.

RCAS kann auch ohne Unterstützung einer digitalen Karte angewandt werden. In diesem Fall lässt die Verlässlichkeit der Aussage mit dem Abstand und der Geschwindigkeit der beiden Züge deutlich nach. Eine Bestimmung der Querbeschleunigung z. B. durch eine im RCAS integrierte Inertialplattform erlaubt die Abschätzung von Kurvenverläufen. Bei lang gestreckten Kurven oder S-Kurven wird dennoch nur eine Aussage mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit möglich sein. Die Ergänzung einer digitalen Karte erlaubt eine gleisselektive, d.h. nach linken oder rechten Gleis differenzierten, Aussage und damit eine deutlich genauere Erkennung von Kollisionen bzw. Ausschluss von Begegnungsfahrten, die außer bei LÜ Fahrten keine Gefahr darstellen.

Im Folgenden werden einige Merkmale des Verfahrens detaillierter vorgestellt:

Bahnübergänge

Ein erheblicher Anteil an allen Kollisionen sind Zusammenpralle mit Kraftfahrzeugen auf Bahnübergängen ohne Beschränkung oder mit Halbschranken. Ein Merkmal Verfahrens besteht darin, ein System zur Überwachung des Freiraums zu verwenden, das eine irreguläre Belegung des Gefahrenraumes erkennt (per Magnetfeld, Infrarot, Video, Gewicht, etc.) Dieses kann mit einer RCAS-Sendeeinheit gekoppelt werden. Hier ist nicht der Bewegungsvektor die relevante Information, sondern der Status des Bahnübergangs (BÜ), der ebenfalls mit übertragen wird:

- BÜ gesichert und Freiraum frei => Fahrt
- BÜ gesichert und Freiraum durch sich bewegendes Objekt belegt => Warnung
- BÜ gesichert und Freiraum durch stehendes Objekt belegt => Gefahr
- BÜ Status unsicher

In der Anwendung des RCAS kann nun erkannt werden, ob sich ein Straßen-Fahrzeug auf dem Bahnübergang befindet, ob es sich bewegt und den Gefahrenraum verlassen wird und eine entsprechende Warnung oder auch Entwarnung an den Lokführer gesendet werden.

Lademaßüberschreitungen

Ein weiterer Einsatz von RCAS besteht in der technischen Sicherung von Fahrten mit so genannten Lademaßüberschreitungen (LÜ). Man unterscheidet nach [DB408] vier Typen:

A: LÜ ohne Einschränkung auf dem Nachbargleis, Lademaßüberschreitung nach oben.

B: Normale Fahrt oder LÜ-Fahrt A oder B auf dem Nachbargleis möglich. Begegnungsverbot mit LÜ C oder D.

C: Normale Fahrt oder LÜ-Fahrt A auf dem Nachbargleis möglich. Begegnungsverbot mit LÜ B, C oder D.

D: keine Fahrt auf dem Nachbargleis möglich. Sperrung erforderlich.

Ein Zug mit RCAS-Sendeeinheit kann mit den übertragenen Daten ankündigen, dass sich eine LÜ-Fahrt nähert und durch Angabe seines LÜ-Typs einen – u. U. auch regelwidrig gefährdeten – Gegenverkehr warnen.

Güterüberwachung

Es gibt weitere, über die LÜ hinausgehende Gefahren, die von der Ladung von Zügen ausgehen kann. Hierzu zählen z.B. bestimmte chemische Stoffe, die nicht nebeneinander gelagert und/oder transportiert werden dürfen, da sie miteinander reagieren. In [Stroh04] wurde ein System vorgestellt, das solche Situationen mit Hilfe von Shortrange-RF-Controllern und einer regelbasierten Wissensbasis erkennt. RCAS geht einen Schritt weiter und kann Gefahrgutkennungen aus einer Taxonomie mit aussenden. Hierdurch sind andere Züge mit „inkompatiblen“ Gefahrgütern in der Umgebung, aber noch in sicherer Entfernung, über die potentielle Gefährdung informiert und in der Lage, geeignete Maßnahmen zu ergreifen.

Sensoren

Mit RCAS können neben diesen „harten“ Kollisionsgefahren auch „weiche“ Kollisionsgefahren gemeldet werden: Beispielsweise können Überflutungen oder leichte Lawinen erkannt werden und nähernde Züge zu einer Geschwindigkeitsreduzierung aufgefordert werden. Die Erkennung kann durch Sensoren oder manuelle Eingabe des Zugführers vorbei/vorausfahrender Züge erfolgen und an den Verkehr in der Umgebung gemeldet werden. Alternativ kann auch eine RCAS-Sendeeinheit in der Umgebung platziert werden, oder vor mehreren Kollisionsgefahren im Empfangsgebiet einer RCAS-Sendeeinheit von dieser gewarnt werden.

Fahrdienstleitung

Durch Einbeziehung einer Kommunikationsverbindung zum Stellwerk ergeben sich weitere Möglichkeiten, einen erkannten Konflikt aufzulösen: Der Fahrdienstleiter (Fdl) hat im Stellwerk zusätzlich noch die Möglichkeit, durch rechtzeitige Veränderung der Weicheneinstellung auf Seiten der Infrastruktur, z.B. durch Umleiten eines Zuges auf ein „sicheres“ Gleis eine Kollision oder einen Zusammenprall zu verhindern, sofern die Streckentopologie dies zulässt. Diese semi-automatische oder automatische Reaktion auf eine Gefahrensituation, die zugeseitig erkannt wird, stellt eine innovative Ergänzung der bisherigen Sicherung dar.

Übertragungsverfahren

Als Übertragungsverfahren kann eines der gängigen Verfahren mit konkurrierendem Zugriff auf die Ressource „Frequenz“ verwendet werden, z.B. TDMA, CDMA, OFDM oder MC-CDMA [FK03]. Optional kann die Synchronisation des Zugriffs dabei über Galileo erfolgen, indem z.B. die zu verwendenden Zeitslots bei TDMA aus der momentanen geografischen Position der RCAS-Sendeeinheit abgeleitet wird. Alternativ können die Slots auch per Hash-Funktion aus der Zugkennung/RCAS-ID berechnet werden.

Aufgrund der geografischen Disjunkтивität können ggf. die Frequenzen des maritimen AIS für das hier beschriebene Verfahren wieder verwendet werden.

Beispiele für die Anwendung

Für die Eisenbahn ist die Vermeidung von Kollisionen der Züge mit anderen Zügen ebenso wie mit jeglicher anderer Art von Hindernis eines der zentralen Themen der Sicherung. Aus der Vielzahl der möglichen Anwendungsbeispiele werden im Folgenden einige charakteristische vorgestellt.

RCAS zur Vermeidung einer Folge-, Frontal- oder Flankenkollision

Zwei Züge bestimmen per GNSS ihre absolute Position und ihren Bewegungsvektor (Abbildung 2). Diese Information zusammen mit der Information „Zug- oder Rangierfahrt“ wird per Funk übertragen.

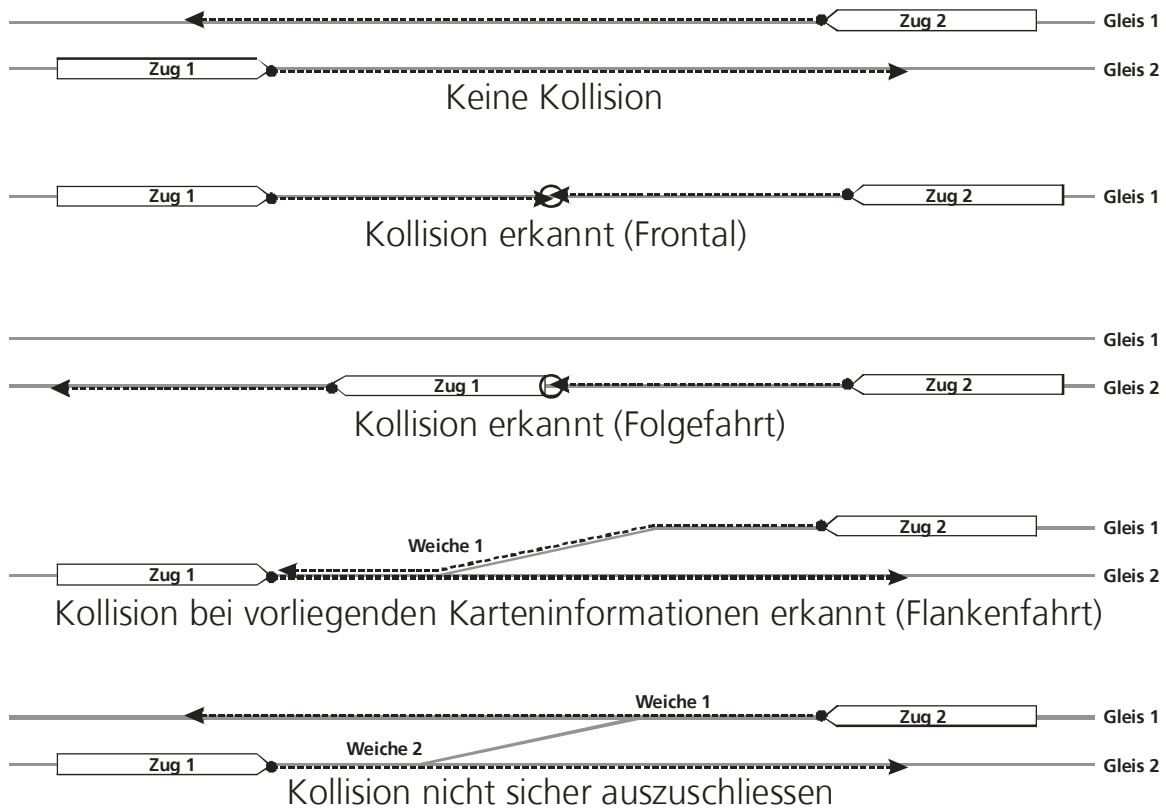


Abbildung 2: Beispiele für von RCAS zu erkennende Zustände.

Der jeweilige Empfänger vergleicht seinen Vektor mit allen empfangenen Vektoren. Sobald im vierdimensionalen Raum (Zeit und drei Raumachsen) eine Kollision erkannt wird, wird in Abhängigkeit von den räumlichen Parametern (Abstand, verbleibende Zeit, Geschwindigkeit, etc.) eine Reaktion ausgelöst, die von Warnung bis zu Zwangsbremmung reichen kann.

RCAS zur Sicherung von LÜ-Fahrten

Neben der Position des Zuges und seines Bewegungsvektors wird zusätzlich dessen LÜ-Typ übertragen. Damit können Züge, die sich auf dem Nachbargleis nähern ebenfalls Bremsungen auslösen um die Folgen einer Kollision zu reduzieren.

RCAS zur Sicherung von Bahnübergängen

RCAS-ausgerüstete Bahnübergänge übertragen ihren Sicherungszustand (schließend, geschlossen, unklar) und den Status des Freiraums (frei, bewegendes Objekt, stehendes Objekt, ggfs. Größe) an die sich nähernden Züge. Selbst bei sehr später Belegung des Freiraums durch ein Fahrzeug kann noch eine Bremsung zur Unfallfolgenreduktion ausgelöst werden. Die durch die RCAS-Empfangseinheit im Zug automatisch ausgelöste Bremsung ist dabei auf jeden Fall schneller effektiv als eine ggf. manuell durch den Zugführer ausgelöste Bremsung.

RCAS zur Warnung vor Überflutung oder einer überfahrbaren Lawine

„Weiche“ Hindernisse auf der Strecke, wie z. B. wenige cm Schnee oder Wasser können an Stellen, die für solche Störungen bekannt sind, mit geeigneten Sensoren erkannt und durch einen RCAS-Sender übertragen werden. Dieser übermittelt ein Hindernis mit den Eigenschaften „weich“, Position, Ausdehnung und ggfs. einer Geschwindigkeitsbegrenzung an die sich nähernden Züge.

RCAS zur Sicherung von Baustellen

Auch Baustellen können mit RCAS gesichert werden. Hier kann, vergleichbar einer Kombination von LÜ-Fahrten und weichen Hindernissen eine Warnung für das Nachbargleis mit einer Geschwindigkeitsreduktion ausgegeben werden. Das Baugleis selber kann als „hartes“ Hindernis übertragen werden. Beide Funktionen können von einem RCAS-Sender übernommen werden, d.h. ein RCAS-Sender kann für verschiedene Ereignisse zuständig sein und darüber mittels unterschiedlicher Telegramme informieren. In der Gegenrichtung kann an den Bautrupp eine Warnung ausgegeben werden, wenn ein Zug sich nähert.

Realisierungsansatz

Die RCAS-Sendeeinheiten strahlen in periodischen oder unregelmäßigen Abständen Telegramme über den Zustand der mit ihnen gekoppelten, bewegten (z.B. Zug) oder statischen (z.B. Gleissperrung durch Bautrupp) Plattform. In Abbildung 3 ist die Datenstruktur solcher Telegramme dargestellt.

Feld	Bedeutung	Mögliche Werte
RCAS-ID	Eindeutiger Bezeichner der Quelle, z.B. für den Zug	Zugnummer Bahnsteig-ID
Timestamp	Zeitstempel	
Fahrt-Typ	Grund der Fahrt bzw. Meldung	Zugfahrt Rangierfahrt LÜ-Fahrt Baufahrt Bahnübergang Baustelle temporäres Hindernis permanentes Hindernis
Referenzpunkt im Zug	Position der RCAS-Einheit im Zug	Head Tail
LÜ-Typ	Art der Lademaßüberschreitung	Keine, A, B, C, D
BÜ-Status	Ergebnis der Freiraumüberwachung	gesichert, frei gesichert, temporär belegt gesichert, statisch belegt ungesichert unbekannt
Zuglänge	Gesamtlänge des Zuges	
Streckenposition	Gleis- und Blockkennung	
Streckenvektor	Liste nächster Gleis- und Blockkennungen	
Geogr. Position	WGS84 Positionsinformation	Lat, Lon, Alt
Geschwindigkeit	Eigengeschwindigkeit	in km/h
Gefahrgut	Gefahrgutkennungen aus einer Taxonomie	

Abbildung 3: Beispielhafte Datenstruktur des RCAS-Telegramms

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde das infrastrukturunabhängige Verfahren „RCAS“ zur Kollisionsvermeidung von Zügen vorgestellt. Kernbestandteil ist die Positions-, Richtungs- und Geschwindigkeitsbestimmung per Satellitenortung mit GALILEO und Abstrahlung dieser und weiterer Informationen per regionaler Broadcast-Funkübertragung.

Die Bearbeitung des Themas ist derzeit noch in einer recht frühen Phase. Eine Arbeitsgruppe bestehend aus DLR und externen Partnern wird weitere Details des Systems definieren und mit den entsprechenden Gremien aus Industrie und Politik koordinieren. Darüber hinaus ist geplant, die Funktionsfähigkeit des Systems prototypisch zu demonstrieren.

Referenzen

- [ADS-B] Federal Aviation Administration (FAA): *About ADS-B*. <http://adsb.tc.faa.gov/ADS-B.htm>
- [Bay05] Bayern Heute: *Zugunglück in München: Staatsanwalt ermittelt gegen Lokführer*. 2005. <http://www.br-online.de/bayern-heute/artikel/0405/s-bahn/index.xml>
- [DB408] Deutsche Bahn AG: *Konzernrichtlinie 408: Züge fahren und rangieren* (Fahrdienstvorschrift).
- [FK03] K. Fazel and S. Kaiser: *Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems*, John Wiley & Sons, ISBN 0-470-84899-5, September 2003
- [Free05] Freenet Lexikon: *Katastrophen im Schienenverkehr*. 2005. http://lexikon.freenet.de/Katastrophen_im_Schienenverkehr
- [Gisz05] Giszczak, A., Lenz, B., Meyer zu Hoerste, M., Noack, T., Schäfer, H.-P., Schlingelhof, M., Strang, T., Zukunft, D.: *Exposé - GALILEO im Verkehr*. Technical Report, May 2005
- [Mak] Mak Data System: *Die Technik zum Automatic Identification System (AIS)*. http://www.makdata.de/www/de/business_units/solutions/all_solutions/solutions21.html
- [MzH04] Meyer zu Hörste, M.: *Methodische Analyse und generische Modellierung von Einbahnleit- und -sicherungssystemen*. Dissertation, Fortschrittsbericht VDI Reihe 12 Nr. 571, 2004, ISBN 3-18-357112-9
- [Stroh04] Strohbach, M., Gellersen, H.-W., Kortuem, G., Kray, C.: *Cooperative Artefacts: Assessing Real World Situations with Embedded Technology*. UbiComp 2004, LNCS 3205, pp. 250-267, 2004.
- [USCG] USCG Navigation Center: *Automatic Identification System Overview*. <http://www.navcen.uscg.gov/enav/ais/default.htm>

Flächiges Verkehrsmonitoring mit digitalen Luftbildern

Peter Reinartz⁽¹⁾, Hartmut Runge⁽¹⁾, Thomas Linder⁽²⁾, Frank Frischeisen⁽²⁾

⁽¹⁾ DLR e.V., Institut für Methodik der Fernerkundung

⁽²⁾ Autobahndirektion Südbayern

Eine neue Methode des Verkehrsmonitoring besteht in der Aufnahme und Auswertung einer Reihe von großflächigen photographischen Senkrecht- oder Schrägaufnahmen aus dem Flugzeug, Luftschiff, Ballon oder von Türmen. Die Frequenz der Einzelbilder sollte dabei mindestens bei 1/3 Hz, besser in der Größenordnung 2 bis 5 Hz liegen. Da sich die fahrenden Fahrzeuge in den Einzelbildern an unterschiedlichen Positionen befinden, kann aus der automatischen Fahrzeugverfolgung die momentane Geschwindigkeit sowie die Beschleunigung (aus mindesten 3 Bildern) jedes individuellen Fahrzeugs abgeleitet werden. Hieraus lässt sich die momentane Verkehrsdynamik für den aufgezeichneten Bereich sehr detailliert über ein größeres Gebiet flächendeckend erfassen. Mittels einer Bildserie ist es möglich, das gesamte Verkehrsgeschehen für den Bereich aufzunehmen um z.B. Überholvorgänge, Verhalten an Ein- und Ausfahrten, Staubildung etc. dynamisch zu analysieren. Diese Ergebnisse sind beispielsweise als Referenz zur Verkehrsmodellierung und für Verkehrsbeeinflussungsanlagen von Bedeutung. Es können lokale Verkehrsanomalien genauer erfasst und analysiert sowie Maßnahmen vorgeschlagen werden. Besonders für die Verifikation der aus den TerraSAR-X Daten abgeleiteten Fahrzeuggeschwindigkeiten ist eine Unterfliegung mit optischen Kameras zumal in der Anfangsphase unabdingbar.

Motivation und Anwendungsmöglichkeiten

Bisherige Methoden der automatischen Verkehrsdatenerfassung können an vorab zu definierenden Stellen im Straßennetz im Wesentlichen Informationen über die Verkehrsmenge, die Verteilung des Verkehrs auf Fahrzeugklassen sowie durchschnittliche Geschwindigkeiten je Fahrzeugklasse erfassen. Diese Informationen werden jeweils als minütliche Datensätze erfasst und archiviert. Die notwendige Stromversorgung der Datenerfassungsgeräte schränkt die Auswahl der Standorte erheblich ein. Auch aus wirtschaftlichen Gründen ist es nicht möglich, an allen wünschenswerten Standorten konventionelle Datenerfassungsgeräte aufzubauen. Vorteile dieser Art der Datenerfassung sind, dass die Datenerfassung ständig durchgeführt wird, hoch automatisiert ist und, abgesehen von den Investitionskosten, kaum weitere Kosten entstehen.

Nicht möglich ist es mit bisherigen punktuellen Methoden jedoch, linien- oder flächenhafte Informationen über das Verkehrsgeschehen zu erhalten. Im Regelfall sind konventionelle Messquerschnitte im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen etwa 1,5 bis 2 km voneinander entfernt. Durch den, im wissenschaftlichen Sinn, chaotischen Charakter des Verkehrsgeschehens auf Autobahnen sind die Möglichkeiten, Aussagen über die Verkehrsdynamik zwischen diesen Messstellen zu treffen, sehr beschränkt.

Weitere wichtige Kenngrößen des Verkehrsgeschehens können mit Induktionsschleifen oder Überkopfdetektoren, wie sie derzeit in Messquerschnitten verwendet werden, ebenfalls nicht erfasst werden. Exemplarisch hierfür genannt seien z.B. die Beschleunigung von Fahrzeugen und die Anzahl der Spurwechselvorgänge.

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, sowie durch den Zeitverzug, der durch die Auswertung der digitalen Luftbilder entsteht, ist es derzeit sicherlich nicht möglich, die herkömmlichen Methoden der Datenerfassung zu ersetzen. In vielen Anwendungsbereichen können digitale Luftbilder jedoch schon heute eine interessante Ergänzung darstellen.

In der Vergangenheit musste erkannt werden, dass die herkömmliche Datenerfassung durch zahlreiche Ursachen fehlerbehaftet ist. Plausibilitätschecks ermöglichen zwar die Identifikation auffälliger Messquerschnitte mittels Abgleich der Verkehrsmengen zwischen mehreren hintereinander

liegenden Messquerschnitten, systematische Fehler aller Messquerschnitte sowie fehlerhafte Geschwindigkeitswerte können jedoch nicht erkannt werden. Der Abgleich der Daten konventioneller Datenerfassungsgeräte mit aus digitalen Luftbildern gewonnenen Daten ermöglicht den Vergleich vollkommen unabhängig voneinander erfassten Messdaten und somit eine umfassende Qualitätssicherung.

Einmalige Veranstaltungen, wie z.B. Weltmeisterschaften oder Kirchentage bringen meist enormen Verkehr mit sich, gleichzeitig sind diese Veranstaltungen eine gute Gelegenheit, bei einem großen Publikum positiv in Erinnerung zu bleiben. Ein gutes Verkehrsmanagement ist daher regelmäßig gefragt. Verkehrsmonitoring mit digitalen Luftbildern bieten hier die Möglichkeit, wirtschaftlich kurzzeitige Verkehrsdatenerfassung zu realisieren, ohne in Infrastruktur für die Datenerfassung investieren zu müssen. Gewünschte Daten sind hierbei meistens die Befüllung von Parkflächen sowie das rasche Erkennen von Staus und Unfällen.

Auch das permanente Monitoring kritischer Bereiche ist, z.B. mittels einer an einem hohen Gebäude befestigten Kamera, realisierbar. Anwendungsfälle hierfür sind z.B. das Erkennen eines Rückstaus aus einer Anschlussstelle auf die Autobahn mit einer Ausbreitung des Staus auf die Überholfahrstreifen, sowie die Überwachung von Autobahnkreuzen mit spurwechselbedingter Staubildung.

Die Anwendungsbereiche müssen jedoch nicht auf das Verkehrsmanagement beschränkt bleiben. Vorstellbar ist die Untersuchung von Streckenabschnitten, Anschlussstellen und Autobahnkreuzen mit häufiger Staubildung zur Erkennung der genauen Stauursache. Hieraus sollen dann Empfehlungen für den effektiven Aus- und Umbau dieser Bereiche abgeleitet werden.

Einführung

Von einem Flugzeug aus sind großflächige Aufnahmen eines Gebietes mit einer Zeitdifferenz von weniger als einer Sekunde möglich. Damit können verkehrsrelevante Parameter wie Einzel- und Gruppengeschwindigkeiten von Fahrzeugen, Beschleunigungen sowie Fahrzeugtyp, Abstand und Dichte abgeleitet werden. Weiterhin ist es möglich, Überholverhalten, Spurwechsel, Einordnen bei Fahrbahnverengungen sowie die Entwicklung von Verkehrsstaus bei einer längeren Bildserie umfassend zu analysieren.

Die Nutzung optischer Daten für die Fahrzeugdetektion vom Flugzeug aus wurde sowohl im sichtbaren Bereich (Stilla et al. 2004, Toth et al. 2004) als auch im thermalen Infrarotbereich (Ernst et al. 2003, Hinz 2004) in mehreren Studien und mit verschiedenen Ansätzen untersucht. Es gibt bisher jedoch wenige Untersuchungen von optischen Seriendaten, die den Einsatz für eine größere Fläche – mehrere Straßen gleichzeitig (Mirchandani et al. 2002, Pötzsch 2005, Reinartz et al. 2005) beinhaltet. Mit Luftbildkameras und einem großen Gesichtsfeld ist es möglich den Verkehr über einen verlängerten Zeitraum auch aus dem Flugzeug, evt. auch wiederholt aufzunehmen. Die Frequenzen aufeinander folgender Bilder liegen dabei zwischen 1/3 Hz für analoge Kameras und 3-5 Hz für Digitalkameras. Beide Kamerasysteme sollen hier untersucht werden. Die gewonnenen Daten enthalten relevante Informationen für die Integration in Verkehrsmodelle und für das Verkehrsmanagement wenn sie z.B. mit GIS Systemen oder mit Straßendatenbanken verwendet werden (Ernst et al. 2005).

In dieser Arbeit soll gezeigt werden wie genau die abgeleiteten Verkehrsdaten sind, mit welchen herkömmlichen Erfassungsmethoden sie verglichen werden können und welchen Fahrzeuganteil ein automatisches Verfahren im Gegensatz zu einer verfahrenstechnisch vereinfachten manuellen Auswertung erfassen kann.

Datenmaterial

Zwei Arten von optischen Daten, welche aus dem Flugzeug aufgezeichnet wurden, standen für die Untersuchungen zur Verfügung: Analoge Daten die mit einem Abstand von ca. 3 Sek. aufgezeichnet wurden und Bilder einer kommerziellen Digitalkamera, welche ca. 3 Bilder pro Sekunde aufnimmt.

schließlich eine Rektifizierung auf ein digitales Orthobild durchgeführt, dessen Absolutgenauigkeit mit 1-2 m angegeben ist. Die Genauigkeit der Rektifizierung wurde mit Passpunkten überprüft und ist in Tabelle 1 angegeben. Das Ergebnis entspricht der absoluten Genauigkeit des Orthobildes.

Autobahn A99	σ_0 in X-Richtung [m]	σ_0 in Y-Richtung [m]
Teil_1, 12 Bilder	1.15	1.63
Teil_2, 12 Bilder	1.30	1.25
Teil_3, 12 Bilder	1.05	0.72

Tabelle 1: Standardabweichung für die Residuen an den Passpunkten für Bildsequenzen von je 12 Bildern

Die Bilder der Digitalkamera wurden mit den gleichen Verfahren digital geometrisch zugeordnet. Da es sich bei diesen Untersuchungen nicht um absolute Geschwindigkeitsbestimmungen handelt sondern um das Automatisierungspotential, wurde hier keine Rektifizierung auf Orthobilder durchgeführt.

Geschwindigkeitsbestimmung und -vergleich

Nach der Rektifizierung können die Positionen der Fahrzeuge in den Einzelbildern gemessen werden. Da eine automatische Fahrzeugverfolgung in Bildsequenzen mit ca. 2,9 sec Abstand sehr problematisch ist – ein Fahrzeug mit 100km/h bewegt sich in dieser Zeit etwa 80 m weiter und dichter Verkehr bedeutet einen Fahrzeugabstand von ca. 1 – 2 sec - wurde diese Auswertung mit manuellen Verfahren durchgeführt. Diese Methode ermöglicht eine nahezu hundertprozentige Erfassungsgenauigkeit, solange jedes Fahrzeug im Bild zu sehen ist (keine Abschattung durch Bäume oder Häuser). Auch für eine spätere Überprüfung der automatischen Verfahren ist dieses manuelle Verfahren von Bedeutung, da eine quantitative Überprüfung möglich wird. Das manuelle Messen wurde durch eine automatische Komponente ergänzt: Zunächst werden im ersten Bildpaar alle bewegten Fahrzeuge markiert, hieraus lässt sich die Geschwindigkeit jedes einzelnen Fahrzeugs bestimmen. Diese Geschwindigkeit wird nun einfach zunächst extrapoliert, so dass das Programm einen Vorschlag für die Positionen der Fahrzeuge im dritten Bild vorausberechnet. Zu der genauen Fahrzeugverfolgung müssen diese Werte meist nur gering verändert werden. Diese Methode ermöglicht die Erfassung und Verfolgung von vielen Einzelfahrzeugen in relativ kurzer Zeit. Abb. 2 zeigt das entwickelte Visualisierungstool.

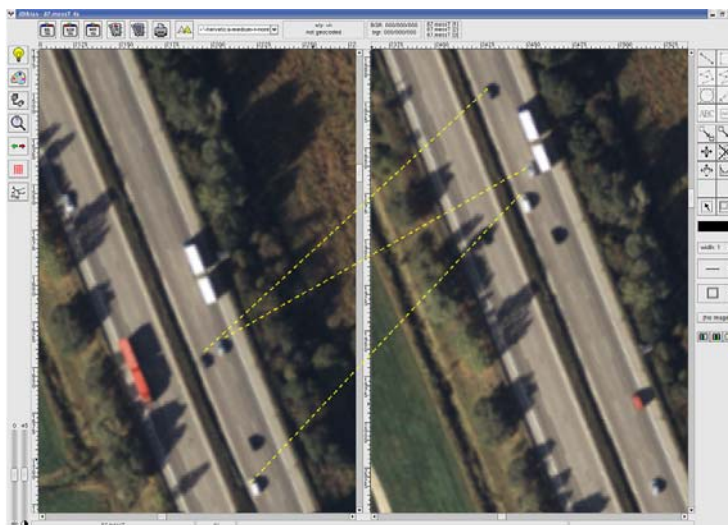


Abbildung 2: XDibias Visualisierungstool zur Fahrzeugverfolgung und Bestimmung der Geschwindigkeiten

Ein sehr empfindlicher Parameter bei der Bestimmung von Fahrzeuggeschwindigkeiten aus Luftbildern ist die Zeit zwischen den Bildaufnahmen. Eine Messungsgenauigkeit von nur 0.1 sec bedeutet einen potentiellen Messfehler von 3 m bei einer Geschwindigkeit von 30 m/sec. Da die Genauigkeit der Zeitmessung in dieser Größenordnung liegt ist hier mit einem Messfehler von 3 m in den ca. 2.9 sec zu rechnen, was in etwa einer Bestimmungsgenauigkeit für die Geschwindigkeit von 3km/h entspricht.

Außerdem ist die Schätzung der Geschwindigkeit abhängig von der lokalen geometrischen Genauigkeit der Bilder, welche in der Größenordnung von 1 – 2 m liegt und natürlich in der möglichen Geschwindigkeitsänderung der Fahrzeuge zwischen den beiden Bildaufnahmezeitpunkten.

In der Tabelle 2 sind die Geschwindigkeiten aus diesem Verfahren mit den aus DGPS Messungen abgeleiteten verglichen. Für zwei Fahrzeuge ist die Geschwindigkeit für je 2 Bildpaare bestimmt und verglichen: die maximale Differenz liegt bei 4 km/h, wobei ein sehr systematischer Zusammenhang für beide Autos zu erkennen ist, was dafür spricht, dass die Schätzungen aus den Bilddaten durch eine ungenaue Zeitangabe erfolgt ist. Bei der mittleren Geschwindigkeit über den Zeitraum von 4 Bildaufnahmen, ergeben sich nur sehr geringe Abweichungen in den Geschwindigkeiten.

	Geschwindigk. aus DGPS (km/h)	Geschwindigk. aus Bildern (km/h)	Differenz (km/h)
Fahrzeug 1			
Bilder 2/3	88.3	92.3	4.0
Bilder 3/4	87.7	89.0	1.3
Bilder 4/5	86.2	82.3	-3.9
Bilder 5/6	85.1	87.7	2.6
Bilder 2-6 (mittlere Geschwindigkeit)	86.9	87.6	0.7
Fahrzeug 2			
Bilder 2/3	86.0	90.0	4.0
Bilder 3/4	87.6	87.9	0.3
Bilder 4/5	88.6	85.0	-3.6
Bilder 5/6	87.8	90.4	2.6
Bilder 2-6 (mittlere Geschwindigkeit)	87.3	88.1	0.8

Tabelle 2: Vergleich der Geschwindigkeiten abgeleitet aus DGPS and Luftbildern

Der zweite Vergleich betrifft Radar-Überkopfdetektoren: von 4 verschiedenen Schilderbrücken wurden von der Autobahndirektion Südbayern die Daten von Einzelfahrzeugen zum jeweiligen Zeitpunkt zur Verfügung gestellt. Bei jeder Schilderbrücke misst je ein Detektor für jede Spur die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge. Die Genauigkeit der Messung ist dabei mit ca. 3km/h angegeben, liegt daher in etwa gleich mit der Schätzung aus den Luftbildsequenzen. Um die Datensätze zu vergleichen ist eine genaue visuelle Interpretation nötig, da die Daten nur mit einer Genauigkeit von einer Sekunde vorliegen und sich die Fahrzeugposition zum Zeitpunkt der Messung ca. im Abstand von 20 m vor der Schilderbrücke befindet. In Abbildung 3 ist eine Bildfolge dargestellt, die gleichzeitig die Veränderung der Fahrzeugpositionen aufzeigt, auch Überholmanöver sind zu sehen.

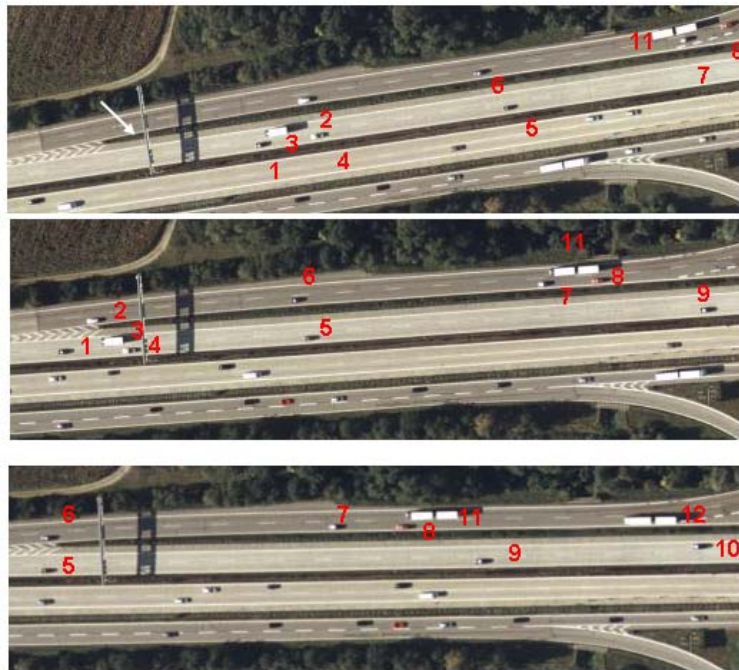


Abbildung 3: Drei aufeinanderfolgende Bilder mit Schilderbrücke und mehreren Überholvorgängen

Das Ergebnis des Vergleichs ist in den Tabellen 3a und 3b zu erkennen. Es ist sehr heterogen: während in Tabelle 3a die Abweichungen noch innerhalb der Messgenauigkeit beider Methoden liegen, sind in Tabelle 3b größere Differenzen, speziell für zwei Sensoren zu erkennen. Dieses Verhalten ist zunächst nicht einfach zu erklären. Eine Vermutung ist, dass die Radarsensoren zwar im Labor kalibriert wurden, aber bei der Installation nicht korrekt justiert wurden – oder sich verstellt haben, sodass prinzipiell geringere Geschwindigkeiten gemessen werden. Eine geringe Änderung im Anstellwinkel führt zu hohen Veränderungen der Messung. Die Standardabweichungen sind in allen Fällen höher als erwartet und deuten auf eine hohe Streuung der Werte vor allem bei den Radarsensoren hin.

Sensor	Mittlere Abweichung [km/h]	σ_0 [km/h]
Spur 1	4.4	7.6
Spur 2	5.5	7.8
Spur 3	3.4	5.8
Mittel (3 Spuren)	3.9	6.8

Tabelle 3a: Vergleich der Geschwindigkeiten von Radarsensoren und aus optischen Serienbildern (Schilderbrücke: AQ 92/610)

Sensor	Mittlere Abweichung [km/h]	σ_0 [km/h]
Spur 1	2.5	4.7
Spur 2	11.7	8.2
Spur 3	12.7	8.3
Mittel (3 Spuren)	9.4	7.3

Tabelle 3b: Vergleich der Geschwindigkeiten von Radarsensoren und aus optischen Serienbildern (Schilderbrücke: AQ 9/370)

Die gemessenen Beschleunigungen innerhalb von je 3 Bildern zeigen typische Werte von zunehmender oder abnehmender Geschwindigkeit auf Autobahnen. Bei „normalem“ Verkehr liegen die Werte meist im Bereich $\pm 0.5 \text{ m/s}^2$; nur in einigen Fällen wie beginnende Überholmanöver ergeben sich Werte von 3 m/s^2 oder sogar darüber.

Integration in eine Straßendatenbank

Um die abgeleiteten Verkehrsdaten für eine weitere Verwendung zu speichern, müssen sie in einer Datenbank abgelegt werden. Diese Zuordnung sollte möglichst automatisch erfolgen. Da die gemessenen Fahrzeuge in einem Koordinatensystem referenziert sind, ist eine Zuordnung zu Straßendatenbanken wie Navteq oder Teleatlas leicht möglich. Die Straßen sind in diesen Datenbanken als Polygone (stückweise lineare Strukturen) abgelegt. So kann eine Zuordnung durch nächste Nachbarschaft zu einer der linearen Stücke festgelegt werden. Die Auswertungen zeigen, dass im Falle von Autobahnen oder anderen wichtigen Verbindungsstraßen hochgenaue Koordinatenwerte in den Datenbanken vorliegen, so dass eine Zuordnung unproblematisch ist. Nur bei kleineren Nebenstraßen und manchmal in Städten sind größere Abweichungen festzustellen, was eine Zuordnung erschwert. Der mittlere Abstand der Fahrzeuge im Falle einer zweispurigen Autobahn lag bei 2 m, was ungefähr einer halben Spurbreite entspricht. Nur an Straßenkreuzungen oder bei Brücken ist die direkte Zuordnung erschwert, kann jedoch unter Einbeziehung der Fahrtrichtung des Fahrzeugs meist korrekt berechnet werden.

Nach der Zuordnung können Verkehrsparameter wie Verkehrsdichte und mittlere Geschwindigkeit pro Streckenabschnitt leicht bestimmt werden. Auf diese Weise entsteht eine Verkehrsdatenbank für das überflogene Gebiet welches für weitere Berechnungen, wie z.B. Anfangsbedingung für Simulationen, genutzt werden kann.

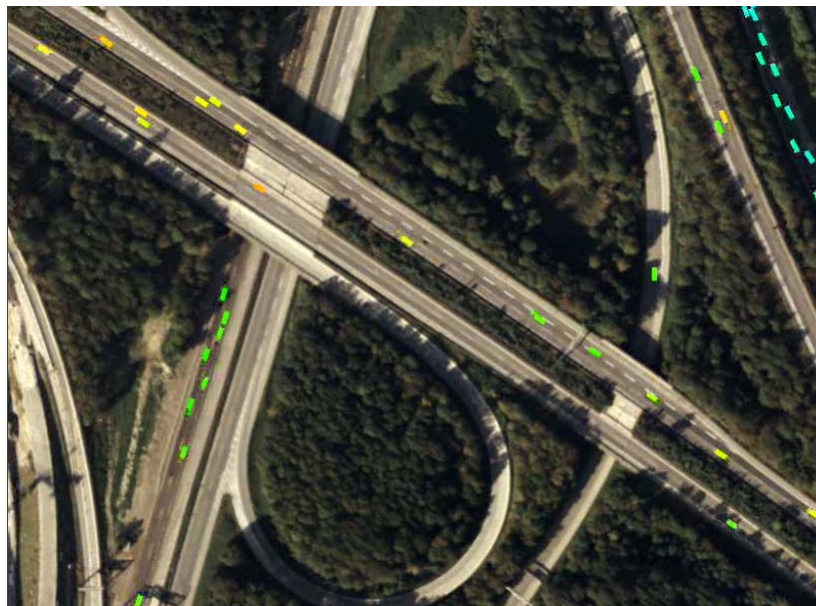


Abbildung 4: Ausschnitt einer Animation des tatsächlichen Verkehrsflusses: Fahrzeuge am Autobahnkreuz München-Nord: blau=langsame Fahrzeuge, grün= Fahrzeuge im mittleren Geschw.-Bereich, orange-rot=schnelle Fahrzeuge

Der Verkehrsfluss kann mittels einer Interpolation der Fahrzeugpositionen zwischen den Bildpaaren und durch eine Farbcodierung der bewegten Objekte visualisiert werden. Auf diese Weise werden Animationen des tatsächlichen Straßenverkehrs dargestellt und das sowohl mit realem Bildhintergrund (siehe Abb. 4) oder mit einem Hintergrundbild welches nur die Vektoren aus der Straßendatenbank enthält.

Automatische Fahrzeufferfassung

Ein Ziel bei der Nutzung dieser Art von Serienbildern ist die automatische Erfassung der bewegten Objekte. Zu diesem Zweck werden mehrere Verfahren entwickelt, welche es ermöglichen sollen sowohl eine automatische Erfassung von bewegten Objekten, als auch die Verfolgung von Einzelfahrzeugen und damit die Ableitung ihrer Geschwindigkeiten zu gewährleisten. An dieser Stelle seien erste Ergebnisse zu den entwickelten Algorithmen dargestellt.

Zunächst wurde eine Bildserie welche mit einer kommerziellen Digitalkamera Bilder in einem Abstand von 0,5 sec vom Münchner Olympiaturm aufzeichnete untersucht. Die Bilder zeigen einen Teil des nördlichen „Mittleren Rings“, sowie eine Fußgängerbrücke im Olympiapark (siehe Abb. 5).



Abbildung 5: Erstes Bild der Bildserie (Digitalkamera) als Grauwertbild

Als erstes werden die Bilder wie weiter oben erwähnt mit Sub-Pixel Genauigkeit aufeinander entzerrt. Dies ist notwendig da auf Grund der manuellen Handhabung der Kamera kleine Schwankungen im Bildausschnitt auftreten. Aus den hieraus erhaltenen Bildern (hier eine Serie von 11 Aufnahmen) wird ein Median-Bild errechnet welches für jedes Pixel denjenigen Grauwert einsetzt, welcher bei einer aufsteigenden Anordnung der Grauwerte aus den 11 Bildern in der Mitte liegt. Dies führt dazu, dass ein Hintergrundbild entsteht (siehe Abb. 6) welches keine bewegten Objekte enthält, denn der Medianwert liefert (bei Verwendung von vielen Bildern) immer einen Wert der festen Oberfläche.



Abbildung 6: Median Bild errechnet aus der Bildserie – keine Fahrzeuge auf dem Mittleren Ring

Für jedes Bild wird nun das Differenzbild (Absolutwerte) zu diesem Median-Bild berechnet (siehe Abb. 7). Da zwischen den Einzelbildern Grauwertschwankungen auftreten ist dieses Differenzbild zwar an den Stellen bewegter Objekte deutlich heller, es treten aber auch an anderen Stellen von Null verschiedene Werte auf. Um Fehlzuordnungen zu vermeiden wird daher der Grauwertbereich der die 20% niedrigsten Werte enthält ausgeschlossen (Rausch-Unterdrückung). In Abbildung 7 wird deutlich dass bei den bewegten Objekten sowohl Fahrzeuge als auch viele Fußgänger erfasst werden, dies war zwar nicht geplant, ergibt sich jedoch aus dem verwendeten Verfahren.



Abbildung 7: Differenz eines Bildes zum Median Bild, oben: Fahrzeuge auf dem Mittleren Ring, unten Fußgänger

Zur Detektion von Einzelobjekten wird nun ein Laplace-Operator verwendet welcher die Grenzen der Objekte erfasst. Nach Auffüllen dieser „Umrandungen“ mit festen Werten erhält man Objekte in einer bestimmten Form für jedes Einzelbild. Nach Festlegung der minimalen und maximalen erlaubten Größe (hier: 50 bis 800 Pixel) erhält man eine Auswahl von kompakten Objekten. Der letzte Schritt ist nun die korrekte Zuordnung der einzelnen Objekte aus den Bildern. Dazu wird zunächst jedes Objekt in einem Bild mit Objekten in einer bestimmten Umgebung in den vorausgehenden und nachfolgenden Bildern verglichen (abhängig von den möglichen Geschwindigkeiten). Die höchsten Korrelationswerte werden als Treffer gewertet. An Hand der paarweise extrahierten Treffer werden Geschwindigkeitsvektoren für Einzelobjekte errechnet. Beispielhaft sind diese in Abbildung 8 dargestellt.



Abbildung 8: Automatisch bestimmte korrelierte Fahrzeuge und Geschwindigkeiten als Vektoren

In Abbildung 9 sind drei korrekte Zuordnungen dargestellt, sogar einzelne Fußgänger werden, auch auf Grund ihres Schattens erfasst und ihre Geschwindigkeit kann bestimmt werden. Schwierigkeiten gibt es wenn die Objekte zu nah beieinander sind und auch ihre Form sehr ähnlich ist. Daher gibt es bei diesem Verfahren neben ungenügender Erfassung auch Falschzuordnungsmöglichkeiten. Das Ergebnis für diese einfache Methode ist wie folgt: ohne eine einzige Falschzuordnung werden nur 27% der Fahrzeuge erkannt, während bei einer Trefferquote von 80% zusätzlich 20% falsche Zuordnungen vorliegen. Aus diesem Grund wurde das Verfahren verbessert.

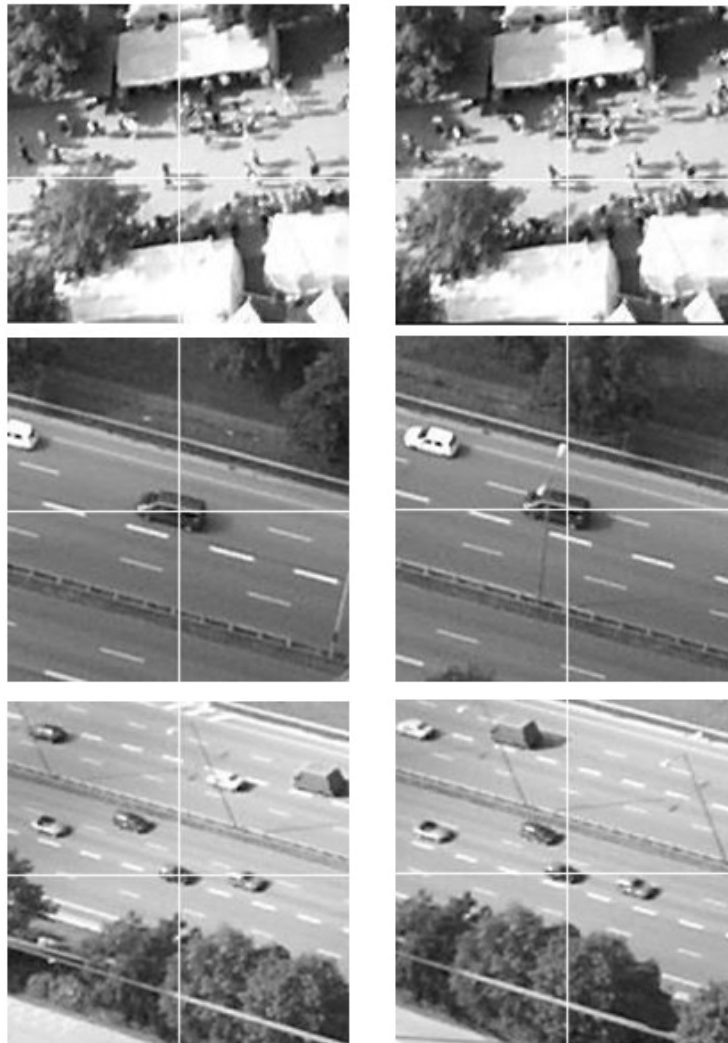


Abbildung 9: Drei gut korrelierte Objekte in einer Bildfolge

Die Verbesserungen bestehen einerseits in der Nutzung der spektralen Information aus den drei Farbkomponenten der Bilder. Dies verbessert die Zuordnung der einzelnen Objekte auch nach ihrem jeweiligen Farbanteil. Die zweite Verbesserung besteht in der Einbeziehung der Straßendatenbank. Da auf Grund der Zuordnung zu einem Vektordatensatz bekannt ist in welche Richtung sich die Fahrzeuge bewegen, kann der Suchbereich für die Verfolgung deutlich eingeschränkt werden. Mit Hilfe dieser Verbesserung wurde die Trefferquote deutlich verbessert. Abbildung 10 zeigt einen Ausschnitt der Fahrzeugdetektion für die gleichen Aufnahmen vom Olympiaturm: 96% der Fahrzeuge wurden erfasst wobei 8% falsch zugeordnet wurden. Der Vergleich der manuell gemessenen Geschwindigkeiten mit den automatisch errechneten zeigt, dass bei den korrekt zugeordneten Fahrzeugen nur ein Unterschied im Bereich 1-2% besteht, selbst wenn die falsch zugeordneten mit berücksichtigt werden ist die Standardabweichung weniger als 4%, sodass man trotzdem auf relativ zuverlässige mittlere Geschwindigkeiten kommt.

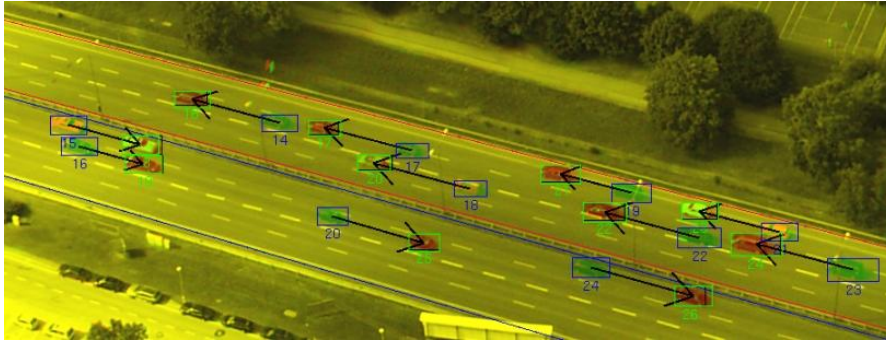


Abbildung 10: Automatisch bestimmte korrelierte Fahrzeuge mit dem verbesserten Verfahren

Das neue Verfahren wurde auch auf weitere digitale Serien-Bilddaten, diesmal aufgezeichnet vom Flugzeug aus, angewendet. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den im vorigen Absatz gefundenen: bei einer Bild-Frequenz von 3 Hz wurden 8 % der Fahrzeuge nicht gefunden, und 8% der gefundenen wurden nicht oder falsch zugeordnet. Der Geschwindigkeitsfehler im Gegensatz zu manuell gemessenen Geschwindigkeiten lag im Mittel bei 4%. Beim automatischen Verfahren wurden im Durchschnitt höhere Geschwindigkeiten vermessen, der Grund hierfür wird zurzeit untersucht.

Zusammenfassung

Die dargestellten Untersuchungen zeigen die Möglichkeiten auf, genaue Verkehrsdaten aus optischen Bildserien, aufgenommen von Flugzeugen oder anderen hohen Plattformen, abzuleiten. Mit einem einfach zu bedienenden Visualisierungstool können praktisch 100% der Fahrzeuge extrahiert werden, mit einer Genauigkeit von ca. 3 km/h. Diese Daten können zur Verifikation der Werte konventioneller Datenerfassungsgeräte verwendet werden oder zur Analyse der Staudynamik sowie als Input für Verkehrsmodelle und Simulationen.

Bei der automatischen Fahrzeugerkennung ist keine 100%ige Detektion zu erreichen. Unter Verwendung von einschränkenden Annahmen wie Fahrtrichtung etc. und die Kenntnis der Straßenmitte ist es jedoch möglich bis zu 90% aller Fahrzeuge zu erfassen wenn keine Abschattungen vorliegen. Es ist jedoch eine Bildfrequenz von ca. 3 Hz notwendig. In jedem Fall ist eine exakte geometrische Co-Registrierung eine Voraussetzung für die Anwendung der Algorithmen. In weiteren Untersuchungen sollen gleichzeitig größere Straßennetze ausgewertet werden um den Vorteil der Großflächigkeit der Bilder zu demonstrieren.

Referenzen

- Ernst, I.; Sujew, S.; Thiessenhusen, K.-U.; Hetscher, M.; Raßmann, S.; Ruhé, M., 2003. LUMOS - Airborne Traffic Monitoring System, In: IEEE 6th International Conference On Intelligent Transportation Systems, 12-15 October 2003, Shanghai, China
- Ernst, I.; Hetscher, M.; Lehmann, S.; Lippok, A.; Ruhé, M., 2005. Use of GIS Methodology for Online Urban Traffic Monitoring, Proceedings of 3rd International Symposium Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (URBAN 2005), Tempe Arizona, USA, März 2005, on CD-ROM
- Hinz, S., 2004. Car Detection in Aerial Thermal Imagery by Local and Global Evidence Accumulation, Technical Report, PF-2004-01, Remote Sensing Technology, Technische Universität München
- Lehner, M., Gill, R.S., 1992. "Semi-automatic derivation of digital elevation models from stereoscopic 3-line scanner data," IAPRS, Vol. 29, Part B4 Washington, USA pp. 68-75
- Mirchandani, P., Hickman, M., Angel, A., Chandnani, D., 2002. Application of aerial Video for traffic flow monitoring and management. Percora15, ISPRS Commission I, Conference Proceedings, Denver, USA

Pöttsch, M., 2005. Messung von Fahrzeugpositionen und –geschwindigkeiten in Luftbildsequenzen und Zuordnung zu Straßendatenbanken, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden und DLR Institut für Methodik der fernerkundung, 97p.

Reinartz, P., Krauss, T., Pöttsch, M., Runge, H., Zuev, S., 2005 Traffic Monitoring with serial images from airborne cameras, in *Proc. of ISPRS Hannover Workshop 2005 - High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, 17-20 May, 2005, Hannover, Germany, ISPRS, vol. XXXVI, part I/W3

Stilla, U., Michaelsen, E. Soergel, U. Hinz, S. Ender, J., 2004. Airborne monitoring of vehicle activity in urban areas. ISPRS Congress, Commission III, WG III/4, Istanbul, on CD-ROM

Toth, C.K., Grejner-Brzezinska, D., 2004. Traffic Management with state-of-the-art airborne imaging sensors. ISPRS Congress, Commission II, Istanbul, Turkey, on CD-ROM

Fahrzeugkonzepte der Zukunft auf dem Prüfstand

Antriebe und Kraftstoffe im Kontext des Energiesystems

Manfred Fishedick⁽¹⁾, Stephan Schmid⁽²⁾, Stephan Ramesohl⁽²⁾

⁽¹⁾ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

⁽²⁾ DLR e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte

Das Energie- und Verkehrssystem der Zukunft steht heute vor entscheidenden Herausforderungen. Klimaschutz und Versorgungssicherheit erfordern eine stärkere Umorientierung zu einem effizienteren Umgang mit Energie und einer Diversifizierung der Energienutzung. Aufgrund seiner zunehmenden Bedeutung als Energieverbrauchssektor kommt dabei dem Verkehr eine zentrale Rolle zu. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich dieser Vortrag mit besonderem Blick auf die Kraftfahrzeuge mit den Handlungsmöglichkeiten im Verkehrssektor. Dabei stehen Effizienzverbesserungen in der Fahrzeugtechnik ebenso im Mittelpunkt wie alternative Antriebe und der Einsatz von alternativen Kraftstoffen. Das besondere an der Herangehensweise ist, dass die Betrachtung der Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Optionen aus einer vernetzten Blickweise des Energie- und Verkehrssystems erfolgt. Konkurrierende Nutzungsmöglichkeiten der biogenen Primärenergieressourcen (als potenzielle Quelle für Biokraftstoffe) werden diskutiert sowie der insgesamt notwendige Beitrag des Verkehrs zur Erreichung der Gesamtminderungsziele.

Einleitung

Energie- und Verkehrssektor sind heute in vielfältiger Form miteinander verwoben. Dies gilt naturgemäß hinsichtlich des aus dem Verkehr resultierenden Energiebedarfs sowie der Diskussion um den notwendigen Beitrag des Sektors Verkehr zur Erreichung übergreifender Zielsetzungen, beispielsweise den bestehenden Klimaschutzvorgaben, die nur im Kontext der Möglichkeiten des gesamten Energiesystems betrachtet werden kann. Von zunehmender Bedeutung ist schließlich die Frage, welche alternativen Kraftstoffe, wann und in welcher Größenordnung für den Transportsektor bereitgestellt werden können. Insbesondere stellt sich aktuell aufgrund der vielfältigen, aus verschiedenen Bereichen stammenden Nachfrage nach der Primärenergie Biomasse die Frage, in welchem Bereich die Verwendung der nur begrenzt verfügbaren Ressourcen besonders effizient erfolgen kann.

Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, sich vor der Analyse der Handlungsmöglichkeiten im Verkehr zunächst grundsätzlich mit den bestehenden Anforderungen an das Energiesystem und den daraus resultierenden Wechselwirkungen mit dem Verkehrssektor auseinanderzusetzen. Nachfolgende Zusammenstellung gibt in diesem Sinne, d.h. zur gesamtsystemaren Einordnung zunächst einen Überblick über die heute an die Energieversorgung der Zukunft gestellten Anforderungen.

Mit Blick auf die Wechselwirkungen mit dem Verkehrssystem sind neben der Umwelt- und Klimaverträglichkeit vor allem die effiziente Ressourcennutzung und die Versorgungssicherheit von besonderer Bedeutung. Der nachfolgende Beitrag konzentriert sich dabei aus Platzgründen vor allem auf den Aspekt des Klimaschutzes.

Die Rolle des Verkehrs für den Klimaschutz aus gesamtsystemarer Sichtweise

Der Verkehrssektor spielt mit einem Anteil von knapp 20% an den energiebedingten CO₂-Emissionen der Bundesrepublik heute bereits eine wichtige Rolle im Rahmen der Umsetzbarkeit engagierter Klimaschutzziele. Rund 95 % der CO₂-Emissionen aus dem Transportsektor sind wiederum auf den Straßenverkehr zurückzuführen, was seine besondere Rolle in diesem Kontext deutlich macht.

- Bedarfsgerechte Nutzungsmöglichkeit und Versorgung
- Dauerhafte Versorgungssicherheit
- Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit (Luft, Boden, Wasser, Lärm)
- Klimaverträglichkeit
- Risikoarmut und Fehlertoleranz
- Effiziente Ressourcennutzung (Schonung fossiler Reserven, Minimierung der Flächeninanspruchnahme)
- Sozialverträglichkeit (ökonomische Verträglichkeit, Generationengerechtigkeit und Akzeptanz)
- Betriebswirtschaftliche Verträglichkeit (Wirtschaftlichkeit)
- Kompatibilität mit bestehenden Infrastrukturen
- Beitrag zur nationalen Wertschöpfung und Arbeitsplatzpotenzial
- Technologie- und Innovationspotenziale (Exportimpulse)
- Internationale Verträglichkeit (Krisenbeständigkeit, Verteilungsgerechtigkeit)
- Geringe Verletzlichkeit des Systems (Resistenz gegenüber terroristischen Anschlägen und Sabotage)

Tabelle 1: Anforderungen an die Energieversorgung der Zukunft in der Übersicht

Von Seiten der Klimawissenschaftler wird heute gefordert, die Treibhausgasemissionen (THG), zu denen ganz maßgeblich CO₂ zu zählen ist, in den nächsten Jahren weltweit drastisch zu reduzieren. Zielvorgabe ist in etwa eine Halbierung des globalen THG-Ausstoßes bis zur Mitte dieses Jahrhunderts (im Vergleich zum Niveau des Jahres 1990), wenn die Folgen der Klimaerwärmung noch in tolerablen Grenzen gehalten werden sollen. Berücksichtigt man, dass bisher vor allem die Industrieländer am anthropogenen Treibhauseffekt verursachend beteiligt gewesen sind, im Umkehrschluss den Entwicklungsländern ein natürlicher Nachholbedarf zuzugestehen ist, ergeben sich für Industrieländer wie Deutschland – so formuliert es beispielsweise die Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ – darüber hinaus gehende, massive Minderungsanforderungen für die THG-Emissionen von bis zu 80% bis zum Jahr 2050 bezogen auf das international übliche Basisjahr 1990.

Abbildung 1 zeigt vor dem Hintergrund des bundesdeutschen 80%-Minderungsziels die sich für den Verkehrsbereich ergebenden Herausforderungen zur Reduktion der THG-Emissionen. Dabei ist zunächst aufgeführt mit welcher Entwicklung man hinsichtlich der energiebedingten CO₂-Emissionen zukünftig im Rahmen einer eher Business as Usual orientierten Entwicklung rechnen müssen (sog. Referenzentwicklung). Derartige Überlegungen liegen derzeit von der Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ vor (Enquête 2002) und sind für den Zeitraum bis zum Jahr 2030 kürzlich zudem im Energiereport IV von prognos/EWI beschrieben worden (prognos 2005). Beide Abschätzungen sind in Abbildung 1 aufgeführt. Danach ist davon auszugehen, dass sich der CO₂-Ausstoß in den nächsten Jahrzehnten zwar schon im Trend gegenüber dem Basiswert von 987 Mio. t CO₂ im Jahr 1990 signifikant verringern wird. Gründe hierfür sind u.a. durch autonome Effizienzsteigerungen (technischer Fortschritt) und einen vor allem im Energiereport IV beschriebenen Brennstoffswitch vor allem in der Elektrizitätserzeugung, wo eine massive Substitution von Kohlekraftwerken durch Erdgasanlagen unterstellt wird. Ungeachtet dieser Erfolge ist zu erwarten, dass die Lücke zwischen dem, was sich in einer Referenzentwicklung ohne forcierte Klimaschutzmaßnahmen einstellen wird, und den politisch angestrebten, langfristig formulierten Klimaschutzzielen aber weiter aufgehen wird.

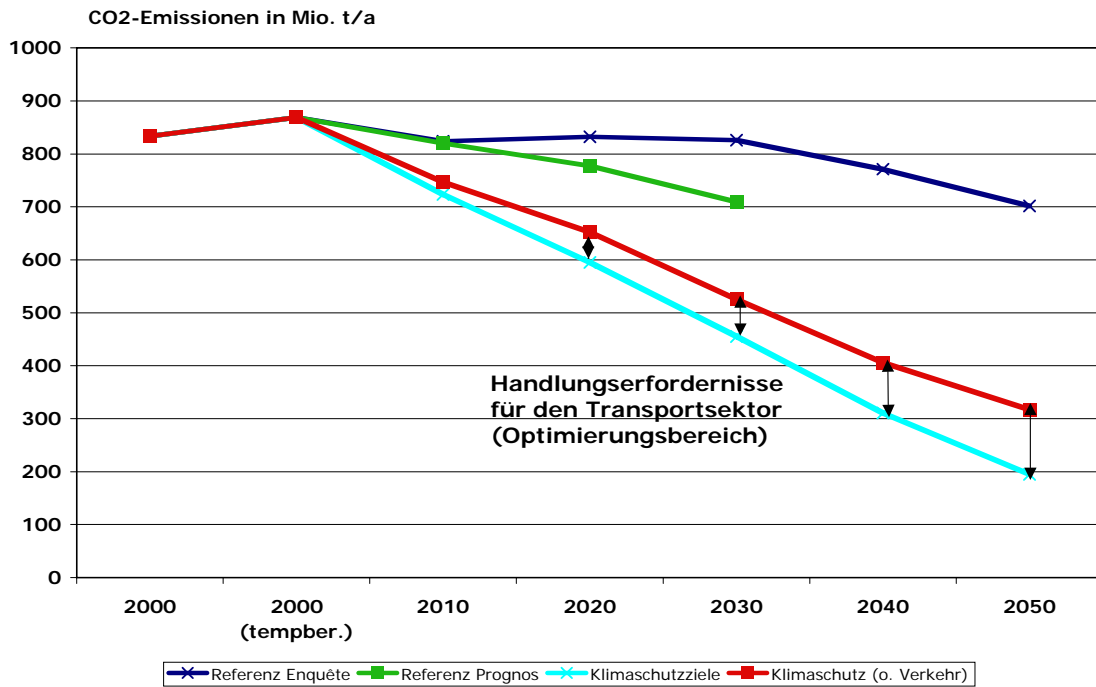


Abbildung 1: Mögliche Entwicklung der CO₂-Emissionen in verschiedenen Szenarien

Um mögliche Wege zur Realisierung der Klimaschutzvorgaben zu analysieren, wurden denkbare Handlungsoptionen in einem Langfristszenario abgebildet, das in einem gemeinsamen Projekt von DLR, Wuppertal Institut und ifeu erarbeitet worden ist (DLR, WI, ifeu 2004). Ziel dieser Arbeit war eine mögliche Entwicklung des Energiesystems zu skizzieren, die von einer Erfüllung eines langfristigen Minderungsziels von 80% ausgeht. Die dargestellte Entwicklung "Klimaschutz o. Verkehr" bezieht sich dabei zunächst auf eine Entwicklung im stationären Bereich, in der Maßnahmen im Bereich Verkehr noch nicht eingeflossen sind. Ein Vergleich mit der ebenfalls in der Abbildung 1 angegebenen Ziellinie für den Klimaschutz macht deutlich, welche Deckungslücke durch Minderungsmaßnahmen im Transportsektor gefüllt werden müssen. Im Jahr 2050 umfasst diese mehr als 100 Mio. t CO₂ (als Pfeile im Diagramm angedeutet).

Mit den im Rahmen des Szenarios unterstellten Maßnahmen für den stationären Bereich ist dabei schon ein ganz erheblicher Schritt auf die Zielvorgabe gemacht worden und dabei wurden strukturelle Grenzen weitestgehend ausgeschöpft. Dies betrifft - wie Abbildung 2 am Beispiel der Wärmenachfrage zeigt - insbesondere den Bereich der Energieeinsparung auf der Energieangebotsseite (Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung) und auf der Nachfrageseite, eine deutliche Verbreiterung des Energiemixes (Diversifizierung) als aber auch insbesondere den Ausbau erneuerbarer Energien.

Geht man von ähnlichen Anforderungen für den Verkehrssektor aus, heißt dies, dass um die langfristig notwendige Reduktion an Treibhausgasemissionen realisieren zu können, es zum Einen erforderlich ist, die technisch verfügbaren Effizienzpotentiale bei den vorhandenen und zumindest mittelfristig dominierenden konventionellen Fahrzeugen konsequent zu mobilisieren sowie alternative Fahrzeugkonzepte mit deutlich geringeren CO₂-Emissionen zur Verfügung zu stellen. Angesichts der hier diskutierten engagierten Klimaschutzerfordernisse ist jedoch schnell absehbar, dass die erforderlichen Emissionsminderungen in der nötigen Höhe nur durch eine zusätzliche zumindest partielle Umstellung der Kraftstoffversorgung auf eine stärker regenerative Energiebasis erreichbar sein werden. Alternative Kraftstoffe sind daher ebenfalls von herausragender Bedeutung für die Entwicklung des Energiesystems. Beide Aspekte sollen in ihren Möglichkeiten und Grenzen nachfolgend weiter beleuchtet werden.

- Szenario NaturschutzPlus II

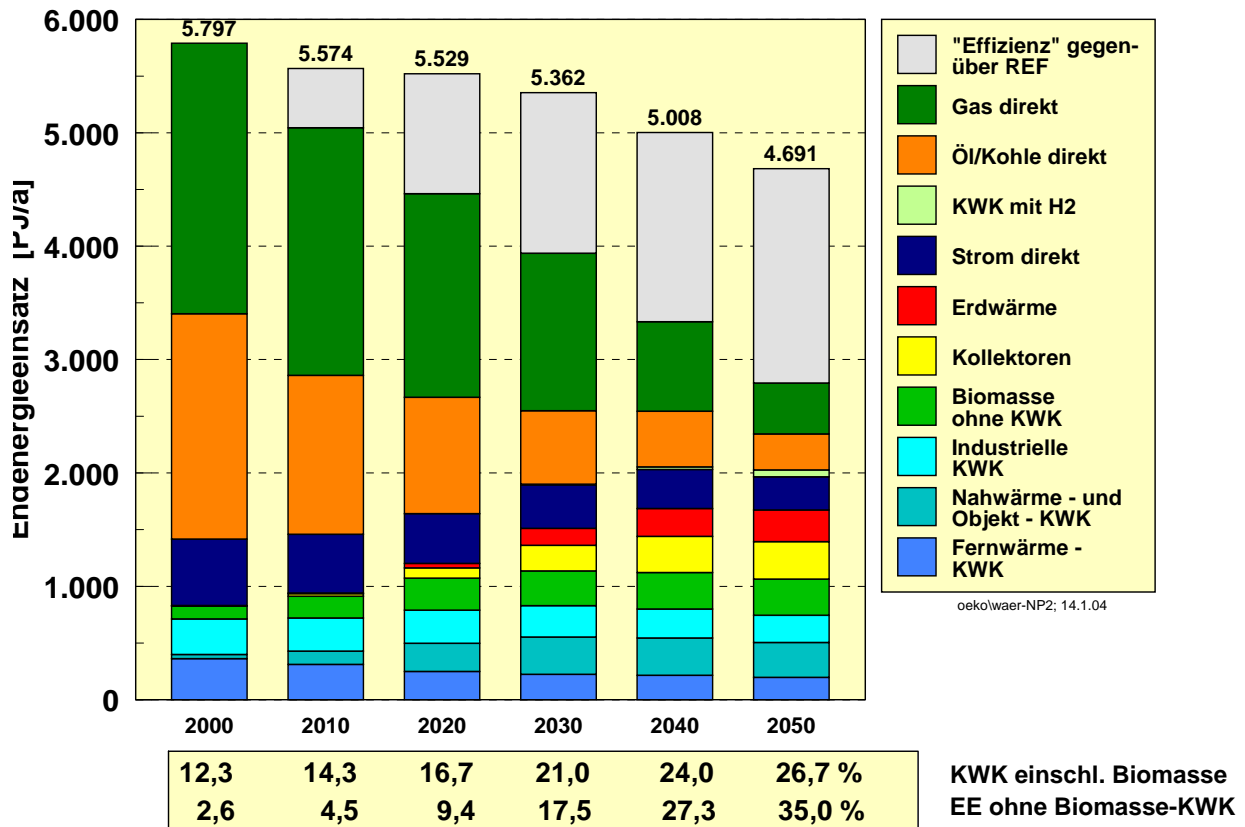


Abbildung 2: Entwicklung des Wärmesektors im Klimaschutzszenario NaturschutzPlus II (DLR, WI, ifeu 2004)

Chancen und Grenzen regenerativer Kraftstoffe aus Gesamtsystemsicht

Mit Blick auf den Verkehrsbereich stellt sich zunächst die Frage nach der Verfügbarkeit von Biomasse als regenerativer Primärenergieressource. Nach Expertenschätzungen könnten allein in Deutschland bis zum Jahr 2030 rund 16% des Stroms, 10 % des Wärmebedarfs und 12 % der Kraftstoffnachfrage durch Biomasse erzeugt werden, durch die Verwertung von Reststoffen aus der Forst- und Landwirtschaft einerseits und den Anbau von Energiepflanzen andererseits (Öko-Institut 2004). Unbeachtet bei dieser Betrachtung bleibt zunächst aber das Spannungsverhältnis zwischen den einzelnen Verbrauchersektoren, denn es ist hinsichtlich der Flächeneffizienz und der erzielbaren Wirkung längst nicht egal wofür der ha Ackerfläche genutzt wird.

Darüber hinaus bleibt bisher weitestgehend ausgeblendet, dass mit Blick auf eine nationale Nachhaltigkeitsstrategie in die Optimierung der Biomassenutzung die stoffliche Verwertung (Biomasse als industrieller Rohstoff etwa für die Textilindustrie oder als Faserverbundwerkstoff für den Kraftfahrzeug- und Karosseriebau) einbezogen werden müsste. Erste Untersuchungen zeigen bei einem ökobilanziellen Vergleich des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe derzeit bei der stofflichen Verwendung für Ge- und Verbrauchsprodukte und damit Substitution fossiler Ausgangsprodukte höhere Umweltentlastungen als etwa bei der Verwendung als Biokraftstoff (Weiß 2004). Für die Zukunft ergibt sich dadurch die besondere Herausforderung über die Kaskadennutzung (stoffliche vor energetischer Verwendung) der Biomasse verstärkt nachzudenken und diese zu einem industriellen Arbeitsfeld zu machen.

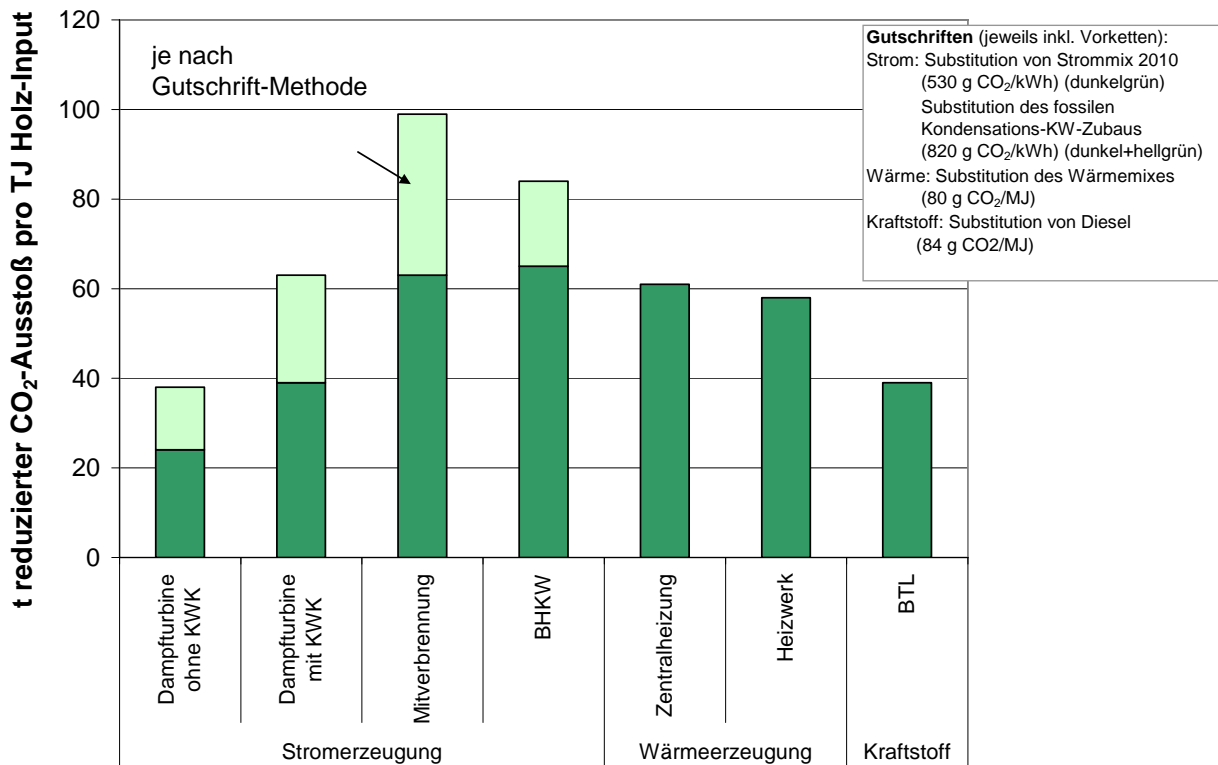


Abbildung 3: Reduktion der CO₂-Emissionen je nach Nutzung der Ressource Holz (Quelle: DLR, WI, ifeu 2004).

In dem von DLR, Wuppertal Institut und ifeu entwickelten Klimaschutzszenario führen diese Erkenntnisse zu dem Schluss, dass die begrenzten erneuerbaren Energieressourcen zunächst vor allem im stationären Bereich zur Anwendung kommen sollten und erst – mit zeitlichem Nachlauf – deutliche Anteile auch im Verkehr angestrebt werden sollten (vgl. Abbildung 4).

Die Ergebnisse stehen damit im gewissen Widerspruch zu den Vorgaben der EU-Kommission den Biokraftstoffanteil bis zum Jahr 2010 auf 5,75 % zu erhöhen. Und auch die tatsächliche Entwicklung scheint den Analyseergebnissen zu widersprechen, ist doch der Biokraftstoffanteil in den letzten Jahren (nicht zuletzt wegen der Ausnahmeregelungen von der Mineralölsteuer) signifikant gestiegen und nähert sich zumindest bezogen auf den Dieserverbrauch derzeit schon deutlich der Zielmarke der EU, während Biokraftstoff als Benzinsubstitut noch eine eher untergeordnete Rolle spielt (in Summe deckte Ende 2004 vor allem aus Raps hergestellter Biodiesel rund 1,4% des deutschen Kraftstoffbedarfs ab). Dabei ist aber zu hinterfragen, ob der heute eingeschlagene Weg der Biokraftstoffbereitstellung auf längere Sicht effizient ist. So wird Raps heute auf etwa einer Million ha Ackerfläche angebaut. Perspektivisch könnte die gleiche Fläche mit anderen Biokraftstoffrouten ggf. deutlich effizienter genutzt werden. Dies betrifft z.B. den Anbau von Energiepflanzen für die Herstellung von synthetischen Diesel (BTL: Biomass to liquid) oder aber der Weg über die gasförmige Phase, d.h. die Bereitstellung von Bio-Methan durch Vergasung. Beide Nutzungsformen zeichnen sich dadurch aus, dass im Gegensatz zu Raps die ganze Pflanze für die Kraftstoffbereitstellung Verwendung findet.

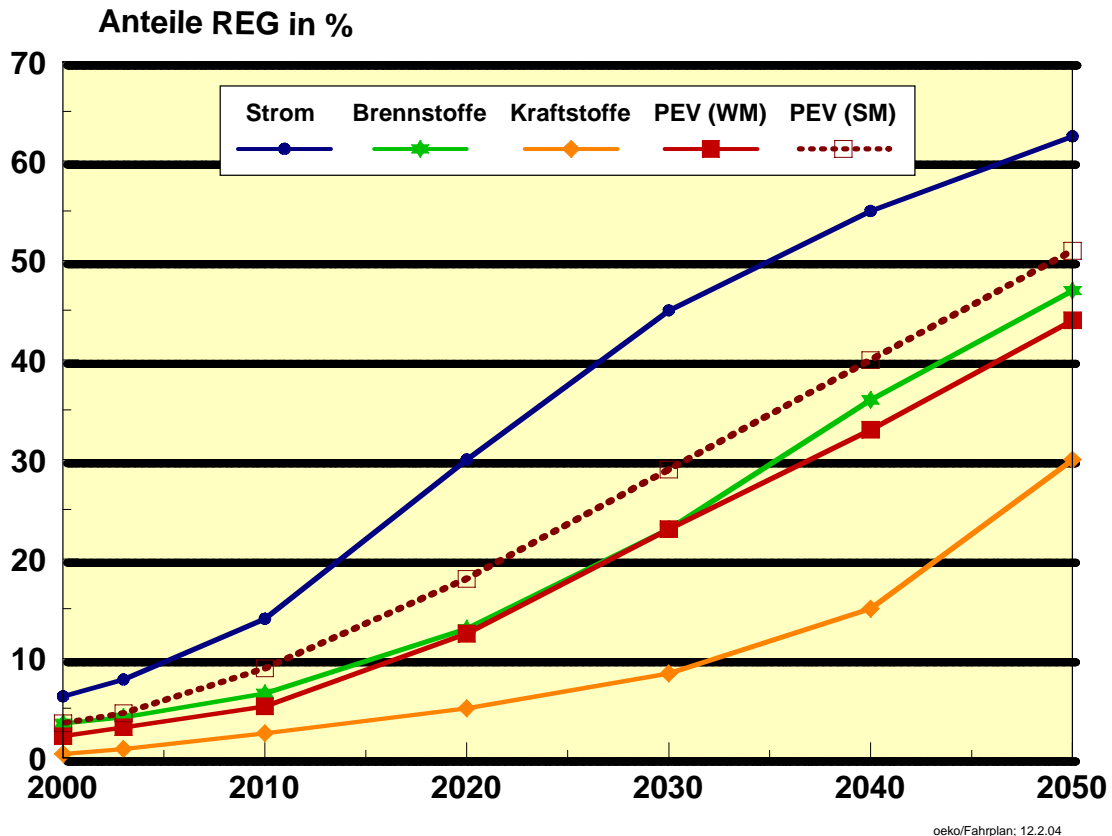


Abbildung 4: Mögliche Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung, der Wärmebereitstellung und der Kraftstoffversorgung im Klimaschutzscenario NaturschutzPlus II (DLR, WI, ifeu 2004)

Längerfristig kommt neben Biokraftstoffen dem Wasserstoff als potenziellem regenerativem Energieträger eine größere Bedeutung in Klimaschutzszenarien zu. Längerfristig erst deswegen, da auch hier gilt, dass zunächst der (direkten) Nutzung der Ursprungsprodukte (hier auf der Basis von erneuerbaren Energien erzeugter Strom) im stationären Bereich, d. h. vor allem als Substitut für die fossile Stromerzeugung, aus Effizienzgründen der Vorrang gebührt. In welcher Größenordnung regenerativer Wasserstoff in das Verkehrssystem eingeführt werden muss hängt von vielen Faktoren ab. Im skizzierten Klimaschutzscenario resultiert im Jahr 2050 zunächst nur ein vergleichsweise geringer Wasserstoffanteil von deutlich unterhalb von 10 %. Dabei stellt dieser Faktor durchaus eine Optimierungsgröße dar, da mit dem Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft naturgemäß hohe infrastrukturelle Aufwendungen verbunden sind. Diese lassen sich gut über Sensitivitätsanalysen erfassen, die u.a. maßgeblicher Inhalt eines aktuellen Forschungsvorhabens von DLR, Wuppertal Institut und ifeu im Auftrag des Umweltbundesamtes mit dem Titel „Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Nutzung alternativer Kraftstoffe“ sind. Bestimmende Faktoren für den Kraftstoff Wasserstoff sind bei weitestgehend ausgeschöpften Maßnahmen auf der stationären Seite danach vor allem

- die Gesamtfahrleistung im Straßenverkehr, die sich einerseits aus der Entwicklung der Bevölkerung bestimmt, andererseits sich – gerade bei zwangsläufig aus den infrastrukturellen Aufwendungen resultierenden steigenden Kosten für das Auto fahren - aus Veränderungen des Mobilitätsverhaltens ableiten kann
- die Möglichkeiten Biokraftstoffe nicht nur auf der Basis heimischer Ressourcen herzustellen, sondern im nennenswerten Umfang zu importieren
- über eine Veränderung des Modal Split den Druck vom Fahrzeugbereich zu nehmen.

Die bisherigen Analysen zeigen aber, dass kurz- bis mittelfristig regenerative Kraftstoffe keinen substantiellen Beitrag zur THG-Minderung leisten können, insbesondere wenn die Nutzungskonkurrenz zu stationären Anwendungen in die Allokationsentscheidungen einfließt. Damit verbleibt als Anforderung an den Verkehr, den notwendigen Klimaschutzbeitrag maßgeblich über die Reduzierung des Kraftstoffbedarfs zu leisten, u.a. um durch einen gesenkten Gesamtbedarf die Grundvoraussetzung für langfristig hohe Deckungsanteile der regenerativen Energieträger zu schaffen.

Effizienzoptionen für Antriebs- und Fahrzeugkonzepte bis 2050

Für die nationalen, ambitionierten CO₂-Ziele ist der Verkehrssektor, insbesondere der motorisierte Individualverkehr, sehr stark gefordert, zukünftig durch innovative Neu- und Weiterentwicklungen sowohl an Fahrzeug- und Antriebskonzepten als auch auf Seite der Bereitstellung CO₂-armer Kraftstoffe hohe Beiträge zur Emissionsminderung zu liefern. Im Rahmen des zuvor erwähnten, laufenden Forschungsvorhabens war die Aufgabe für das DLR, Institut für Fahrzeugkonzepte, die technischen Optionen und die zugehörigen Kosten genauer zu untersuchen.

Als Ausgangspunkt für die Analyse von Handlungsoptionen dient die Vorgabe, welche die CO₂-Emissionen der Pkw-Neuzulassungen im Mittel über alle Fahrzeugkategorien bis zum Jahr 2050 festlegt. In diesem Szenario wird das von ACEA (Association des Constructeurs Européens de d'Automobiles) im europäischen Mittel zugesagte Minderungsziel bis 2008 mit 140 g CO₂/km und auch das anvisierte Ziel bis 2012 mit 120 g CO₂/km erreicht. Hierbei liegen die Zielwerte für Deutschland tatsächlich um ca. 10 g CO₂/km höher als im europäischen Durchschnitt. Ab dem Jahr 2012 wird eine pauschale Minderung von 1,5 % pro Jahr unterstellt. Damit werden mittlere CO₂-Emissionen von 115 g/km im Jahr 2020, 99 g/km in 2030, 85 g/km in 2040 und schließlich 73 g/km im Jahr 2050 erreicht. Der Verlauf der CO₂-Emissionen der Neuwagenflotte sowie der damit verbundene Kraftstoffverbrauch ist in Abbildung 5 dargestellt.

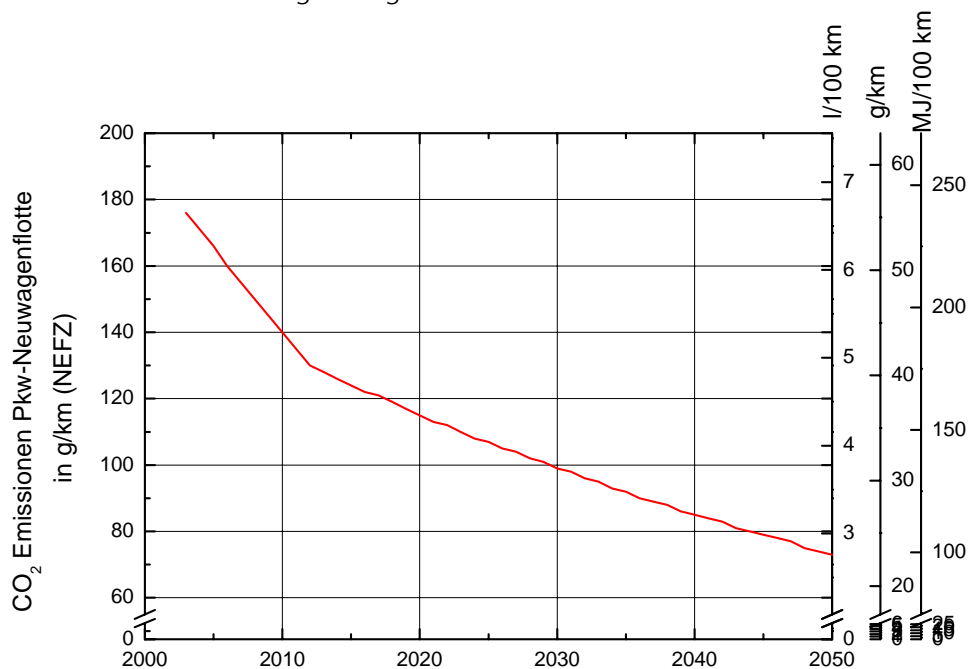


Abbildung 5: Szenario der CO₂-Emissionen der Pkw-Neuwagenflotte im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) über der Zeit bis zum Jahr 2050, sowie der Kraftstoff-/Energieverbrauch in Diesel-Äquivalenten.

Um die rein fahrzeugtechnischen Optionen von denen der alternativen Kraftstoffe zu trennen, wurde zunächst ein technisches Szenario entwickelt, welches mit konventionellen Kraftstoffen das CO₂-Flottenziel kostengünstig zu erreichen sucht. Der Hauptzweck war hierbei, über die technische Ausgestaltung des Minderverbrauchs an Kraftstoff eine Aussage zu den gegenüber einem Referenzfahrzeug des Jahres 2003 entstehenden Mehrkosten zu erhalten.

Potenzielle technischer Einzelmaßnahmen

Potenzielle zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs ergeben sich zum einen auf der Seite des Fahrwiderstands, also Maßnahmen, die den Energiebedarf senken. Hier sind in erster Linie Roll- und Luftwiderstand zu nennen. Die Analyse ergab für den Rollwiderstand ein Reduktionspotenzial bis etwa 3,4 % durch den Einsatz von rollwiderstandsarmen Reifen gegenüber dem heutigen Durchschnitt. Die Betrachtung des Luftwiderstands ergab ohne wesentliche Komforteinbußen ein Potenzial von ca. 10% in naher Zukunft und bis zu etwa 30% bis 2012. Dies entspricht bestenfalls einer knapp 5-%igen Verbrauchsabsenkung im NEFZ.

Die Reduktion mechanischer Energieverluste sowohl im Otto- als auch im Dieselmotor sowie die Optimierung der Nebenverbraucher trägt erheblich zu einem Minderverbrauch an Kraftstoff bei. Die Potenziale werden für den Ottomotor zwischen 7-11 % und für den Dieselmotor zwischen 9-14 % geschätzt (Schwaderlapp, Koch et al. 2000).

Eine weitere schnell realisierbare Maßnahme ist das kurzzeitige Abstellen des Motors bei Stillstand des Fahrzeugs, z.B. beim Halten an einer roten Ampel, auch kurz als Stop/Start bezeichnet. Im Einzelfall bereits in der Vergangenheit in Serie eingesetzt, können zwischen 3,6 % und 5 % Kraftstoffeinsparung im NEFZ erwartet werden. Eine Schlüsselrolle spielt das Fahrzeuggewicht. Für Otto-Fahrzeuge über 900 kg kann im NEFZ mit einem Minderverbrauch von ca. 0,4 l/100 km und 100 kg gerechnet werden. Für Dieselfahrzeuge über 900 kg fällt der Wert mit 0,3 l/100 km und 100 kg geringer aus. Für Fahrzeug mit niedrigerem Gewicht kann nur eine geringere spezifische Einsparung realisiert werden (Renner und Gossen 1998; Eberle 2000).

Getriebeoptimierung bietet eine weitere, kurzfristig realisierbare Möglichkeit der Energieeinsparung. Durch eine höhere Anzahl von Übersetzungen wird der Betriebspunkt des Motors hin zu höheren Wirkungsgraden verschoben. Dies wird durch Automatgetriebe, die den Schaltzeitpunkt optimieren, weiter verbessert. Effiziente Getriebe werden mit einer Effizienzsteigerung von 7 % eingeordnet.

Ein höheres Verbesserungspotenzial ergibt sich durch die Weiterentwicklung der Verbrennungsmotoren selbst. Für den Ottomotor sind folgende Maßnahmen in der Diskussion bzw. im Einzelnen schon eingesetzt:

- Verringerung der Drosselverluste;
- Verbesserung des Hochdruckwirkungsgrades;
- Verminderung der Verlustleistung;
- Verschiebung des Lastkollektivs in verbrauchsgünstige Bereiche.

Für Direkteinspritzung werden Kraftstoffeinsparungen von ca. 12 % angegeben (Ellinger, Kapus et al. 2000). Für die Kombination aus GDI, Aufladung und Stop/Start werden Einsparungen von ca. 16 % berichtet (Edwards, Griesemann et al. 2003). Ottomotorische Brennverfahren, die homogene Selbstzündung und Fremdzündung kombinieren wurden bereits demonstriert und stellen einen Schritt hin zu HCCI-Motoren (Homogenous Charge Compression Ignition) dar. Mit Direkteinspritzung, teilvariablem Ventiltrieb, zylindergeführter Motorsteuerung und Schichtleerlauf wurden Einsparungen von ca. 15 % im NEFZ nachgewiesen (Fraidl, Fuerhapter et al. 2005). Reine motorische Maßnahmen stellen im Moment die erforderlichen Verbrauchseinsparungen nicht in Sicht. Erst das Zusammenspiel mit einem zweiten Energiewandler und –speicher, im Allgemeinen als Hybridantrieb bezeichnet, bringt einen weiteren deutlichen Verbrauchsvorteil im NEFZ. Es ist von Seite der Verbrennungsmotoren erforderlich, diese optimal an die neuen Systembedingungen anzupassen.

Die Hybridisierung des Antriebsstrangs von konventionellen Fahrzeugen mit einem Elektromotor wurde bereits eindrucksvoll am Beispiel des Toyota Prius gezeigt. Ein hybrid-elektrischer Antrieb wird in Kombination mit anderen Maßnahmen wie Lastpunktanhebung und automatisiertes Getriebe eingesetzt. Die Vorteile sind Bremsenergieerückgewinnung, erhöhte Fahrleistung durch Leistungsaddition und ein erhöhter Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors. Für einen Mild-Hybrid mit ca. 14 kW elektrischer Leistung werden im Mittel 31 %, für einen Full-Hybrid werden 41 % Verbrauchsminderung im NEFZ angesetzt (RICARDO 2002; Edwards, Griesemann et al. 2003).

Schließlich machen weitere, ambitionierte CO₂-Ziele jedoch extreme Leichtbaumaßnahmen notwendig, so dass der Energiebedarf bei gleicher Fahrleistung stark gemindert werden kann. Ein Zielgewicht von ca. 900 kg für Fahrzeuge der Mittelklasse in Kombination mit einem Otto-Hybridantrieb führt zu einer Minderung des Kraftstoffverbrauchs um ca. 55 % gegenüber dem durchschnittlichen Verbrauch 2003 (Lovins und Cramer 2004) mit einer CO₂-Emission von ca. 84 g CO₂/km (NEFZ).

Das Potenzial technischer Einzelmaßnahmen zur CO₂-Reduktion für Otto-Fahrzeuge gegenüber dem Flottendurchschnitt der Neuzulassungen im Jahr 2003 ist in Abbildung 6 dargestellt.

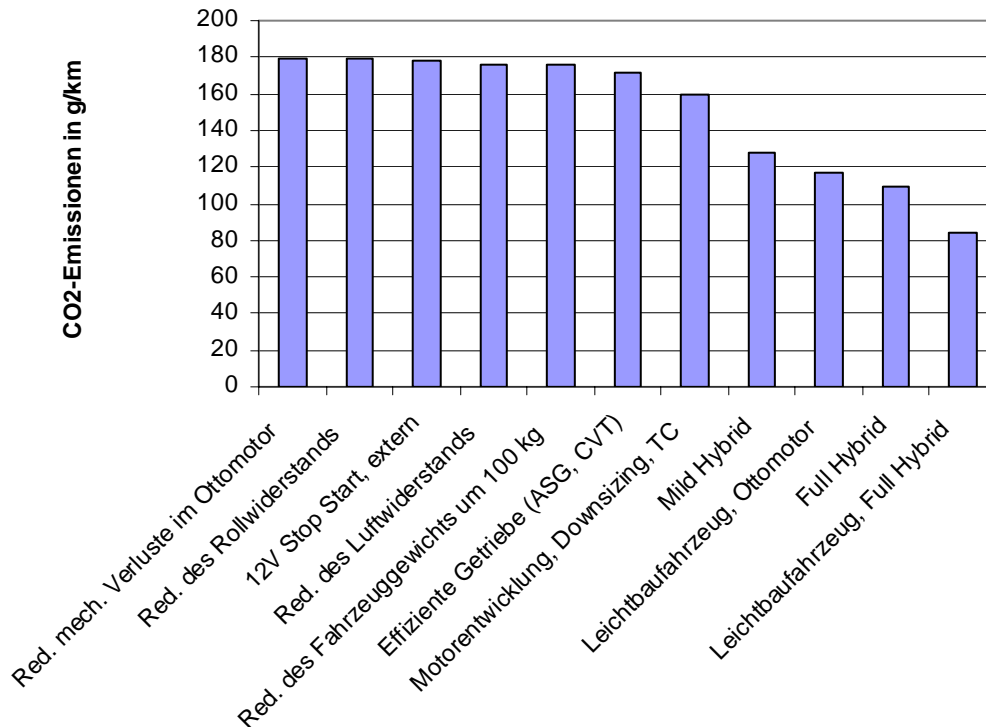


Abbildung 6: Potenzial technischer Einzelmaßnahmen zur CO₂-Reduktion für Otto-Fahrzeuge der Mittelklasse (Segment C/D).

Kombination einzelner Maßnahmen zum Referenzszenario

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Maßnahmen wurden zu einem Gesamtszenario kombiniert welches den in Abbildung 5 gezeigten Zielverlauf und den Zielwert von 73 g CO₂/km im Jahr 2050 einhält. Hierbei wurden die Maßnahmen nach der Zeit ihrer Verfügbarkeit und nach den Zusatzkosten geordnet sowie auch der Marktanteil schrittweise erhöht bzw. vermindert, falls eine Technologie durch eine weitere verdrängt wird. Bestimmte Technologien können hierbei mit anderen kombiniert werden und ihre Einsparungen addieren sich näherungsweise, andere hingegen nicht.

In Abbildung 7 ist dargestellt, wie der Kraftstoffminderverbrauch aus den Einzelmaßnahmen zustande kommt. Der Anteil der Maßnahmen an mittleren Gesamtreduktion ergibt sich hierbei aus dem Potenzial der Einzelmaßnahme sowie aus dem Anteil an den Neuzulassungen. Die Darstellung bezieht sich auf den NEFZ und das Pkw-Segment C/D.

Im Jahr 2003 betrug der Verbrauch im Flottendurchschnitt in diesem Segment etwa 7,8 l Benzin je 100 km im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) (251 MJ/100 km bzw. 185 g CO₂/km). In naher Zukunft kann ein Mix an Effizienztechnologien eingesetzt werden, die von verschiedenen Motorenentwicklungen, Energiemanagement (Stop/Start), eine kosten-schonende, mittlere Reduktion des Fahrzeuggewichts um etwa 100 kg bis hin zu Verbesserungen im Roll- und Luftwiderstand reichen. Hierbei wurde bei Einzelmaßnahmen die Durchdringung der Neuwagenflotte von 50 % nicht überschritten. Bis zum Jahr 2030 kann der Elektro-Hybrid-Antrieb in Kombination mit anderen

Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs die Anforderungen erfüllen, allerdings mit einer hohen Flottendurchdringung von ca. 45 % im Jahr 2020. Ab dem Jahr 2030 scheinen die CO₂-Ziele jedoch ohne eine drastische Reduktion des Fahrzeuggewichts nicht haltbar zu sein. Für das Jahr 2050 sind die Ziele mit dem heutigen Kenntnisstand und mit einem nur wenig veränderten Raumangebot der Fahrzeuge nur durch eine 40-%-ige Reduktion des Gewichts in allen Fahrzeugsegmenten erreichbar. Betont werden muss, dass zwischen heute und diesem Zeitpunkt 45 Jahre Entwicklungszeit liegt und daher exakte Vorhersagen nicht zu treffen, aber enorme Entwicklungsschübe zu erwarten sind.

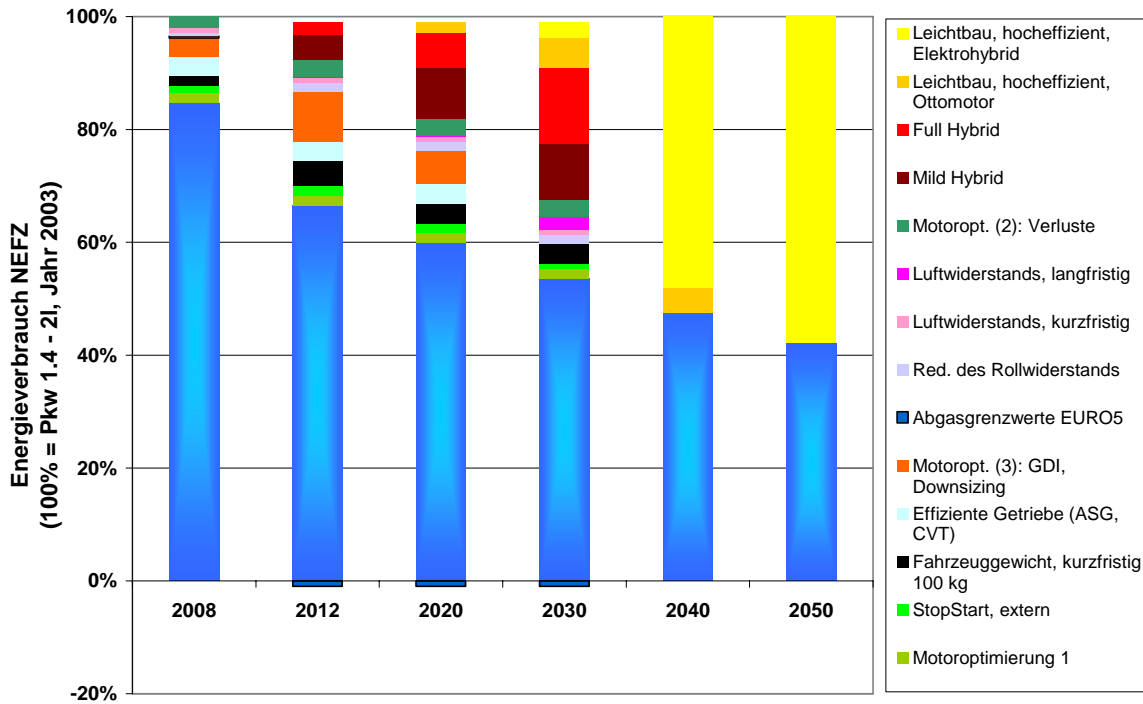


Abbildung 7: Absenkung des Energieverbrauchs für das Pkw-Segment C/D im NEFZ und Anteil der jeweiligen Technologien an der CO₂Minderung.

Die Verbrauchswerte der durchschnittlichen Fahrzeuge je Stichjahr und Segment aus dieser Szenarioentwicklung dienen als Eingangsdaten für das Flottenmodell TREMOD (Transport Emission Estimation Model: Experten-Modell zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland, entwickelt und betrieben durch ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH). Für die gegebene Kategorisierung der Fahrzeuge in TREMOD war es erforderlich sowohl nach Fahrzeugsegmenten zu differenzieren als auch den Kraftstoffverbrauch getrennt nach innerorts und außerorts auszudrücken. Dies ist wichtig, da sich die Energieeinsparung verschiedener Technologien je nach Zyklus unterscheiden und verschiedene Beiträge innerorts und außerorts liefern. Mit TREMOD werden anschließend die Gesamtverkehrsszenarien nach Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen bilanziert.

Abbildung 8 zeigt die zum technischen Szenario gehörende Kostenentwicklung. Die genannten Zahlen beziehen sich auf die Herstellkosten für den Automobilhersteller und schließen Zuschläge und Margen für den Verkauf und Vertrieb des Fahrzeugs aus. Die Kosten ergeben sich aus den Kosten der Einzeltechnologie für den Einsatz im Fahrzeug und der angenommenen Durchdringung in der Neuwagenflotte als mittlere Kosten je Fahrzeug. Die Einführung von sehr leichten Fahrzeugen, hier angenommen mit einer Gewichtsreduktion um 40 % gegenüber Neufahrzeugen des Jahres 2003, verursacht aus heutiger Sicht hohe Kosten, wobei der angenommene Zeitpunkt ihrer Einführung noch ca. 20 Jahre in der Zukunft liegt.

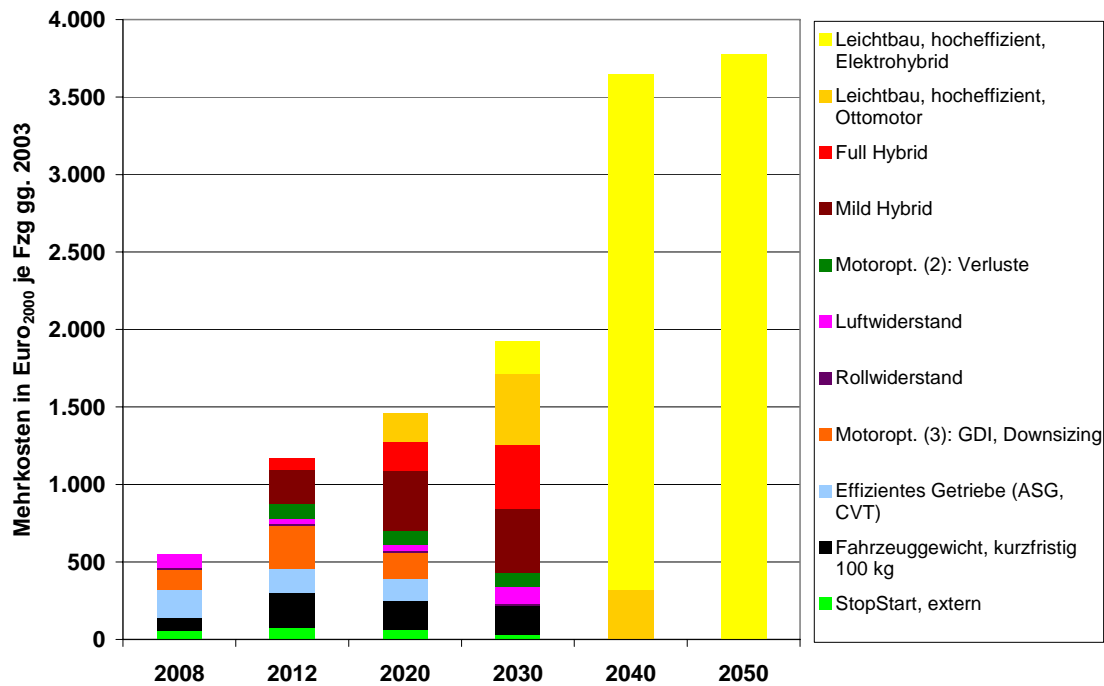


Abbildung 8: Durchschnittliche Mehrkosten der Fahrzeuge des Referenzszenarios gegenüber konventionellen Fahrzeugen

Fahrzeuge mit alternativen Kraftstoffen/alternativen Antrieben

Getrennt von den technischen Optionen mit konventionellen Kraftstoffen wurden Fahrzeugkonzepte mit alternativen Antrieben betrachtet. Aufgrund des Projektumfangs beschränkt sich dies auf die folgenden Antriebsarten:

- Erdgas/Biomethan-Fahrzeuge,
- Wasserstoff-Verbrennungsmotor und
- Direkt-Wasserstoff-BZ-Hybridfahrzeuge.

Erdgasfahrzeuge

Erdgas als Kraftstoff bietet aufgrund des hohen Wasserstoffgehaltes Vorteile bei der CO₂-Bildung je MJ von ca. 20% gegenüber Ottokraftstoff. Weitere Vorteile sind die hohe Oktanzahl von bis zu 130, wodurch keine Aromaten zur Erhöhung der Klopfestigkeit notwendig sind. Weiterhin sind ein hoher Heizwert sowie eine saubere Verbrennung von Vorteil. Nachteile sind eine hohe Zündenergie, keine schmierende Wirkung und ein hoher Luftbedarf. Bivalente Fahrzeuge, d.h. Fahrzeuge die zwischen Benzin- und Erdgasbetrieb wechseln können, überwiegen heute am Markt. Diese können jedoch den verbrennungsmotorischen Vorteil, den Erdgas bietet, kaum nutzen und haben zudem ein höheres Gesamtgewicht. Daher werden 4% Mehrverbrauch an Energie für den heutigen Flottenmix angenommen, wobei ein Mix aus 70% H-Gas und 30% L-Gas zugrunde gelegt ist. Allerdings ist das Entwicklungspotenzial groß. Beispielsweise wird von Berner und Bargende (2004) ein Erdgas-Minimalhybrid-Fahrzeug präsentiert, welches bei 1590 kg Schwungmasse eine Emission von 92 g CO₂/kg hat. Wie in Abbildung 9 dargestellt ist, sind durch Erdgasfahrzeuge ebenfalls sehr hohe CO₂-Reduktionen möglich.

An Mehrkosten eines Erdgasmotors (monovalent) werden im Jahr 2008 130 Euro angesetzt, die durch Lerneffekte mit der Stückzahl in Zukunft auf 100 Euro gegenüber einem Benzinsystem sinken können. Für ein Erdgas-Tanksystem sind heute Kosten weit über 1000 Euro anzusetzen. Durch alternative Speicherkonzepte und durch hohe Stückzahlen werden langfristig etwa 500 Euro erwartet.

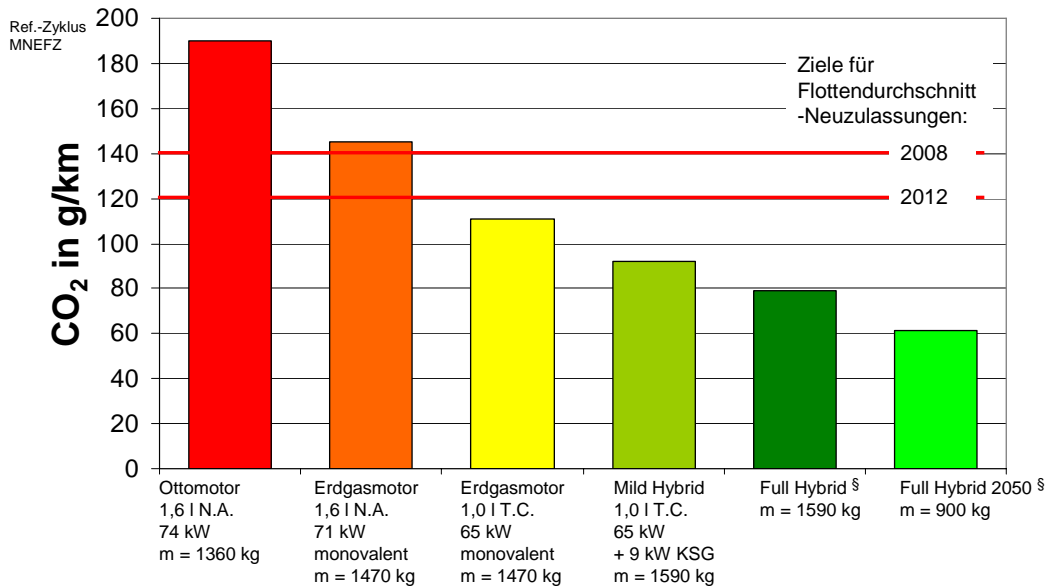


Abbildung 9: Absenkung der CO₂-Emissionen durch fortgeschrittene Erdgasfahrzeuge (Berner und Bargende 2004, DLR-IFK)

Fahrzeuge mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor

Die Verwendung von Wasserstoff als Energieträger in einem weiter entwickelten Verbrennungsmotor wird als mögliche kostengünstige Brückentechnologie bis zur Marktreife der Brennstoffzelle gesehen. Die Verbrennung von Wasserstoff ergibt Wasser, sehr kleine Mengen von NMVOC und CO, jedoch erhebliche Mengen von NO_x. Daher ist eine Abgasnachbehandlung erforderlich um die EURO4 und EURO5 Normen zu erfüllen.

Wasserstoff ist vor allem wegen seiner hohen Brennrate gut als Kraftstoff geeignet und kann sowohl in Ottomotoren als auch in Diesel- oder HCCI-Motoren verwendet werden. Ein Nachteil ist die reduzierte Leistungsabgabe eines Motors im Vergleich zu Otto- und Dieselmotoren, was hauptsächlich durch den geringen volumetrischen Heizwert von Wasserstoff verursacht wird. Die meisten anderen Probleme wie Klopfen, unkontrolliertes Zünden usw. scheinen jedoch gelöst zu sein.

Heutige Konzeptmotoren erreichen noch nicht die spezifischen Leistungsdichten aktueller Benzinmotoren mit Saugrohrenblasung. Der Grund ist, dass Wasserstoff ca. ein Drittel des Brennraumvolumens einnimmt und somit durch den Füllungsverlust der Gemischheizwert deutlich geringer ist als bei einem Benzinmotor (Kiesgen, Berger et al. 2004). Durch tiefkalte äußere Gemischbildung oder Hochdruckdirektinblasung mit Aufladung können jedoch Leistungs- und Drehmomentdichten auf dem Niveau zukünftiger Otto- und Dieselmotoren mit Aufladung erwartet werden. So werden etwa von Pischinger (2005) spezifische Kraftstoffverbräuche im Bereich von modernen, auf EURO4 Norm kalibrierten, aufgeladenen Dieselmotoren für möglich gehalten.

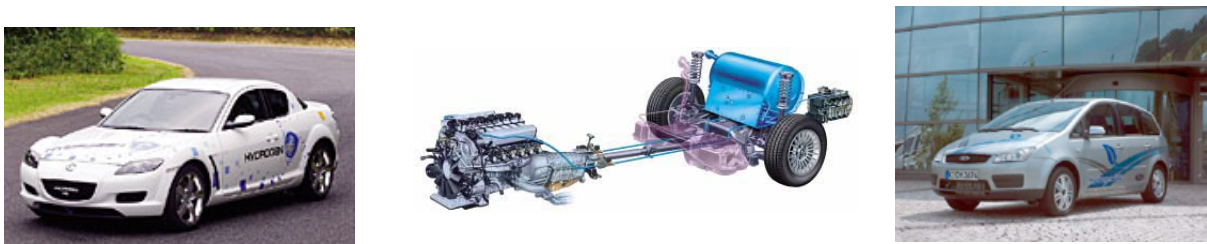


Abbildung 10: Darstellung realisierter Fahrzeuge mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor (Bildquellen: Toyota, BMW, Ford).

Die zukünftigen Kraftstoffverbrauchsabschätzungen für Fahrzeuge mit Wasserstoff Verbrennungsmotor orientieren sich daher für die Modellierung ab 2012 unter der Annahme einer engagierten Weiterentwicklung an den Verbrauchswerten für dieselbetriebene Fahrzeuge. Bis 2012 wird ein Verbrauchsnachteil von 25% angenommen. Die Mehrkosten für den Antriebsstrang werden langfristig entsprechend denen für Erdgasfahrzeuge geschätzt.

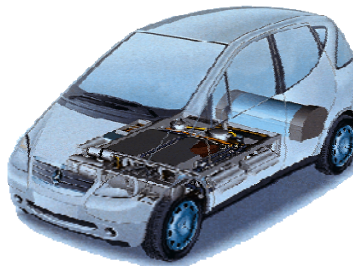
Fahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb

Für den Einsatz im Fahrzeug wird vor allem die Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle entwickelt. Von ihr erhofft man sich in Verbindung mit Wasserstoff als Energieträger einen geringeren Verbrauch aufgrund des höheren Wirkungsgrades gegenüber dem Verbrennungsmotor. Allerdings besitzt die Brennstoffzelle heute einen wesentlich geringeren Entwicklungsgrad und weißt technische Probleme auf wie Dauerhaltbarkeit und Kaltstartverhalten, die gelöst werden müssen. Eine drastische Kostenminderung des Brennstoffzellenstapels und der Systemkosten muss erfolgen, um den Einsatz im Fahrzeug wirtschaftlich zu ermöglichen. Eine Reihe realisierter BZ-Forschungsfahrzeuge ist in Abbildung 11 dargestellt.

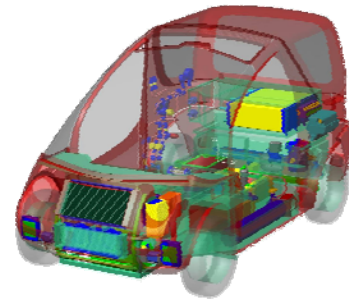
➤ **Opel**
HydroGen3 liquid



➤ **DaimlerChrysler**
F-Cell



➤ **DLR-FK**
HyLite



**Abbildung 11: Beispiele realisierter Brennstoffzellenfahrzeuge
(Bildquellen: Adam Opel AG, DaimlerChrysler AG, DLR-FK).**

Entsprechend dem frühen Entwicklungsstadium und den geringen Stückzahlen realisierter Fahrzeuge sind die Kosten von Brennstoffzellen-Fahrzeugen heute sehr hoch. Man geht von Kosten von etwa 800 €/kW für ein 50 kW-System ohne Kraftstofftank aus. Für die Massenproduktion werden Stapelkosten von 70 bis 80 €/kW_e innerhalb der nächsten 10 Jahre für möglich gehalten (zusammenfassende Darstellung z.B. in Krewitt, 2005). Allerdings kommen hierzu noch die Kosten für das Brennstoffzellensystem und den Wasserstofftank. Geht man von sehr optimistischen Annahmen aus mit BZ-Systemkosten von 50 €/kW, Wasserstoff-Tanksystemkosten von 2 €/kWh und weiteren positiven Entwicklungen bei Elektromotor, Fahrumrichter und Batterien, so würde auch in ferner Zukunft ein BZ-Fahrzeug leicht über 2500 € mehr kosten als ein heutiges Fahrzeug. Eine mögliche Entwicklung der BZ-Stapel und Systemkosten aufgrund von Lernkurveneffekten und technischen Entwicklungen ist in Abbildung 12 dargestellt.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Verkehrssektor mit knapp 20 % der energiebedingten CO₂-Emissionen und insbesondere der Straßenverkehr mit einem Anteil von rund 95 % daran (ca. 165 Mio. t CO₂) spielt eine wichtige Rolle im Rahmen engagierter nationaler Klimaschutzziele. Beispielsweise wurde von der Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ eine bis zu 80 %-ige Reduktion von 987 Mio. t im Jahr 1990 auf 197 Mio. t im Jahr 2050 formuliert. Die Arbeitsgemeinschaft DLR, ifeu und WI bearbeitet in einem laufenden Projekt die Fragestellung einer optimalen Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe zur Erreichung ambitionierter CO₂-Ziele mit einem besonderen Schwerpunkt auf dem Verkehrssektor. Vorläufige Ergebnisse sind u.a.:

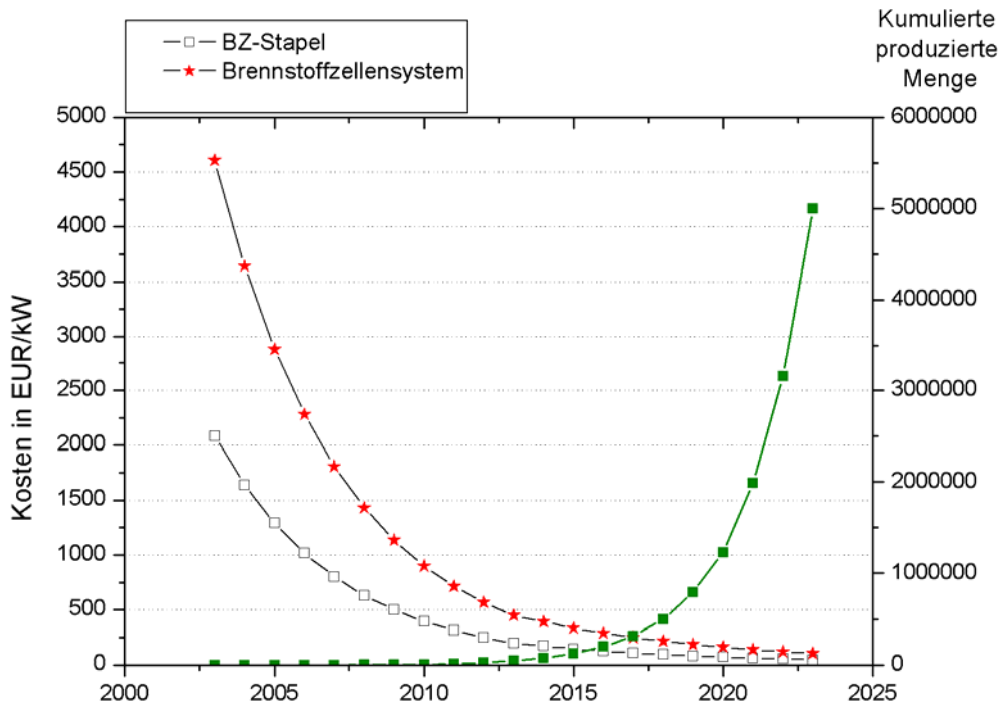


Abbildung 12: Annahmen zur Kostenentwicklung des Brennstoffzellenstapels und des Brennstoffzellensystems (Schmid, 2005)

- Zieht man die Entwicklung verschiedener Einflussfaktoren wie Bevölkerungsentwicklung, Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes, eine Ausschöpfung der Einsparpotenziale bei der Wärme- und Strombereitstellung und Beiträge erneuerbarer Energien im stationären Sektor in Betracht, so verbleibt eine Reduktionsanforderung an den Verkehr in der Größenordnung 100 Mio. t CO₂ pro Jahr.
- Die begrenzten erneuerbaren Energieressourcen sollten vor allem im stationären Bereich zur Anwendung kommen, da die Reduktion des CO₂ Ausstoßes je Tonne Biomasse bei der stationären Nutzung am höchsten ist. Jedoch muss im Rahmen von Naturschutzrestriktionen das verbleibende Biomasse-Potenzial langfristig vollständig zur Produktion von Biokraftstoffen eingesetzt werden, z.B. Biokraftstoffe der zweiten Generation (BTL) oder Biomethan.
- Effizienzoptionen für konventionelle Fahrzeuge sind teilweise „Stand der Technologie“ und können kurzfristig eingesetzt werden. Andere, insbesondere weiterreichende Verbesserungen im Antriebsstrang und drastische Fortschritte im Leichtbau benötigen jedoch langfristige Forschungsanstrengungen. Mit dem dargestellten, technischen Pkw-Fahrzeugszenario, das im Flottenmix etwa einer Verbrauchsminderung von 60 % entspricht, kann unter Berücksichtigung der Fahrzeugumschichtung und der Fahrleistungsentwicklung eine Minderung der CO₂-Emissionen im Pkw-Bereich im Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 2000 um ca. 40 % erreicht werden (Knörr, 2005). Hierbei wurde eine Fahrleistungssteigerung von knapp 20 % des motorisierten Individualverkehrs im Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2000 angenommen. Damit wären jedoch auch Mehrkosten von im Mittel etwa 3.600 Euro₂₀₀₀ je Fahrzeug gegenüber dem Jahr 2003 verbunden. In der Summe ergibt dies etwa 13 Mrd. Euro₂₀₀₀ für die Neuzulassungen des Jahres 2050 gegenüber dem Jahr 2003.

Weitere Ergebnisse, wie über den Einsatz von Fahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen und eine optimierte Strategie, werden zum Ende des Projektes Anfang 2006 vorliegen.

Literatur

- Berner, H.-J. und M. Bargende (2004). Ein CO₂-minimales Antriebskonzept auf Basis des Kraftstoffes Erdgas. Gasfahrzeuge: Die passende Antwort auf die CO₂-Herausforderung der Zukunft? O. Dingel, Expert Verlag. 37.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Wuppertal Institut, Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), Ökologisch optimierter Ausbau erneuerbarer Energien, Forschungsvorhaben für das Bundesministerium für Umwelt (BMU), Berlin, 2004 Prognos, Energiewirtschaftliches Institut der Universität zu Köln, Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030, Untersuchung im Auftrag des BMWa, Basel, Köln, 2005
- Eberle, R. (2000). Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau. Institut für Straßen- und Schienenverkehr. Berlin, Universität Berlin.
- Edwards, R., J.-C. Griesemann, et al. (2003). WELL-TO-WHEELS ANALYSIS OF FUTURE AUTOMOTIVE FUELS AND POWERTRAINS IN THE EUROPEAN CONTEXT. WELL-to-TANK Report.
- Ellinger, R., P. Kapus, et al. (2000). Potenziale zur Reduzierung des CO₂-Flottenverbrauchs mittels Downsizing-Konzepten für konventionelle VKM. Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, VDI.
- Fraidl, G. K., A. Fuerhapter, et al. (2005). Homogene Selbstzündung beim Ottomotor - Herausforderungen, Potenziale und praktische Umsetzung. 6. Internationales Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Stuttgart.
- Kiesgen, G., E. Berger, et al. (2004). Die Weiterentwicklung des Wasserstoffantriebs im BMW 7er, VDI-Berichte Nr. 1852.
- Krewitt, W. und S. Schmid (2005). Fuel Cell Technologies and Hydrogen Production/Distribution Options. Deliverable 1.1. EU-Project CASCADE MINTS. Stuttgart, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- Lovins, A. B. und D. R. Cramer (2004). "Hypercars®, hydrogen, and the automotive transition." Int. J. Vehicle Design Vol. 35(Nos. 1/2).
- Pischinger, S., M. Umierski, et al. (2005). Multi-fuel Brennverfahren für Benzin, Erdgas und Wasserstoff. 6. Internationales Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Stuttgart, expert Verlag.
- Renner, C. und G. Gossen (1998). Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Pkw-Gewicht und Kraftstoffverbrauch. Messungen an 11 Fahrzeugen auf dem dynamischen Rollenprüfstand. In: Wallentowitz (2002): Unkonventionelle Kraftfahrzeugantriebe. Vorlesungsumdruck. Aachen, Institut für Kraftfahrwesen, Aachen.
- RICARDO (2002). "Carbon to hydrogen" roadmaps for passenger cars: A study for the Department for transport and the department of trade and industry.
- Schwaderlapp, M., F. Koch, et al. (2000). Friction Reduction - the Engines Mechanical Contribution to Saving Fuel. FISITA 2000 World Automotive Congress, Seoul.
- Schmid, S. (2005). Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Kraftstoff für den mobilen Bereich; Beitrag zum Projektzwischenbericht AP2, Forschungsvorhaben UFOPLAN FKZ 20345118, unveröffentlicht.
- Knörr, Wolfram (2005). Entwurf zum Endbericht "Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Kraftstoff für den mobilen Bereich", Teil Referenzszenario Verkehr, Berechnungen mit TREMOD; Forschungsvorhaben im Rahmen des UFOPLAN des Umwelt-bundesamtes (FKZ 203 45 118); IFEU, unveröffentlicht.
- Weiß, M., Bringezu, S., Heilmeier, H.: Energie, Kraftstoffe und Gebrauchsgüter aus Biomasse: Ein flächenbezogener Vergleich von Umweltbelastungen durch Produkte aus nachwachsenden und fossilen Rohstoffen, zur Veröffentlichung eingereicht bei ZAU.(Stand 1/05).

KOMPASS – Indikatoren der Mobilität in Deutschland

Barbara Lenz⁽¹⁾, Ulrich Höpfner⁽²⁾

⁽¹⁾ DLR e.V., Institut für Verkehrsforschung

⁽²⁾ ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

Idee und Konzeption des KOMPASS

Für ein dauerhaft verträgliches Verkehrssystem

Motorisierter Verkehr ist Grundlage für heutige Mobilität und arbeitsteiliges Wirtschaften, birgt zugleich ein erhebliches Unfallrisiko und verknappt in wachsendem Maße Energie und Land, um nur einige wichtige Aspekte aufzureißen. Wie das heutige Verkehrssystem so entwickelt werden kann, dass es den künftigen privaten, unternehmerischen und öffentlichen Mobilitätsbedürfnissen angemessen und dabei dauerhaft finanzierbar und umweltverträglich ist, ist Aufgabe einer Verkehrspolitik, die dem Konzept einer nachhaltigen Entwicklung verpflichtet ist. Wissenschaft kann diese Aufgabe unterstützen, indem mit transparenten Kriterien die wichtigsten Problemfelder identifiziert, Wirkungszusammenhänge und wesentliche Faktoren analysiert und Handlungsansätze untersucht werden. Eine kontinuierliche Diskussion kann helfen, den fachlichen Konsens fortzuentwickeln und offene Punkte frühzeitig zu thematisieren, unabhängig von Tagesaktualitäten.

Dafür hat das DLR die Initiative ergriffen, um gemeinsam mit ausgewiesenen Wissenschaftlern in regelmäßiger Folge einen „Bericht zur Mobilität in Deutschland“ zu erstellen. Aus verschiedenen disziplinären Blickwinkeln werden Verkehr und Mobilität hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Effizienz, sozialen Ausgewogenheit und ökologischen Verträglichkeit untersucht. Für diese Zielfelder einer nachhaltigen Entwicklung werden bisherige Erfolge und zu erwartende Probleme anhand eines abgestimmten Indikatorensystems identifiziert. Handlungsansätze werden gemäß den besten Erkenntnissen der unterschiedlichen Disziplinen entworfen und nach fachlicher Einschätzung priorisiert. Ziel des Berichtes ist es, sachliche Richtungsinformationen zu den wichtigsten Handlungsfeldern und Lösungsansätzen im Sinne einer dem Nachhaltigkeitsgedanken verpflichteten Verkehrsentwicklung zur Verfügung zu stellen. Als Ergebnis intensiver wissenschaftlicher Diskussionen spiegeln die Anregungen dabei den jeweils aktualisierten Wissensstand wider. An diesem Vorschlag aus der Verkehrswissenschaft können dann etwa auch die Ergebnisse von Maßnahmen und Szenarien gemessen werden.

Der interdisziplinäre Ansatz des KOMPASS

Der KOMPASS bildet eine einmalige Arbeitsgemeinschaft aus Ingenieur-, Wirtschafts-, Gesellschafts- und Naturwissenschaften, die erst gemeinsam die gesamten Wechselwirkungen von Verkehr und Mobilität erfassen und bisher oft nicht hinreichend zusammenarbeiten⁸. Es ist Konsens der Arbeitsgemeinschaft,

- die Anforderungen von Individuen und Unternehmen Rechnung zu tragen,
- die bereitgestellte Infrastruktur und die realen Nutzungen zu vergleichen,
- die Auswirkungen auf wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und ökologische Verträglichkeit ebenso wie auf soziale Ausgewogenheit zu analysieren,
- angestrebte Mobilität und ausgeübten Verkehr gleichberechtigt zu betrachten,
- motorisierte und nicht-motorisierte Verkehrsträger einzubeziehen.

⁸ Vgl. Beckmann, K.J., Baum, H. et al. 2002: Bericht Integrierte Verkehrspolitik. Im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Endbericht Aachen/Köln 2002, S.324ff.

Die Alleinstellung und der Mehrwert des KOMPASS ergeben sich aus der neuartigen, zielgerichteten Zusammenführung der Ergebnisse oft unverbundener verkehrsrelevanter Teildisziplinen. Jede Disziplin bringt ihre Ansätze und Erkenntnisse ein und stellt sich der kritischen Überprüfung durch die Kollegen. Damit wird eine interdisziplinäre Verständigung auf die wesentlichen Themen und Aspekte, eine konsistente und konsolidierte Bereitstellung der benötigten Daten, und deren umfassende Interpretation sowie ausgewogene und unparteiische Bewertung ermöglicht. Die Arbeitsgemeinschaft KOMPASS bildet einen strukturierten und regelmäßig fortgeschriebenen Rahmen, um diesen Austausch zu organisieren. Grundsätzlich ist der Teilnehmerkreis offen und der KOMPASS ein Forum für die wissenschaftliche Diskussion und Meinungsbildung.

Der „Bericht zur Lage der Mobilität in Deutschland“

Erklärtes Ziel des KOMPASS ist es, einen Beitrag zur Erarbeitung des wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Konsens über Bedingungen und Möglichkeiten eines dauerhaft verträglichen Verkehrs zu leisten. Kern dieses Beitrags wird der „Bericht zur Mobilität in Deutschland“ sein, der auf Indikatoren basiert, die in der KOMPASS-Arbeitsgemeinschaft erarbeitet werden. Anhand von etwa 15 Schlüsselindikatoren wird die wirtschaftliche Effizienz, soziale Ausgewogenheit und Umweltverträglichkeit des Verkehrs in Deutschland überprüft. Die Daten werden in ihrer zeitlichen Entwicklung und für unterschiedliche sachliche Differenzierungen dargestellt. Sie werden auf verschiedene Zielwerte bezogen, um so die Bedeutung der Entwicklungen einschätzen zu können. Schließlich werden sie gesamthaft, d.h. unter Abwägung konkurrierender Zielvorgaben, beurteilt und Verbesserungspotential identifiziert. Der Bericht dient sowohl dem Monitoring als auch der ex-ante Identifikation wichtiger Handlungsfelder, er zeigt Verbesserungsmöglichkeiten auf, wie Verkehr ökonomisch effizienter, dauerhaft umweltverträglicher und sozial ausgewogener gestaltet werden kann. Die Ergebnisse von Szenarien und Trendberechnungen werden aufgegriffen. Das DLR-Institut für Verkehrsforschung hat die Koordination und Geschäftsstelle übernommen.

Der KOMPASS-Bericht wird regelmäßig aktualisiert und behandelt unterschiedliche Schwerpunktthemen. Er wird auch im Internet für eine breite Öffentlichkeit zugänglich sein, z.B. Abb. 1.

Verkehrskompass

Newsletter / Kontakt / Impressum / Disclaimer / Suchen

Go

Über den Verkehrskompass

› Nachhaltige Verkehrsentwicklung

› Indikatoren für

Wirtschaft

- › Bruttowertschöpfung
- › Anlagevermögen
- › Beschäftigung

Gesellschaft

- › Erreichbarkeit
- › Aufenthaltsqualität
- › Soziale Disparitäten
- › Gesundheit (Getötete/Verletzte)

Umwelt

- › CO₂-Emissionen/Treibhausgase
- › Lärm
- › Luftschadstoffe
- › Nicht-erneuerbare Ressourcen
- › Biodiversität/Bodenschutz

Über den Verkehrskompass

Der Kompass zeigt auf, welche Wirkungen vom Verkehr auf Gesundheit, Umwelt und Gesellschaft ausgehen. Dabei wird mit Hilfe von Indikatoren gemessen, inwieweit der Verkehr in Deutschland die Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung erfüllt, nämlich

- sozial verträglich,
- wirtschaftlich machbar und
- dauerhaft umweltverträglich zu sein.

Die insgesamt 15 Indikatoren bündeln wiederum unterschiedliche Einzelergebnisse. Diese Daten bilden die Grundlage für eine Bewertung, inwieweit der Sektor Verkehr insgesamt zur Nachhaltigkeit beiträgt. Die Indikatoren repräsentieren die Wirkungen des Verkehrs auf nationaler Ebene, die nach unserem Verfahren als wichtigste identifiziert werden. Maßnahmen oder Handlungsempfehlungen sind genaueren Untersuchungen vorbehalten.

Jeder Indikator wird alle drei Monate bearbeitet und – auf Wunsch – per → Newsletter bekannt gemacht. Neue Erkenntnisse werden laufend eingearbeitet.

Abb. 1: Entwurf für ein KOMPASS-Design im Internet.

Vergleichbare Foren bei europäischen Nachbarn

Im europäischen Ausland bestehen seit mehreren Jahren Foren, in denen sich die wichtigsten Vertreter der Verkehrswissenschaften über die aus ihrer Sicht wesentlichen Themen für eine nachhaltige Verkehrspolitik verständigen und sich auf gemeinsame Methoden und Datensätze einigen, z.B. NTM⁹ für Schweden; NFP41¹⁰ für die Schweiz; TransForum¹¹ für die EU.

Auch für Deutschland zeigen etwa das „Mobilitätspanel“ oder das „Transport- und Rechenmodell TREMOD“, welche beachtliche Integrationskraft wissenschaftliche Projekte entfalten können, deren Methoden und Daten in einem längeren Diskussions- und Prüfprozess von der wissenschaftlichen Community als relevant und quasi verbindlich anerkannt werden. Ähnlich will der KOMPASS einen Beitrag leisten, den wissenschaftlichen Konsens über die Erfordernisse und Handlungsansätze für ein nachhaltiges Verkehrssystem für Deutschland voranzubringen, kontinuierlich und unabhängig von Tagesaktualitäten.

Stand der Arbeiten und weitere Schritte

Am 18. Mai 2005 haben sich auf Einladung des DLR-Institut für Verkehrsforschung Vertreter von 12 verkehrswissenschaftlichen Instituten sowie des Bundesministeriums für Verkehr, Bauen und Wohnen zum Initialworkshop für den KOMPASS getroffen. Unter den Teilnehmern bestand Einigkeit darüber, dass eine interdisziplinäre Behandlung des Themas „Verkehr und Mobilität“ unbedingt notwendig ist, um immer wieder zu beobachtende Einseitigkeiten zu überwinden. Ein erster Meilenstein in der gemeinsamen Arbeit ist die Erstellung eines Prototyps des Berichtes zur Mobilität in Deutschland.

Zusammen mit den Partnern werden die unterschiedlichen Handlungsfelder für ein dauerhaftes Verkehrssystem überprüft und in der gemeinsamen Diskussion überprüft. Exemplarisch werden im folgenden die Vorschläge des Partners ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg zur Umweltverträglichkeit des Verkehrs dargestellt.

Indikatoren für die Umweltverträglichkeit des Verkehrs, am Beispiel der Luftschadstoffe

Ein wichtiges Anliegen von KOMPASS soll sein, Indikatoren auszuwählen, die den (verkehrsbeeinflussten) Umweltzustand repräsentativ beschreiben, die weiterer Beobachtung bedürfen und die diese weitere Beobachtung auch zulassen.

Dieses klingt im Grundsatz sehr einfach – und wäre es auch, wenn nicht „Umweltbeeinträchtigung“ gelegentlich ein sehr komplexes Phänomen wäre, was nachfolgend an drei Beispielen erläutert werden soll.

Beispiel 1: Kohlenmonoxid

Die innerstädtischen CO-Verkehrsemissionen, berechnet mit TREMOD, sind seit 1980 um ca. 80 % zurückgegangen. Die ist hauptsächlich eine Folge der Ausstattung der Otto-Pkw mit Katalysatoren. Während dieser Periode sind die Immissionskonzentrationen an Kohlenmonoxid an verkehrsreichen Straßen ebenfalls um ca. 80 % zurückgegangen (Abb. 2). Der 8-Stunden-Mittelwert von 10 mg/m³, gültig seit Anfang 2005, wird in Deutschland sicher eingehalten: Alle Messwerte liegen mindestens um die Hälfte unter diesem Grenzwert. Der höchste 8-Stunden-Mittelwert in Baden-Württemberg im Jahr 2003 betrug ca. 4 mg/m³.

⁹ NTM, the Network for Transport and the Environment. <http://www.ntm.a.se/eng-index.asp>

¹⁰ Koordination der Verkehrsforschung im Dienste einer nachhaltigen Verkehrspolitik. <http://www.aramis-research.ch/d/2238.html>

¹¹ TransForum – Scientific forum on transport forecast validation and policy assessment (<http://www.transforum-eu.net/>)

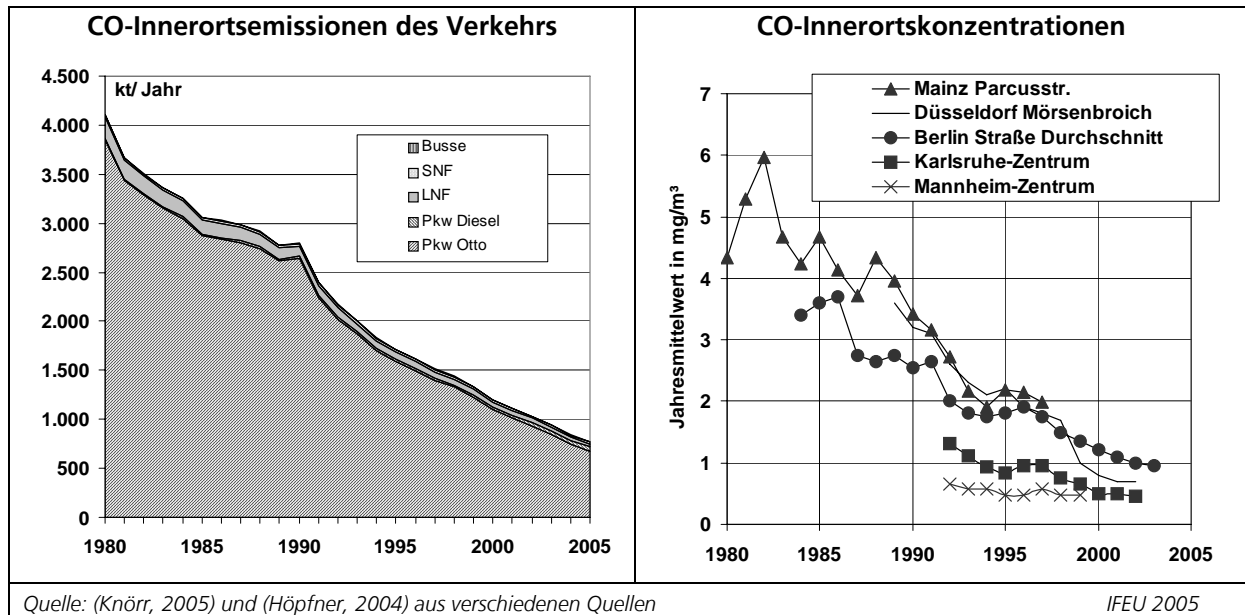


Abb. 2: Emissionen und Immissionen von Kohlenmonoxid

Als Fazit kann festgehalten werden: Die EU-Umweltnormen für Kohlenmonoxid werden sicher erfüllt. Der Umweltindikator „CO-Emissionen im Stadtverkehr“ würde in seinem Zeitverlauf ebenso zielführend verwendet werden können wie die Absolutwerte der Immissionsmessung und deren Zeitverlauf. Etwaige Verschlechterungen einer Umweltsituation könnten somit sehr gut durch reale Messungen sowie durch Emissionsberechnungen dargestellt werden.

Beispiel 2: Benzol

Die Benzolemissionen des innerstädtischen Verkehrs, berechnet mit TREMOD, sind in Deutschland ebenfalls erheblich zurückgegangen, und zwar seit 1990 um ca. 90 %. Gründe dafür sind der Rückgang der Fahrleistung der Pkw mit 2-Taktmotoren, die Einführung von Katalysatoren sowie der abnehmende Benzol-Gehalt im Benzin. Während dieser Periode sind die gemessenen Benzolkonzentrationen ebenso um ca. 90 % zurückgegangen. Der ab dem Jahr 2010 gültige Grenzwert (Jahresmittelwert) liegt bei 5 µg/m³. Bereits heute liegen die höchsten Werte in Deutschland höchstens halb so hoch wie dieser EU-Grenzwert.

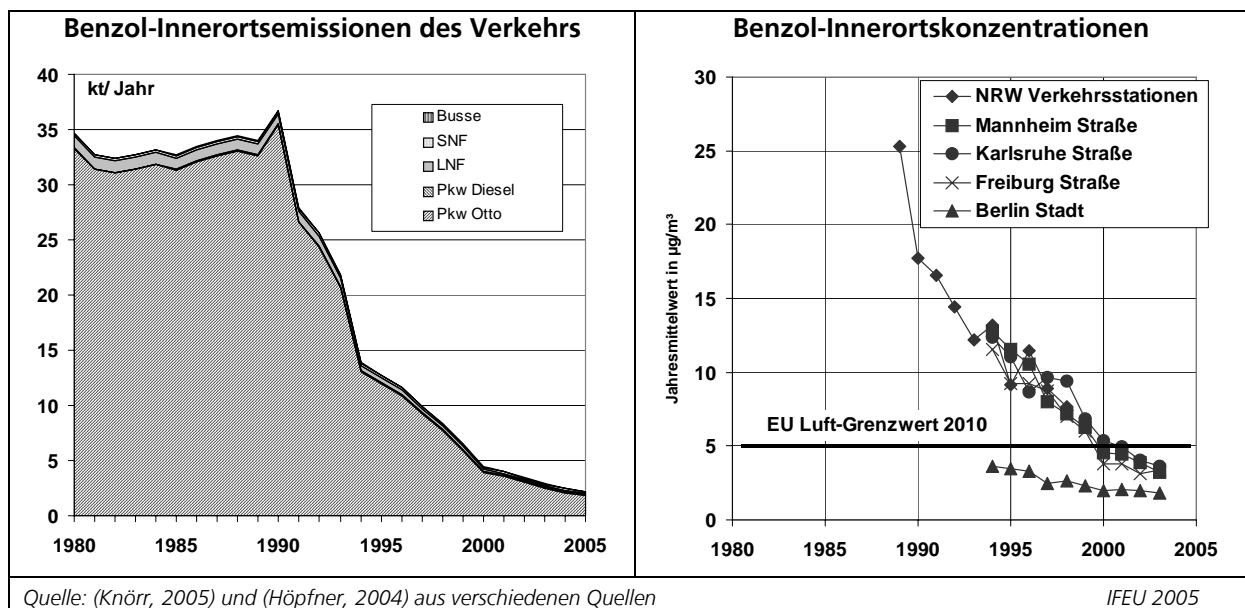


Abb. 3: Emissionen und Immissionen von Benzol

Als Fazit kann festgehalten werden: Die EU-Umweltnormen für Benzol werden sicher erfüllt. Der Umweltindikator „Benzolemissionen im Stadtverkehr“ würde in seinem Zeitverlauf ebenso zielführend verwendet werden können wie die Absolutwerte der Immissionsmessung und deren Zeitverlauf. Etwaige Verschlechterungen einer Umweltsituation, geänderte Auffassungen der Schädlichkeit von Benzol oder Veränderungen in der Grenzwertsetzung könnten somit sehr gut durch reale Messungen sowie durch Emissionsberechnungen dargestellt werden.

Beispiel 3: Stickoxide

Stickoxide (NO_x) ist eine Sammelbezeichnung für Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂). Die Abgasemissionsgrenzwerte sind für die Summe beider Schadstoffe festgelegt. Für die Luftqualität jedoch ist NO₂ wichtiger, da es für die menschliche Gesundheit höhere Relevanz hat. Die berechneten Emissionen der gesamten verkehrsbedingten NO_x sind seit 1980 um ca. 60 % zurückgegangen. Diese Reduktion kann hauptsächlich den Otto-Fahrzeugen zugesprochen werden, die mit Katalysatoren ausgestattet worden sind.

Die in verkehrsreichen Straßen gemessenen NO_x-Immissionen sind seit 1990 ebenfalls um ca. 50 % zurückgegangen (s. Abb. 4). Der Rückgang der berechneten NO_x-Emissionen wird demnach näherungsweise durch den gemessenen Rückgang der Immissionen abgebildet.

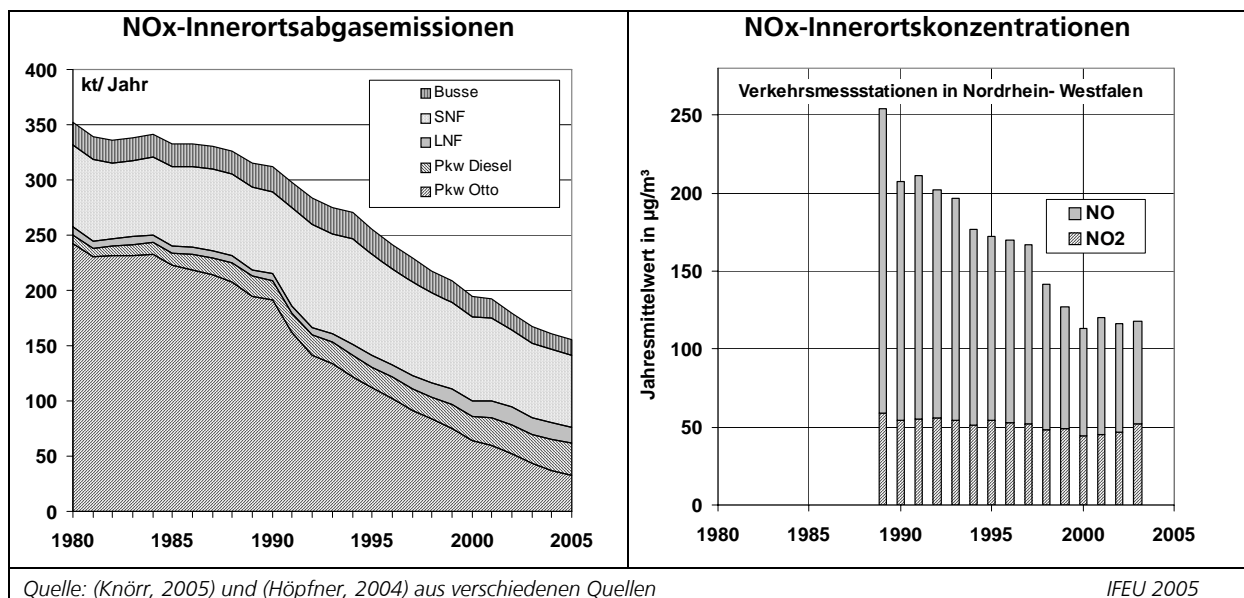


Abb. 4: Emissionen und Immissionen von Stickoxiden

Ein näherer Blick zeigt allerdings, dass zwar die NO-Konzentrationen an verkehrsreichen Straßen während der letzten Jahre stark abgenommen haben, dass die NO₂-Konzentrationen jedoch konstant geblieben sind oder in einigen Fällen sogar angestiegen sind. Die Luftgrenzwerte für 2010 von 40 µg/m³ werden derzeit an vielen Verkehrsstationen in Deutschland überschritten (Abb. 5a).

Demnach ist in der Immission eine Verschiebung des Anteils von NO₂ am gesamten NO_x erfolgt, insbesondere an Hauptstraßen. Aber auch an anderen Straßen und im gesamten Innerortsbereich wurde ein Anstieg der NO₂-NO_x-Verhältnisse festgestellt.

Für dieses, erst in den letzten beiden Jahren thematisierte Phänomen, gibt es zwei wichtige Erklärungsmuster:

- In den Städten steht mehr Ozon zur Bildung von NO₂ aus NO zur Verfügung als früher. In der Tat stieg der Mittelwert der Ozonkonzentrationen in den Städten über die Jahre an.
- Die Emissionen der Fahrzeuge weisen heute ein höheres NO₂ zu NO-Verhältnis auf als früher. In der Tat zeigen Prüfstandsmessungen, dass Diesel-Fahrzeuge mit Oxidationskatalysator recht hohe NO₂-Emissionen verursachen (Abb. 5b). Das gilt leider auch Busse mit einem CRT-Filter gegen Partikelemissionen.

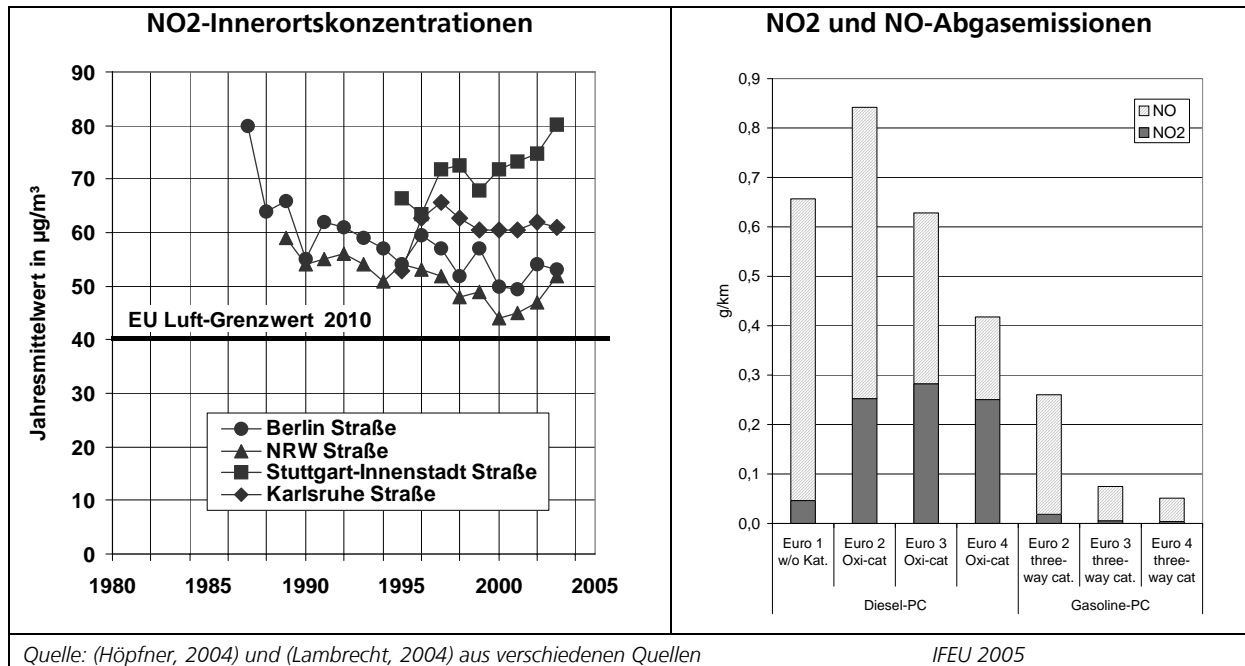


Abb. 5: Emissionen und Immissionen von Stickoxiden

Aktuellen Fachdiskussionen zufolge treffen beide Mechanismen zu. Die Schadstoffminderung steht vor einer neuen Herausforderung.

Als Fazit kann festgehalten werden: Die EU-Umweltnormen für NO₂ werden mit großer Sicherheit bis zum Jahr 2010 nicht erfüllt werden. Der bisher gängige Umweltindikator „Stickoxidemissionen im Stadtverkehr“ trug mit seinen rechnerisch simulierten und in der Immissionsmessung auch nachvollzogenen Minderungsraten nicht zur Erfassung der wirklich beobachteten NO₂-Belastung bei. Denn bisher nicht beachtete oder nicht bekannte Phänomene sowohl der Reaktion mit anderen Luftschadstoffen als auch der geänderten Emissionssituation führten zu einer hohen Belastung, obwohl Minderungen vorhergesagt worden waren. Einen verlässlichen Indikator für die NO₂-Belastung gibt es bisher nur über die reale Messung. Einen prognostisch oder szenarienhaft einsetzbaren Indikator gibt es wegen der unklaren Kausalitäten bisher nicht. Daran wird gearbeitet.

Zusammenfassung

KOMPASS soll auch wichtige Indikatoren auswählen, die den (verkehrsbeeinflussten) Umweltzustand repräsentativ beschreiben, die weiterer Beobachtung bedürfen und die diese weitere Beobachtung auch zulassen. Dafür wurden drei Beispiele aufgeführt: Kohlenmonoxid und Benzol werden insbesondere von Kfz im Straßenraum emittiert und werden – ohne größere Umwandlungen zu erleiden – in diesem Zustand als Immission gemessen. Fortschreibungen können über die Berechnungen der Emissionen vorgenommen werden. Sie sind als identische Substanzen seitens der Gesetzgebung zur Begrenzung der Emission der Kfz wie auch über die Gesetzgebung zur Luftqualität reglementiert. Damit ist ihre Tauglichkeit als Indikator zur Beschreibung des verkehrsbeeinflussten Umweltzustandes gegeben.

Bei den Stickoxiden werden Rückgänge der Emissionen aus den Kfz und der Immissionen im Straßenraum registriert. Diese treffen aber nicht den Kern der Sache, weil geänderte Umweltbedingungen und Abgaszusammensetzungen zu höheren NO₂-Anteilen als früher führten. Früher gängige Indikatoren müssen revidiert werden.

Somit kann und soll ein Verkehrskompass dazu beitragen, nicht nur das bisher weitgehend Bekannte aufzulisten, sondern auf neue Entwicklungen und Erkenntnisse hinweisen und Methoden der Berücksichtigung zu entwickeln. Das wurde hier für Stickstoffdioxid gezeigt, gilt aber ebenso auch für Feinstaub und Ozon.

Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrtagentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten sowie für die internationale Interessenswahrnehmung zuständig.

In 31 Instituten und Einrichtungen an den acht Standorten Köln-Porz, Berlin-Adlershof, Bonn-Oberkassel, Braunschweig, Göttingen, Lampoldshausen, Oberpfaffenhofen und Stuttgart beschäftigt das DLR ca. 5.100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

Das DLR unterhält Außenbüros in Brüssel, Paris und Washington D.C.

Die Mission des DLR umfasst die Erforschung von Erde und Universum, Forschung für den Erhalt der Umwelt und umweltverträgliche Technologien zur Steigerung der Mobilität sowie für Kommunikation und Sicherheit. Das Forschungsportfolio des DLR reicht von der Grundlagenforschung zu innovativen Anwendungen und Produkten von morgen. So trägt das im DLR gewonnene wissenschaftliche und technische Know-how zur Stärkung des Industrie- und Technologiestandortes Deutschland bei. Das DLR betreibt Großforschungsanlagen für eigene Projekte sowie als Dienstleistung für Kunden und Partner. Darüber hinaus fördert das DLR den wissenschaftlichen Nachwuchs, betreibt kompetente Politikberatung und ist eine treibende Kraft in den Regionen seiner Standorte.



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Programmdirektion Verkehr

Linder Höhe
51147 Köln

www.DLR.de