

# **Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten**

Von der Fakultät  
Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Thomas Wiltschko**  
aus Schwäbisch Gmünd

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. W. Möhlenbrink

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. W. Ressel

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Dezember 2003

Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen  
Universität Stuttgart  
2004



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 12

Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. Thomas Wiltschko,  
Schwäbisch Gmünd

Nr. 570

**Sichere Information  
durch infrastruktur-  
gestützte Fahrer-  
assistenzsysteme zur  
Steigerung der  
Verkehrssicherheit an  
Straßenknotenpunkten**

**VDI Verlag**

Wiltschko, Thomas

## **Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 570. Düsseldorf: VDI Verlag 2004.

188 Seiten, 78 Bilder, 37 Tabellen.

ISBN 3-18-357012-2, ISSN 0178-9449,

€ 57,00 / VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

**Für die Dokumentation:** Informationsqualität – Qualitätsmodell – Qualitätsmerkmale – Qualitätsmanagement – Prozessbegleitende Informationskette – Systemanalyse – Sicherer Betrieb – Fahrerassistenzsysteme – Unfallanalyse – Verkehrssicherheit

Zukünftige Fahrerassistenzsysteme benötigen eine Vielzahl von Informationen zur Erkennung kritischer Verkehrssituationen. Die alleinige Erfüllung der technischen Zuverlässigkeit ist für die Gewährleistung des sicheren Betriebs nicht ausreichend. Ebenso muss die geforderte Qualität der Informationen sichergestellt werden. In der Arbeit wird ein Qualitätskonzept für Informationen aufgestellt, das einen festen Satz von Qualitätsmerkmalen zur einheitlichen Beschreibung der Informationsqualität nutzt. Über ein Analyseverfahren erfolgt die probabilistische Bewertung der Informationsqualität innerhalb der gesamten Informationskette. Am Beispiel eines infrastrukturgestützten Kreuzungsassistenten wird das Qualitätskonzept angewandt und aufgezeigt, dass durch die Integration geeigneter Informationen und Qualitätssicherungsmaßnahmen „Sichere Informationen“ bereitgestellt werden können. Das Qualitätskonzept ist für alle informationsverarbeitenden Systeme konzipiert und kann bereits in der Systementwurfphase eingesetzt werden.

### **Die Reihen der FORTSCHRITT-BERICHTÉ VDI:**

- |  |  |
|--|--|
| <b>1</b> Konstruktionstechnik/Maschinenelemente  | <b>13</b> Fördertechnik/Logistik   |
| <b>2</b> Fertigungstechnik                       | <b>14</b> Landtechnik/Lebensmitteltechnik  |
| <b>3</b> Verfahrenstechnik                       | <b>15</b> Umwelttechnik  |
| <b>4</b> Bauingenieurwesen                       | <b>16</b> Technik und Wirtschaft   |
| <b>5</b> Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe       | <b>17</b> Biotechnik/Medizintechnik  |
| <b>6</b> Energietechnik                          | <b>18</b> Mechanik/Bruchmechanik   |
| <b>7</b> Strömungstechnik                        | <b>19</b> Wärmetechnik/Kältetechnik  |
| <b>8</b> Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik | <b>20</b> Rechnerunterstützte Verfahren<br>(CAD, CAM, CAE, CAP, CAQ, CIM, . . .) |
| <b>9</b> Elektronik/Mikro- und Nanotechnik       | <b>21</b> Elektrotechnik   |
| <b>10</b> Informatik/Kommunikation               | <b>22</b> Mensch-Maschine-Systeme  |
| <b>11</b> Schwingungstechnik                     |  |
| <b>12</b> Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik        |  |

D 93

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2004

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9449

ISBN 3-18-357012-2

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart. Für die Anregung und die Betreuung dieser Arbeit möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Möhlenbrink herzlich bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel danke ich für die Übernahme des Mitberichts.

Bedanken möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen für das bewiesene Interesse und die gezeigte Diskussionsbereitschaft. Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dipl.-Ing. Andreas Eichhorn, Herrn Dipl.-Ing. Roland Bettermann und Herrn Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Familie für die große Geduld, das entgegengebrachte Verständnis und die fortwährende Unterstützung bedanken. Meinen Eltern möchte ich an dieser Stelle herzlich für die Unterstützung und Förderung meiner Ausbildung und meiner wissenschaftlichen Arbeit danken. Und schließlich gilt mein Dank allen Freunden und Bekannten, die durch ihr Interesse und ihre Ermunterungen ebenso zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

*Für Sylvia, Sarah und meine Eltern*

# Inhalt

<b>Kurzfassung.....</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Analyse des Verkehrs- und Unfallgeschehens.....</b>	<b>4</b>
2.1 Einleitung .....	4
2.2 Die Verkehrssituation als Analyseeinheit .....	5
2.2.1 Klassifikationsschema für Verkehrssituationen .....	5
2.2.2 Modellierung des Unfallgeschehens über Verkehrssituationen .....	8
2.3 Verwendung polizeilicher Unfalldaten in der Unfallanalyse .....	9
2.3.1 Dokumentation der Unfälle durch die Polizei .....	10
2.3.2 Unfallanalyse anhand der originären polizeilichen Unfalldaten .....	11
2.4 Situationsbezogene Verkehrs- und Unfallanalyse.....	15
2.4.1 Klassifizierung der Unfallsituationen anhand polizeilicher Unfalldaten .....	15
2.4.2 Analyse der Unfallsituationen .....	16
2.4.3 Unfallkosten.....	19
2.4.4 Unfallrisiko .....	24
2.4.5 Fehlverhalten in Unfallsituationen .....	28
2.5 Ergebnisse.....	32
<b>3 Assistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit.....</b>	<b>35</b>
3.1 Aufgaben der Fahrzeugführung.....	35
3.2 Ansatz einer systematischen Einteilung von Fahrerassistenzsystemen.....	37
3.3 Anforderungen an die Informationsqualität von Fahrerassistenzsystemen.....	43
3.4 Sicherheitssteigernde Assistenzsysteme für den Stadtverkehr.....	46
<b>4 Qualität und Zuverlässigkeit sicherheitsrelevanter Systeme.....</b>	<b>52</b>
4.1 Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit .....	52
4.2 Zuverlässigkeits- und Sicherheitskonzepte im Maschinen- und Anlagenbau .....	55
4.3 Zuverlässigkeits- und Sicherheitskonzepte für Fahrzeugsysteme im Straßenverkehr .....	56
4.4 Standardisierte Verfahren der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse .....	59
4.5 Zuverlässigkeits- und Sicherheitskonzepte von IT-Systemen.....	64
4.6 Qualitätsmodelle für Geodaten.....	66
<b>5 Ein Konzept zur Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität informationsverarbeitender Systeme .....</b>	<b>72</b>
5.1 Problemstellung.....	72
5.2 Daten und Informationen.....	74

5.3	Qualitätsmodell für Informationen .....	76
5.3.1	Qualitätsmerkmale .....	77
5.3.2	Qualitätsparameter .....	86
5.3.3	Zusammenfassung .....	89
5.4	Verfahren zur Analyse der Informationsqualität .....	89
5.4.1	Mathematische Grundlagen der Booleschen Modellbildung .....	90
5.4.2	Das Informationsflussdiagramm .....	92
5.4.3	Abhängigkeiten zwischen den Qualitätsmerkmalen im Informationsfluss .....	96
5.4.4	Ein Rechenverfahren zur Bewertung der Informationsqualität .....	100
5.4.5	Beispiele .....	113
5.5	Generierung von „Sicherer Information“ .....	125
<b>6</b>	<b>Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität am Beispiel des Ampel- und Vorfahrterkenners .....</b>	<b>131</b>
6.1	Einleitung .....	131
6.2	Informationsquellen .....	131
6.3	Qualität der Eingangsdaten .....	134
6.4	Anforderungen an die Qualität der fahrerunterstützenden Information .....	139
6.5	Analyse der Informationsqualität verschiedener Systemansätze .....	141
6.5.1	Systemmodellierung .....	141
6.5.2	Fahrzeugautonome Systemansätze .....	141
6.5.3	Infrastrukturgestützte Systemansätze .....	148
6.6	Ergebnis .....	155
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>156</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>159</b>
Anhang A	Klassifikationsschema für Verkehrssituationen .....	159
Anhang B	Boolesche Algebra .....	160
Anhang C	Wahrscheinlichkeit für mvn- und m,n-Systeme mit unterschiedlichen Eingangswahrscheinlichkeiten .....	162
	<b>Glossar .....</b>	<b>164</b>
	<b>Abkürzungen .....</b>	<b>167</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>168</b>



## **Kurzfassung**

Die Entwicklungen im Bereich der Fahrerassistenzsysteme führen zunehmend zu Systemen, die den Fahrer auf der Bahnführungsebene unterstützen. Diese Systeme sind geprägt von direkten oder indirekten Eingriffen in den Fahrprozess und damit als sicherheitsrelevante Fahrzeugsysteme einzuordnen, für deren Betrieb hohe Anforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit zu stellen sind. Um eine angemessene Fahrerunterstützung zu realisieren, ist die umfassende Erfassung und Interpretation des Verkehrsgeschehens notwendig und damit eine Vielzahl von Informationen und Informationsquellen zu integrieren. Dies gilt insbesondere für die komplexen Verkehrssituationen an innerstädtischen Knotenpunkten.

Als informationsverarbeitendes System können die Anforderungen dabei nicht allein auf die technische Zuverlässigkeit des Systems und der Systemkomponenten beschränkt werden. Die Forderung des sicheren Betriebs überträgt sich ebenso auf die im System enthaltenen und ausgegebenen Informationen. Die Informationen müssen eine geforderte Qualität erreichen, damit über die gesamte Verwendungsdauer der Informationen keine Gefährdung vom System ausgeht. Hierbei zeigt sich, dass keines der existierenden Modelle und den damit in Verbindung stehenden Methoden in den verschiedenen Fachbereichen eine einheitliche Beschreibung der Qualität von Informationen in Fahrerassistenzsystemen gestattet.

In der Arbeit wird ein Qualitätskonzept zur Beschreibung und Bewertung der Qualität von Informationen innerhalb informationsverarbeitenden Systemen aufgestellt. Das Qualitätskonzept besteht aus einem Qualitätsmodell und einem Analyseverfahren. Das Qualitätsmodell bildet den Rahmen des Qualitätskonzepts. Über einen festen Satz von Qualitätsmerkmalen erfolgt die einheitliche und objektive Beschreibung sämtlicher auftretender Arten und Typen von Informationen. Zur Konkretisierung und Quantifizierung der Informationsqualität werden geeignete Qualitätsparameter herangezogen.

Mit dem Analyseverfahren erfolgt die Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität innerhalb des Informationsverarbeitungsprozesses des Systems. Das Verfahren orientiert sich an den Zuverlässigkeitsanalyseverfahren Fehlerbaum- und Ereignisablaufanalyse und gliedert sich in einen graphischen und analytischen Teil. Das Informationsflussdiagramm wird zur Modellierung der Informationskette herangezogen. Damit lässt sich der Informationsfluss von Systemen und Systemvarianten anschaulich und leicht verständlich darstellen. Zur Auswertung des Informationsflussdiagramms wird ein probabilistisches Auswerteverfahren aufgestellt, welches die Wahrscheinlichkeit, mit der die Anforderungen an die Qualitätsmerkmale erfüllt werden, nutzt. Die Verwendung des definierten Satzes von Qualitätsmerkmalen ist dafür eine wesentliche Voraussetzung. Die bestehenden Abhängigkeiten zwischen den Qualitätsmerkmalen in der Informationskette werden im Analyseverfahren berücksichtigt. Wesentliche Eigenschaften des Qualitätskonzepts sind die Analyse in verschiedenen Abstraktionsstufen, die Analyse von Systemkomponenten, die Möglichkeit des Vergleichs verschiedener Systemansätze und Systemvarianten sowie die interdisziplinäre Anwendbarkeit. Sämtliche Analysen können bereits anhand des Systementwurfs durchgeführt werden. Über das Analyseverfahren kann die Informationsqualität – in Abhängigkeit der Qualität der Eingangsinformationen und des implementierten Informationsmanagements – dargestellt werden.

Anhand verschiedener Beispiele aus dem Bereich der Fahrzeugortung wird die praktische Anwendung des Analyseverfahrens verdeutlicht. Dazu wird ein System zur DGPS-Messung, eine Ortungskomponente bestehend aus GPS-Empfänger, Tachosignal und Kreisel sowie ein Navigationssystem näher betrachtet. Des Weiteren werden grundlegende Maßnahmen zur Fehlervermeidung und Fehlerbeherrschung aufgezeigt und deren qualitätssteigernder Effekt dargestellt.

Basierend auf der Funktionalität eines Ampel- und Vorfahrterkenners werden verschiedene Systemansätze entworfen und hinsichtlich der Einhaltung der geforderten Informationsqualität untersucht. In einer vorangestellten Verkehrs- und Unfallanalyse werden Verkehrssituationen mit erhöhtem Konfliktpotenzial identifiziert und daraus Wirkungsfelder für Fahrerassistenzsysteme im innerstädtischen Straßenverkehr abgeleitet. Für einen Ampel- und Vorfahrterkenner, der den Fahrer in der Erkennung der Vorfahrtsregelung, wie sie durch Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen angezeigt wird, unterstützt, wird ein Unfallvermeidungspotenzial von bis zu 20% abgeschätzt.

Bei den Systementwürfen werden fahrzeugautonome, infrastrukturgestützte und kombinierte Ansätze untersucht. Fahrzeugautonome Ansätze werden mit Bildverarbeitungssystemen und digitalen Straßenkarten, die ergänzend die Verkehrszeichen als Attribute aufweisen, als Informationsquellen behandelt. Bei den infrastrukturgestützten Ansätzen kommen verschiedene Varianten der Nahbereichskommunikation an Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen zum Einsatz. Das Analyseergebnis zeigt, dass nur durch einen Ansatz mit fahrzeugautonomen und infrastrukturgestützten Komponenten die fahrerunterstützende Information in der geforderten Qualität bereitgestellt werden kann.

## Abstract

Progress of development of driver assistance systems have more and more lead to systems assisting the driver on guidance level. These systems allow direct or indirect driving process contact thus being safety relevant vehicle systems, and their operation requires high safety and reliability standards. To realize the necessary driver assistance, complete collection and interpretation of traffic actions are required and a number of information and information sources has to be integrated, especially in case of traffic situations at junctions in urban areas.

The requirements, however, cannot only be reduced to technical reliability of the system and system components but have also to be extended to the information in- and output thus guaranteeing safe operation. This information has to reach the required quality thus avoiding any hazards during the complete time of information use. It is evident that none of the existing models and methods allow a uniform description of information quality of driver assistance systems.

The thesis shows a quality concept for description and evaluation of information quality within information processing systems. The quality concept consists of a quality model and an analysing procedure. The quality model is the basis of the quality concept. All types of information are described by a fixed set of quality characteristic, and suitable parameters are used for concretion and quantification.

Description and evaluation of information quality is effected by an analysing procedure based on the reliability analysing procedure (fault tree analysis and failure mode and effect analysis) and divided into a graphic and an analytic part. Information flow diagram is used for modelling of information chain. Thus information flow of systems and system variants can be shown easily. For evaluating the information flow diagram a probabilistic evaluation procedure is provided. The defined set of quality characteristics is an essential prerequisite. The consisting dependencies between quality characteristics within the information chain are also considered. Essential properties of the quality concept are the analysis of the different abstraction steps, the analysis of system components, the possibility of comparing of various system sets and system variants as well as the interdisciplinary applicability. All analyses can be already effected by means of the system draft. Information quality depending on the quality of input information and implemented information management can be presented by the analysing procedure.

Various examples of vehicle navigation show the practical application of the analysing procedure, for example a DGPS measurement system, a navigation component consisting of a GPS-receiver, speedometer signal and gyro, and navigation system. Furthermore basic measures for error avoiding and error handling and the quality increasing effects are presented.

Based on the functionality of a traffic signal and right-of-way assistance various system drafts are designed and investigated regarding the required information quality. During an a priori traffic and accident analysis situations with increasing conflict potential are identified and possibilities for driver assistance systems in urban areas derived. An accident avoiding potential of up to 20% is estimated.

Within these drafts on board, infrastructure based, and combined systems are investigated. On board systems are used with imaging systems and digital road maps containing traffic signs as attributes, and serve as information sources. In case of infrastructure based systems various possibilities of short range communication are used. The analysing result shows that only a system with on board and infrastructure based components provides driver assisting information of the required quality.

# 1 Einleitung

Durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen soll die Eintrittswahrscheinlichkeit von kritischen Verkehrssituationen verringert und der Fahrer bei der Bewältigung von kritischen Verkehrssituationen unterstützt werden (ALBUS et al. 1999). Für eine angemessene Fahrerunterstützung an Straßenknotenpunkten ist – aufgrund der Komplexität dieser Verkehrssituationen – eine Vielzahl von Informationen zur Erfassung und Interpretation des Verkehrsgeschehens und zur Identifikation von kritischen Verkehrssituationen notwendig. Dies gilt besonders für den innerörtlichen Straßenverkehr. Es entsteht somit in zunehmendem Maße die Aufgabe Daten von Fahrzeugsensoren, Informations- und Fahrerassistenzsystemen, infrastrukturgestützten Sensoren und Daten, die aus umfangreichen Datenbeständen entnommen und von entsprechenden Informationsdiensten bereitgestellt werden, in zukünftige Fahrerassistenzsysteme zu integrieren.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Assistenzsystem über die Fahrerunterstützung direkt oder indirekt Einfluss auf den Fahrprozess nimmt. Es handelt sich somit um ein sicherheitsrelevantes Fahrzeugsystem, dessen fahrerunterstützende Information eine sicherheitskritische Wirkung aufweist. Für den Einsatz derartiger Systeme sind folglich Informationen erforderlich, die über ihre gesamte Verwendungsdauer einen sicheren Betrieb des Systems gewährleisten. Dazu sind, abhängig von der Wirkungsweise des Assistenzsystems, bestimmte Anforderungen an die Qualität der Information zu richten. Eine Information, die den gestellten Anforderungen genügt, ist eine wesentliche Voraussetzung für den sicheren Betrieb eines Fahrerassistenzsystems und wird im weiteren Verlauf als „Sichere Information“ bezeichnet.

Es ist somit festzuhalten, dass zukünftige Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer in kritischen Verkehrssituationen unterstützen, eine Vielzahl von Informationen unterschiedlichster Herkunft benötigen. Um dem geforderten Sicherheitsniveau zu genügen, ist über die gesamte Informationskette ein durchgängiges Informations- und Qualitätsmanagement notwendig, damit die Bereitstellung der fahrerunterstützenden Information in einer für den Nutzer und Betreiber bzw. Hersteller akzeptablen und geforderten Qualität erfolgen kann. Hierbei zeigt sich das Problem, dass ein einheitliches Modell zur Beschreibung und Bewertung der Qualität sämtlicher in einem Fahrerassistenzsystem auftretenden Daten und Informationen derzeit fehlt. Keine der existierenden Methoden und Modelle in den Fachbereichen Maschinen- und Anlagenbau, Fahrzeugelektronik, Informationstechnologie usw. ermöglicht die Übertragung auf die vorliegende Aufgabenstellung.

Ziel der Arbeit ist die Formulierung einer Methode zur Beschreibung und Bewertung der Qualität von Informationen in einem Fahrerassistenzsystem. Dazu wird ein Qualitätsmodell aufgestellt, das über einen festen Satz von Qualitätsmerkmalen eine einheitliche Beschreibung aller in einem Fahrerassistenzsystem auftretenden Daten und Informationen gestattet. Dies gilt für die verschiedenen Typen von Eingangs- und Ausgangsdaten ebenso wie für sämtliche Daten innerhalb der Informationskette. Daneben wird ein Analyseverfahren entwickelt, das eine Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität über den gesamten Informationsverarbeitungsprozess ermöglicht (Kapitel 5). Das Qualitätskonzept orientiert sich an den vorhandenen Modellen und Konzepten verwandter Fachbereiche

und weist einen engen Bezug zu den Normen und Standards zur Qualität und zu den Verfahren der Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse auf. Eine Übersicht dazu wird in Kapitel 4 gegeben.

Die Unfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland zeigt einen kontinuierlichen Rückgang der Zahl der getöteten Personen im Straßenverkehr. Eine vergleichbar positive Entwicklung ist dagegen bei der Anzahl der Unfälle nicht gegeben. Daneben weist die Unfallstatistik ein deutliches Missverhältnis zwischen Unfällen auf innerörtlichen und Unfällen auf außerörtlichen Straßen auf. Nach BMVBW (2001) ereigneten sich im Zeitraum von 1991 bis 2000 im Mittel 63,7% der Unfälle mit Personenschaden und 59,1% der Unfälle mit Sachschaden innerhalb von Ortschaften. Neben einer weiteren Verbesserung der Verkehrssicherheit auf den außerörtlichen Straßen sind somit verstärkt Maßnahmen notwendig, die zu einer Steigerung der Verkehrssicherheit im Stadtbereich führen.

In der in Kapitel 2 durchgeführten Analyse des Verkehrs- und Unfallgeschehens wird der Frage nachgegangen, an welchen Stellen im Stadtverkehr ein erhöhtes Risiko für das Auftreten von kritischen Verkehrssituationen besteht. Es sollen die Verkehrssituationen identifiziert werden, bei denen über eine Fahrerunterstützung eine signifikante Steigerung der Verkehrssicherheit auf innerörtlichen Straßen erreicht werden kann. Hierzu werden die polizeilichen Unfalldaten eines repräsentativen Teilgebiets von Stuttgart herangezogen und über eine Klassifikation der Unfallsituationen u.a. eine Abschätzung des Unfallrisikos standardisierter Verkehrssituationen vorgenommen. Eine Abschätzung des Sicherheitssteigerungspotenzials zeigt für ein Fahrerassistenzsystem, welches den Fahrer in der richtigen Erkennung der Vorfahrtsregelung wie sie durch Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen angezeigt wird, ein Unfallvermeidungspotenzial von bis zu 20% für den innerörtlichen Straßenverkehr. Da einem Straßenverkehrsunfall generell eine Gefährdungssituation vorausgeht und der Unfall immer mit einem Schaden verbunden ist, kann damit auch von einer entsprechenden Reduktion der Gefährdungen und einer Verminderung der Unfallschäden ausgegangen werden. Die Untersuchung behandelt hierbei ausschließlich das kollektive Risiko. Dies gilt ebenso für die Betrachtung der Versagenswahrscheinlichkeit hinsichtlich der Anforderungen an die einzelnen Qualitätsmerkmale und dem damit verbundenen Systemversagen eines Fahrerassistenzsystems bezüglich der Informationsbereitstellung.

Eine Vorstellung verschiedener sicherheitssteigernder Fahrerassistenzsysteme für den Stadtverkehr erfolgt in Kapitel 3. Daneben wird eine Einführung in das Thema Fahrerassistenz gegeben und ein Ansatz zur systematischen Einteilung von Fahrerassistenzsystemen vorgestellt. Anhand der differenzierbaren Ausprägungen eines Fahrerassistenzsystems werden die Anforderungen, die an die Qualität der fahrerunterstützenden Information zu richten sind, um der Forderung einer sicheren Information und dem damit verbundenen sicheren Betrieb des Systems entsprechen zu können, diskutiert. Am Beispiel eines Ampel- und Vorfahrterkenners, als eine mögliche Variante eines sicherheitssteigernden Fahrerassistenzsystems, wird in Kapitel 6 die Anwendung des im Rahmen dieser Arbeit formulierten Qualitätskonzepts vorgestellt. Hierbei zeigt sich, dass erst durch die Hinzunahme von infrastrukturgestützten Komponenten die fahrerunterstützende Information zur Vorfahrtsregelung in der für den sicheren Betrieb des Systems erforderlichen Qualität bereitgestellt werden kann.

Die Betrachtungen zu den Fahrerassistenzsystemen in der vorliegenden Arbeit beschränken sich auf die ingenieurmäßige Fragestellung des Systementwurfs von Fahrerassistenzsystemen bezüglich der Erfüllung der gewünschten Funktionalität und Bereitstellung der fahrerunterstützenden Information in der erforderlichen Qualität. Juristische, ökonomische und (verkehrs-)psychologische Fragestellungen wie z.B. die Problematik der Produkthaftung, gesetzlich notwendige Rahmenbedingungen, Risikokompensation durch geändertes Fahrerverhalten, Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Informationsübermittlung etc. bleiben unberücksichtigt.

## 2 Analyse des Verkehrs- und Unfallgeschehens

### 2.1 Einleitung

Mit dem Ziel einer nachhaltigen und signifikanten Steigerung der Fahr- und Verkehrssicherheit im innerstädtischen Straßenverkehr muss vorab geklärt werden, an welchen Stellen ein erhöhtes Konfliktpotenzial besteht. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel eine Verkehrs- und Unfallanalyse vorgestellt, die Hinweise auf bestehende Konfliktfelder gibt<sup>1</sup>. Im Hinblick auf den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen liegt der Schwerpunkt der Betrachtungen beim Fahrer bzw. dem Fahrerverhalten. Es soll insbesondere untersucht werden, in welchen Situationen im innerstädtischen Straßenverkehr der Fahrer wiederholt in Konfliktsituationen gerät, die eine Fahrerunterstützung rechtfertigen.

Nach KLEBELSBERG (1982) können die *Konfliktsituationen* in Abhängigkeit der Ereignishäufigkeit in Fahrfehler, Verkehrsverstoß, Verkehrskonflikt, Beinaheunfall und Unfall eingeteilt werden. Der Fahrfehler und der Verkehrsverstoß bilden die am häufigsten auftretenden Konfliktsituationen, die in der Regel aber folgenlos bleiben. Der Unfall ist das Resultat eines Verhaltensfehlers, bei dem es zu einer Kollision mit entsprechenden Sach- und evtl. Personenschäden kommt. Beim Verkehrskonflikt und dem Beinaheunfall liegt eine Gefahrensituation vor, in der sich Verkehrsteilnehmer räumlich und zeitlich so annähern, dass eine erhöhte Kollisionsgefahr besteht (ERKE & ZIMOLONG 1978).

Die gewählte Untersuchungsmethodik ist so angelegt, dass der *Unfall* als Konfliktsituation herangezogen wird. Dies hat den Vorteil, dass genau die Konfliktsituation betrachtet wird, die aufgrund des höchsten Gefährdungsgrads das größte Sicherheitssteigerungspotenzial aufweist. Des Weiteren entfällt eine aufwändige Beobachtung von anderen Konfliktsituationen, da die Unfalldaten der Polizei genutzt werden können. So sehen u.a. SCHNÜLL & RICHTER (1994), trotz verschiedener Entwicklungen in der Analyse der Verkehrssicherheit, die maßgeblich von der Verkehrskonflikttechnik (u.a. ZIMOLONG 1982, ERKE & GSTALTER 1985, PFUNDT et al. 1986) und der Risikoanalyse (BALD 1991, DURTH & BALD 1997) geprägt sind, weiterhin die Unfallanalyse als das praktikabelste Verfahren. Die Unfallanalyse basiert auf der Betrachtung der Straßenverkehrsunfälle. Im Gegensatz dazu erfolgt bei der Verkehrskonflikttechnik und Risikoanalyse eine Beobachtung und Analyse der nicht zum Unfall führenden Konfliktsituationen.

Im Hinblick auf die Erschließung von Einsatzfeldern zukünftiger Fahrerassistenzsysteme ist eine detaillierte Betrachtung des Unfallgeschehens im Stadtverkehr notwendig, die über die makroskopische Betrachtungsweise der (amtlichen) Unfallstatistik hinausgeht. Über eine mikroskopische Betrachtung des Unfallgeschehens anhand der polizeilichen Unfalldaten können Problemfelder innerhalb des städtischen Straßenverkehrs identifiziert werden, die bei einer makroskopischen Betrachtungsweise verschlossen bleiben (SCHNÜLL & RICHTER 1994). Durch die Modellierung des Unfallgeschehens anhand *standardisierter Verkehrssituationen* wird das komplexe städtische Unfallgeschehen einer systematischen Betrachtung zugänglich gemacht. Dabei beschränkt sich die

---

<sup>1</sup> Die Untersuchungen gehen auf das Teilprojekt „Verkehrsanalyse im Ballungsraum“ innerhalb des Projekts „Kreuzungsassistent“ zurück, das im Auftrag der DaimlerChrysler AG bearbeitet wurde.



Untersuchung auf eine rein ingenieurmäßige Betrachtung des Unfallgeschehens – auf psychologische Fragestellungen wird nicht eingegangen.

Die Mehrzahl der vorhandenen Untersuchungen zur Verkehrssicherheit basieren ebenso wie die hier vorgestellte Untersuchung auf die Analyse der Straßenverkehrsunfälle. Dabei zeigt sich häufig eine Eingrenzung der Untersuchung auf bestimmte Personengruppen wie Fußgänger, Radfahrer, junge oder alte Verkehrsteilnehmer (u.a. BERBUIR 1999, RÜHLE 1996, HÜLSEN 1994) oder bestimmte Straßen- und Knotentypen wie Autobahnen, innerstädtische Hauptstraßen, Kreisverkehrsplätze, lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte (u.a. TOPP 1986, BRILON 1997, BRENNER et al. 1997). Untersuchungen, die das ganzheitliche Unfallgeschehen im Stadtverkehr behandeln, sind zumeist älteren Datums (u.a. ARAND et al. 1983, MENSEBACH 1970). Weiter auffällig für diese Untersuchungen sind die meist durchgeführten Vorher-Nachher- und Mit-Ohne-Vergleiche, die insbesondere zur Beurteilung von Maßnahmen zur Beseitigung von Unfallschwerpunkten herangezogen werden (vgl. FGSV 1991). Auf eine Vorstellung der wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse dieser Untersuchungen wird an dieser Stelle verzichtet. Die notwendigen Verweise werden im Laufe der Arbeit an den entsprechenden Stellen gegeben.

## **2.2 Die Verkehrssituation als Analyseeinheit**

Die komplexe Tätigkeit des Autofahrens ist nach BENDA et al. (1983) als eine Kette von Interaktionen zwischen dem System Fahrer-Fahrzeug und seiner sich kontinuierlich ändernden Umgebung zu sehen. Für eine systematische Analyse ist es erforderlich diese komplexe Aufgabe in überschaubare und abgrenzbare Teilaufgaben zu zerlegen. Eine solche, in Raum, Zeit und Verhalten abgrenzbare Einheit (ERKE & WESSEL 1985) bildet die *Verkehrssituation*, die nach BENDA (1977 und 1983) als „Umgebung des Mensch-Maschine-Systems Fahrer-Fahrzeug aus Fahrersicht“ definiert ist. Mit der Einteilung des Straßenverkehrs in Verkehrssituationen werden neben Merkmalen aus der Infrastruktur (Straßenausbau, Knotenpunktregelung usw.) auch die sich speziell aus der Fahrt ergebenden Fahrtrichtungsänderungen berücksichtigt. Bei einer ausschließlich auf das Straßennetz bezogenen Bildung von Streckenabschnitten fehlt der Bezug zur Fahraufgabe. Im Hinblick auf Fahrerassistenzsysteme kommt besonders der Fahraufgabe eine zentrale Bedeutung zu. Andererseits besteht die Notwendigkeit, die einzelnen Fahraufgaben dem Straßennetz zuordnen zu können. Somit ist mit der Modellierung des Verkehrsablaufs durch Verkehrssituationen eine Methodik vorhanden, die die Verkehrssituation als Analyseeinheit in den Mittelpunkt stellt und die Wechselwirkungen zu dem Fahrerumfeld berücksichtigt.

### **2.2.1 Klassifikationsschema für Verkehrssituationen**

In BENDA (1977) ist ein Klassifikationsschema für Verkehrssituationen formuliert, welches von einer vollständigen und eindeutigen Zuordnung der Situationen ausgeht. Über insgesamt 14 Kategorien mit bis zu zehn Ausprägungen werden über den Straßentyp und -ausbau, die Trasse, den Sicht- und Straßenzustand, den Verkehrsablauf und das Verhalten die Verkehrssituationen beschrieben. Mit den daraus resultierenden ca. 3 Millionen verschiedenen Verkehrssituationen ist die Anwendbarkeit des Klassifikationsschemas von Benda stark eingeschränkt, weshalb von FASTENMEIER

(1995) ein modifiziertes Klassifikationsschema vorgeschlagen wird. Dazu werden selten auftretende Kategorien und Ausprägungen gestrichen, redundante Beschreibungen vermieden (wie zum Beispiel Angaben zu Niederschlag und Reibbeiwert) und Gefahren durch äußere Umstände, andere Verkehrsteilnehmer und den Fahrer selbst entnommen. Im Ergebnis ergibt sich ein Klassifikationsschema, bestehend aus 8 Kategorien mit bis zu 7 Ausprägungen, deren ausführliche Beschreibung in Anhang A enthalten ist. Das Klassifikationsschema wurde von FASTENMEIER (1995) im Wesentlichen zur Konstruktion repräsentativer Versuchsstrecken, bei der Beobachtung und Zuordnung des Fahrerverhaltens und der Beschreibung der Aufgabenkomplexität angewandt.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen erfolgt eine weitere Ausdünnung des Klassifikationsschemas. Mit der Beschränkung auf den Stadtverkehr entfallen die Kategorien *Autobahn* und *Landstraße*. Ferner wird bei der Kategorie *City* nicht zwischen Straßen mit und ohne eingelassene Schienen unterschieden. Im Hinblick auf die Modellierung des Unfallgeschehens durch Verkehrssituationen anhand der polizeilichen Unfalldaten werden die Kategorien *Horizontal*, *Vertikal* und *Engstellen* entnommen. Die Durchsicht der Unfalldaten hat gezeigt, dass diese Merkmale nicht konsequent erfasst werden. Dies liegt zum einen an der subjektiven Einschätzung des Vorliegens eines dieser Merkmale, zum anderen werden diese Merkmale meist nur dann protokolliert, wenn ein unmittelbarer Zusammenhang<sup>1</sup> zum Unfall besteht. Der Einfluss dieser zum Unfall mit aufgenommenen Bezugsdaten auf das Unfallgeschehen ist folglich nicht gesichert (vgl. HANDKE 1996).

Somit wird für den weiteren Verlauf ein Klassifikationsschema, bestehend aus den drei **Situations-  
elementen**

- **Straßentyp**
- **Knotentyp**
- **Fahrtrichtung**

festgesetzt, deren Ausprägungen aus der Tabelle 2-1 ersichtlich sind. Eine **Verkehrssituation** wird durch die Kombination der drei Situationselemente gebildet und im Folgenden auch als *standardisierte Verkehrssituation* bezeichnet. Sie stellt einen begrenzten Ausschnitt aus dem Verkehrsgeschehen dar, die der Fahrer als solche erlebt und in seiner zeitlichen und räumlichen Begrenzung erfährt. Die Definition stellt dabei das Erleben „aus Fahrersicht“ in den Vordergrund und berücksichtigt neben den *baulichen Merkmalen* und der *Verkehrsregelung* (Straßenausbau und Knotenpunktart) auch die *Fahrtroute* (Fahrtrichtungsänderung).

Mit diesem Klassifikationsschema für Verkehrssituationen kann das Verkehrsgeschehen entlang einer Fahrtroute durch eine Folge von Verkehrssituationen beschrieben werden. In Abbildung 2-1 sind zwei Fahrtrouten dargestellt, anhand derer die Modellierung des Verkehrsgeschehens exemplarisch aufgezeigt werden soll. Des Weiteren ist in der Abbildung ein Ausschnitt einer Straßenkarte zu sehen, in der die Straßen und Knotenpunkte, entsprechend dem Klassifikationsschema für Verkehrssituationen, klassifiziert sind. Da mit Ausnahme der schildergeregelten Knotenpunkte, bei denen es von der Fahrtroute abhängt, ob der Fahrer vorfahrtsberechtigt (K3) oder wartepflichtig (K4) ist, die beiden Situationselemente routenunabhängig wirken, kann eine Attributierung der

---

<sup>1</sup> Zum Beispiel bei einem Unfall auf einer Gefällstrecke, bei dem als Unfallursache Straßenglätte vorliegt

Straßen und Knotenpunkte entsprechend dem Klassifikationsschema für Verkehrssituationen vorge-  
nommen werden.

Tabelle 2-1: *Klassifikationsschema für Verkehrssituationen zur Analyse des Verkehrs- und Unfallgeschehens im Stadtverkehr*

Situations- element	Code	Beschreibung
<b>Straßentyp</b>	C1	Straße mit 2 getrennten Fahrbahnen
	C2	Straße mit mindestens 4 Fahrstreifen
	C3	Straße mit 2-3 Fahrstreifen
	C4	Straße mit schmaler Fahrbahn
	C5	Einbahnstraße
<b>Knotentyp</b>	K0	knotenpunktfrei
	K1	lichtsignalgesteuerter Knotenpunkt
	K2	rechts-vor-links-geregelter Knotenpunkt
	K3	schildergeregelter Knotenpunkt mit Vorfahrtsrecht
	K4	schildergeregelter Knotenpunkt mit Wartepflicht
<b>Fahrtrichtung</b>	F0	ohne Fahrtrichtungsänderung
	F1	Fahrtrichtungsänderung nach rechts
	F2	Fahrtrichtungsänderung nach links

Der Fahrer, der den mit Pfeil 1 gekennzeichneten Weg zurücklegt, startet mit der Verkehrs-  
situation C4, überquert danach einen Knotenpunkt vom Typ K2 und biegt anschließend an einem  
durch Beschilderung geregelten Knotenpunkt, an dem er wartepflichtig ist (K4), nach rechts ab (F1)  
und setzt seine Fahrt auf einer Straße vom Typ C3 fort. Der Fahrer auf der Route 2 durchfährt ohne  
Fahrtrichtungswechsel vorfahrtsberechtigter zwei schildergeregelter Knotenpunkte (K3) auf einer  
Straße vom Typ C3. Bei dem darauf folgenden lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt (K1) biegt er  
nach links ab (F2) und setzt seine Fahrt auf einer Straße vom Typ C2 fort. Die Besonderheit der  
Darstellung des Verkehrsgeschehens aus Fahrersicht zeigt sich an der jeweils 4. Verkehrssituation,  
an der die Fahrer am selben Ort unterschiedliche Verkehrssituationen durchfahren.

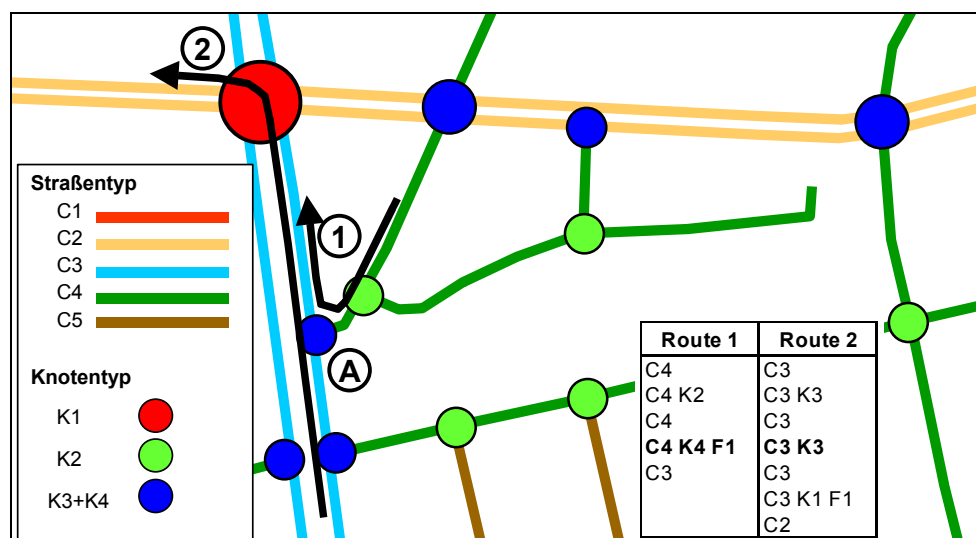


Abbildung 2-1: *Beschreibung des Verkehrsgeschehens durch standardisierte Verkehrssituationen*

Zur Modellierung des Verkehrsablaufs werden somit die Fahrwege der einzelnen Verkehrsteilnehmer betrachtet und diese durch eine Folge von standardisierten Verkehrssituationen beschrieben. Über die Zerlegung des Verkehrsgeschehens in Verkehrssituationen wird das komplexe System Straßenverkehr einer systematischen Untersuchung zugänglich gemacht, innerhalb derer die Verkehrssituation die kleinste Einheit bildet und im Rahmen der Verkehrs- und Unfallanalyse als Analyseeinheit dient.

### 2.2.2 Modellierung des Unfallgeschehens über Verkehrssituationen

Die systematische Beschreibung des Verkehrsgeschehens durch standardisierte Verkehrssituationen wird genutzt, um über die **Unfallsituation**, die als die erlebte Verkehrssituation zum Zeitpunkt des Unfalleintritts definiert ist, das Unfallgeschehen darzustellen. Mit der Modellierung des Unfallgeschehens durch standardisierte Verkehrssituationen wird eine situationsbezogene Darstellung der Konfliktsituation *Unfall* getroffen, welche die Unfallsituationen aller am Unfall beteiligten Kraftfahrzeugführer berücksichtigt. Dazu werden die individuell erlebten Unfallsituationen für alle Unfallbeteiligten entsprechend dem Klassifikationsschema für Verkehrssituationen modelliert. Bei einem Unfall an dem mit Buchstaben A gekennzeichneten Knotenpunkt in Abbildung 2-1 würden sich die beiden folgenden Unfallsituationen ergeben:

- Fahrer 1: C4-K4-F1
- Fahrer 2: C3-K3

Die Modellierung des Unfallgeschehens über Unfallsituationen gestattet eine strukturierte Beschreibung der Konfliktsituation *Unfall* und somit einen systematischen Zugang zur Analyse des Verkehrs- und Unfallgeschehens im Straßenverkehr. Durch die Zuordnung der Unfalldaten zu den klassifizierten Unfallsituationen ist eine mikroskopische Betrachtung des Unfallgeschehens möglich, welche die Unfallsituation als Analyseeinheit nutzt. Durch die Darstellung der individuell erlebten Unfallsituation ist im Hinblick auf die Untersuchung von Wirkungsfeldern von Fahrerassistenzsystemen somit eine Methodik vorhanden, die das Fahrerverhalten hinreichend berücksichtigt. Dabei wurde bei der Festlegung des Klassifikationsschemas darauf geachtet, dass die Klassifizierung der Unfallsituationen anhand der polizeilichen Unfalldaten möglich ist. Somit kann auf einen nahezu unerschöpflichen Datenpool zurückgegriffen werden. Die Unfallaufzeichnungen weisen dabei eine Qualität auf, die eine Rekonstruktion des Unfallhergangs ermöglicht (vgl. PFUNDT et al. 1986).

Das Klassifikationsschema ist so angelegt, dass die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen berücksichtigt sind, die nach einer Untersuchung von WORSEY (1985) aus der Art des Straßenelements (Knotenpunkt, Streckenabschnitt), der Verkehrsumgebung und dem Fahrmanöver bestehen. Dabei weist das Schema mit ca. 50 unterscheidbaren Unfallsituationen<sup>1</sup> eine Detailliertheit auf, die auch Unfallanalysen auf kleineren Datenbasen gestattet. Im Sinne der Betrachtung des Systems *Straßenverkehr* nach HILSE & SCHNEIDER (1995) wird mit der Beschreibung des Verkehrsgeschehens aus der Sicht

---

<sup>1</sup> Von den möglichen 75 Verkehrssituationen treten ca. 25 in der Realität nicht auf. In diesen Verkehrssituationen kann sich somit auch keine Unfallsituation ergeben. Dies gilt z.B. für die Knotenpunktregelung rechts vor links (K2) auf mehrstreifigen Straßen (C1 und C2).

des Fahrers der Mensch als Verkehrsteilnehmer und die Wechselbeziehungen zu den anderen Systemkomponenten (Verkehrsmittel, Verkehrswege und Verkehrsregelung) hinreichend berücksichtigt.

### 2.3 Verwendung polizeilicher Unfalldaten in der Unfallanalyse

Zur Analyse des Verkehrs- und Unfallgeschehens im Stadtbereich wurde der Stuttgarter Osten als Untersuchungsgebiet herangezogen (Abbildung 2-2). Dieser umfasst sämtliche für eine Stadt typischen Straßenarten, wie Bundesstraßen (B10 und B14) als Durchgangsstraßen für den übergeordneten Verkehr, Hauptverkehrsstraßen mit einer höheren verkehrlichen Belastung (z.B. Tal-, Wagenburg- und Neckarstraße) bis hin zu Orts- und Wohnstraßen innerhalb Wohn- und Mischgebieten. Entsprechend der Einteilung der Straßen nach dem Klassifikationsschema für Verkehrssituationen weisen im Stadtbereich die Bundesstraßen überwiegend einen Straßenaufbau vom Typ C1 auf. Die Hauptstraßen sind in aller Regel mit C2 und C3 zu klassifizieren, innerhalb Wohnquartieren finden sich vorzugsweise die Straßen vom Typ C4 und C5. Die Unfallanalyse stützt sich auf die 406 polizeilich registrierten Unfälle aus dem Jahr 1996. Neben einer Analyse anhand der originären Unfalldaten (Kapitel 2.3.2) werden die vorliegenden Unfalldaten zur Klassifizierung der Unfallsituationen anhand der standardisierten Verkehrssituationen genutzt (Kapitel 2.4.1).

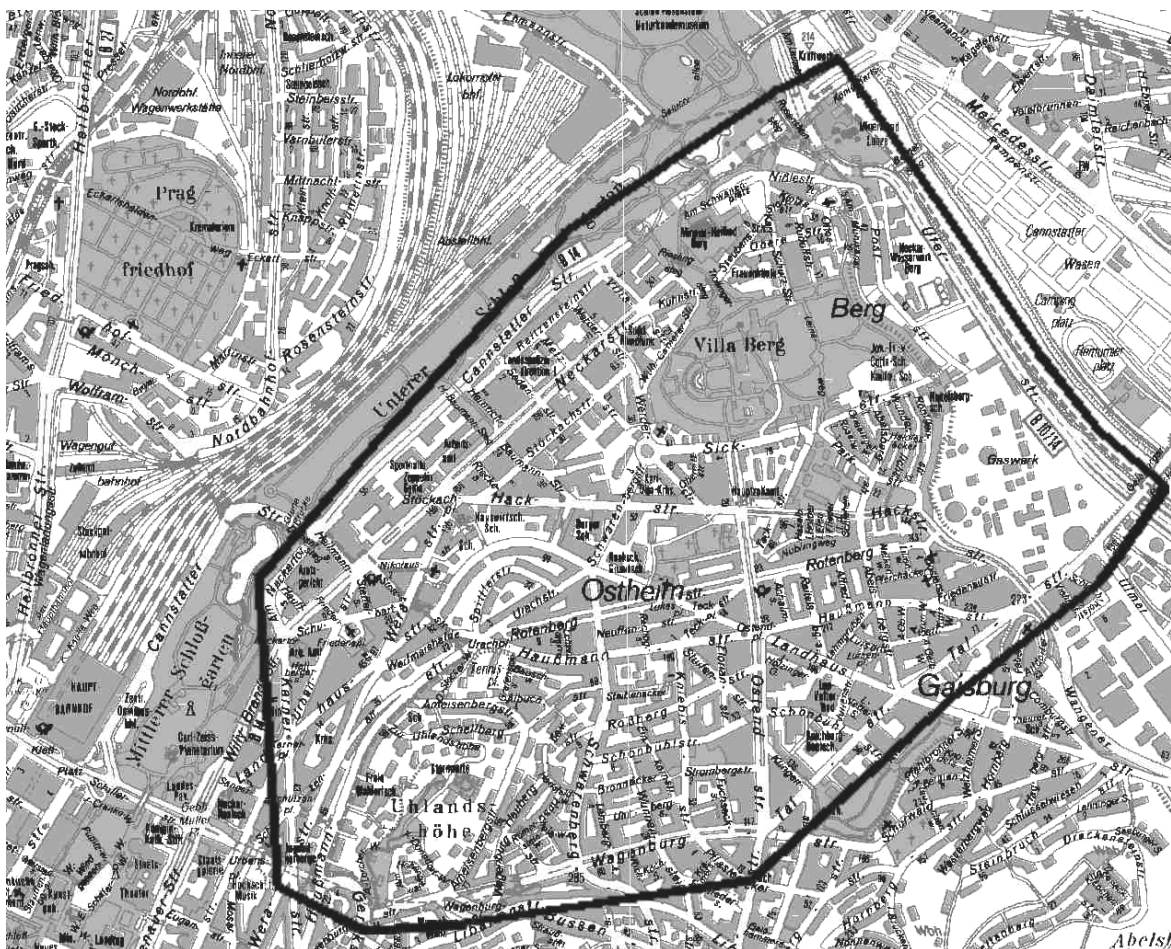


Abbildung 2-2: Untersuchungsgebiet im Stuttgarter Osten zur Analyse des Unfallgeschehens im Stadtverkehr (Quelle: Digitale Stadtkarte vom Stadtmessungsamt Stuttgart)

### 2.3.1 Dokumentation der Unfälle durch die Polizei

Im Rahmen der polizeilichen Tätigkeiten ergeben sich für das Aufgabenfeld verkehrspolizeiliche Einsatzangelegenheiten unter anderem die Verkehrssicherheitsberatung, die Verkehrsüberwachung und die Mitwirkung bei der Beseitigung von Unfallhäufungspunkten (vgl. HILSE & SCHNEIDER 1995). Für die *Verkehrsunfallaufnahme*, die zum Bereich der Verkehrsüberwachung zählt, bedeutet dies, dass alle der Polizei bekannt gewordenen Unfälle dokumentiert werden müssen, die nach dem Gesetz über die Statistik der Straßenverkehrsunfälle (StVUnfStatG) meldepflichtig sind. Dies gilt für sämtliche Verkehrsunfälle mit Personenschäden sowie schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden<sup>1</sup>. Aufgrund der Vorgabe, dass Unfälle, bei denen eine Straftat oder Ordnungswidrigkeit vorliegt ebenso als schwerwiegender Unfall gelten, werden, unabhängig von der Schadenshöhe, sämtliche Unfälle mit unerlaubtem Entfernen von der Unfallstelle erfasst. Dasselbe gilt für Unfälle unter Alkoholeinwirkung.

Zusammenfassend kann der Zweck der Erfassung und Dokumentation der Unfalldaten durch die Polizei wie folgt eingeteilt werden:

- **Amtliche Unfallstatistik:** Von den Polizeidirektionen werden die Unfalldaten an das Statistische Bundesamt weitergeleitet, dort zentral ausgewertet und jährlich veröffentlicht.
- **Beweissicherung:** Die Polizei nimmt die Beweissicherung für gerichtliche Verfahren vor. Des Weiteren erfolgt bei dem Verdacht einer Straftat oder Ordnungswidrigkeit ein entsprechender Hinweis an die Staatsanwaltschaft, Bußgeldbehörde oder Fahrerlaubnisbehörde.
- **Erkennung von Unfallhäufungspunkten:** Zu diesem Zweck wird eine Unfalltypensteckkarte geführt. Die identifizierten Unfallschwerpunkte werden in Zusammenarbeit mit der zuständigen Straßenbau- und Verkehrsbehörde beseitigt.

Zur Bearbeitung der Verkehrsunfälle wird von der Polizei das Unfalldateninformationssystem UDIS eingesetzt, das die Vorgabe der Verwaltungsvorschrift Verkehrsunfall und das Verkehrsunfallstatistikgesetz berücksichtigt und eine EDV-gestützte Erfassung und Weiterverarbeitung der Unfalldaten gestattet. Somit sind zu jedem Unfall Angaben zum Unfallort und der Unfallzeit, den Personen- und Sachschäden, dem Straßenzustand und den Witterungsverhältnissen sowie eine Vielzahl weiterer Hinweise zur Charakteristik der Unfallstelle gegeben. Ebenso wird das Fahren unter Alkoholeinfluss und Fahrerflucht dokumentiert. Des Weiteren wird mittels des Unfalltyps, der Unfallart, der Unfallkategorie und der Unfallgruppe eine Klassifizierung vorgenommen. Zu jedem Unfallbeteiligten werden darüber hinaus die personenbezogenen Daten, wie Wohnort, Alter und Geschlecht, die Art der Beteiligung, die Unfallursache, der erlittene Schaden usw., erfasst. Daneben existiert eine analoge Datenhaltung in Form der Verkehrsunfallbeschreibung (Abbildung 2-3), die neben einem Auszug aus den UDIS-Daten eine Unfallskizze und einen Unfallbericht zur Erläuterung des Sachverhalts enthält.

---

<sup>1</sup> Durch die Änderung des Straßenverkehrsunfallstatistikgesetzes (Erstes Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsunfallstatistikgesetzes vom 23.11.1994 – BGBl 1994, Nr. 83, S. 3491ff) gelten seit 1995 als schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden alle Unfälle ohne Personenschaden, bei denen als Unfallursache eine Straftat oder Ordnungswidrigkeit vorliegt und bei denen ein Kfz aufgrund des Unfallschadens abgeschleppt werden muss sowie sonstige Unfälle unter Alkoholeinwirkung. Die bis dahin geltende Schadensgrenze von 4.000 DM entfällt.

Polizeirevier Ostendstraße Ostendstr. 88 70188 Stuttgart ===== <b>VERKEHR SUNFALLBESCHREIBUNG</b> Unfallzeit 09.02.96, 11.10 Uhr Unfallort : innerorts Straßenklasse : Landesstraße 1014 70188 Stuttgart, Ost, Talstraße/Gablenberger-Haupt-Str. Alkoholeinwirkung : nein      Getötete : 0 § 142 StGB : nein      Schwerverletzte : 0 Gesamtschaden : 4000 DM      Leichtverletzte : 0 Straßen-Nr. : 1014 Netzknoten A    Netzknoten B    Station (km,m) Fahrtrichtung : 01 absteigend LZA : ja      in Betrieb : ja Fußgänger :      Radfahrer : Aufprall auf Hindernis neben der Fahrbahn : Unfalltyp : 2	Verkehrsunfallbeschreibung Seite 2 ===== <b>Sachverhalt</b> Pkw-Lenker 01 befährt die Talstraße in Richtung Wagenburgstraße. An der Kreuzung Talstraße/Gablenberger-Haupt-Str./Ostendstraße hält er bei roter LZA auf dem Linksabbiegerfahrstreifen an, da er nach links in die Gablenberger-Haupt-Straße abbiegen will. Als die LZA für die Geradeausfahrspur auf Grünlicht schaltet, fährt der Pkw-Lenker 01 los, obwohl die für ihn geltende LZA noch rot zeigt. Als er nach links abbiegen will, kollidiert er mit dem entgegenkommenden, die Wagenburgstraße abwärts fahrenden Pkw 02, welcher zu diesem Zeitpunkt Grünlicht hatte. <b>Maßnahmen</b> Lichtbilder von den unfallbeteiligten Fahrzeugen gefertigt. Verkehrsunfallaufnahme.
--	---

Abbildung 2-3: Beispiel für eine von der Polizei gefertigte Verkehrsunfallbeschreibung mit Unfallskizze und Unfallbericht

### 2.3.2 Unfallanalyse anhand der originären polizeilichen Unfalldaten

Im Folgenden wird anhand der originären Unfalldaten der Polizei das Unfallgeschehen im Stuttgarter Osten untersucht und mit den Ergebnissen der Verkehrsunfallstatistik für das gesamte Stadtgebiet von Stuttgart (s. LANDESPOLIZEIDIREKTION STUTTGART II 1997) verglichen. Dazu werden

- der **Unfalltyp**, der den Verkehrsvorgang bzw. die Konfliktsituation angibt, woraus der Unfall entstanden ist,
- die **Unfallart**, durch die angegeben wird, ob und wie die Verkehrsteilnehmer kollidiert sind,
- die **Unfallursache**, die auf das Fehlverhalten der Unfallbeteiligten hinweist,

betrachtet. Neben ersten Hinweisen zu dem Unfallgeschehen im innerörtlichen Straßenverkehr soll hierdurch die Repräsentanz des Untersuchungsgebiets dargelegt werden.

**Unfalltyp:** Für die Festlegung des Unfalltyps entscheidet allein die *Konfliktsituation*, die zu dem Unfall führt. Die Unfallart und das Fehlverhalten der Verkehrsteilnehmer hat keine Bedeutung bei der Festsetzung des Unfalltyps (FGSV 1974). Insgesamt werden sieben Unfalltypen unterschieden. Der *Fahrerunfall* (Typ 1) beschreibt Konfliktsituationen, bei denen der Fahrer die Gewalt über das Fahrzeug verliert, ohne dass ein weiterer Verkehrsteilnehmer beteiligt ist. Beim *Abbiege-Unfall* (Typ 2) liegt ein Konflikt zwischen einem Abbieger und einem aus gleicher oder entgegengesetzter

Richtung kommenden Verkehrsteilnehmer vor. Ebenso wie der Unfalltyp 2 weisen die *Einbiegen/Kreuzen-Unfälle* (Typ 3) auf Unfälle an Kreuzungen und Einmündungen hin, wobei bei diesem Unfalltyp ein Konflikt zwischen einem Wartepflichtigen und einem Vorfahrtsberechtigten vorliegt. Die Wartepflicht wird hierbei durch Verkehrszeichen, Lichtzeichen, Verkehrsposten oder durch allgemeine Vorfahrtsregeln wie beispielsweise rechts vor links ausgedrückt. Unfälle, bei denen es zu einem Konflikt mit einem die Fahrbahn überschreitenden Fußgänger kommt, werden als *Überschreiten-Unfall* (Typ 4) klassifiziert, sofern das Fahrzeug nicht soeben abgelenkt ist. Der Unfalltyp 5 *Unfall durch ruhenden Verkehr* beschreibt Unfälle, bei denen eine Konfliktsituation zwischen dem fließenden und dem ruhenden Verkehr vorliegt, wobei unter ruhendem Verkehr auch ein ein- oder ausparkendes Fahrzeug verstanden wird. Bewegen sich die am Konflikt beteiligten Verkehrsteilnehmer in gleicher oder entgegengesetzter Richtung und kann der Konflikt keinem anderen Unfalltyp zugeordnet werden, liegt ein *Unfall im Längsverkehr* (Typ 6) vor. Alle weiteren Unfälle werden mit Unfalltyp 7 als *sonstiger Unfall* klassifiziert und beinhalten insbesondere Unfälle beim Wenden und Rückwärtsfahren sowie Rangiermanöver, bei denen der fließende Verkehr nicht beeinträchtigt wird.

Die Verteilung der Unfalltypen für das Untersuchungsgebiet und für das Stadtgebiet von Stuttgart zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung (s. Abbildung 2-4). Mit 27,1% bzw. 32,8% entfällt der größte Anteil auf den Unfalltyp *sonstiger Unfall*. Für die hier betrachteten Innerortsunfälle ergibt sich dieser hohe Anteil insbesondere durch Unfälle bei dem ein parkendes Fahrzeug beschädigt wird und der Unfallverursacher Fahrerflucht begeht. Auf die *Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle* entfallen 28,6% bzw. 26,3%. Ein weiterer häufig auftretender Unfalltyp bildet der *Unfall im Längsverkehr*. Es ist in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen, dass der Unfalltypenkatalog keine trennscharfe Unterscheidung in Strecken- und Knotenpunktunfälle erlaubt (STURM 1989). So werden die Knotenpunktunfälle nicht ausschließlich durch die Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle (Unfalltyp 2 und 3) repräsentiert, da insbesondere an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage häufig Auffahrunfälle auftreten, die als Unfall im Längsverkehr (Unfalltyp 6) klassifiziert sind.

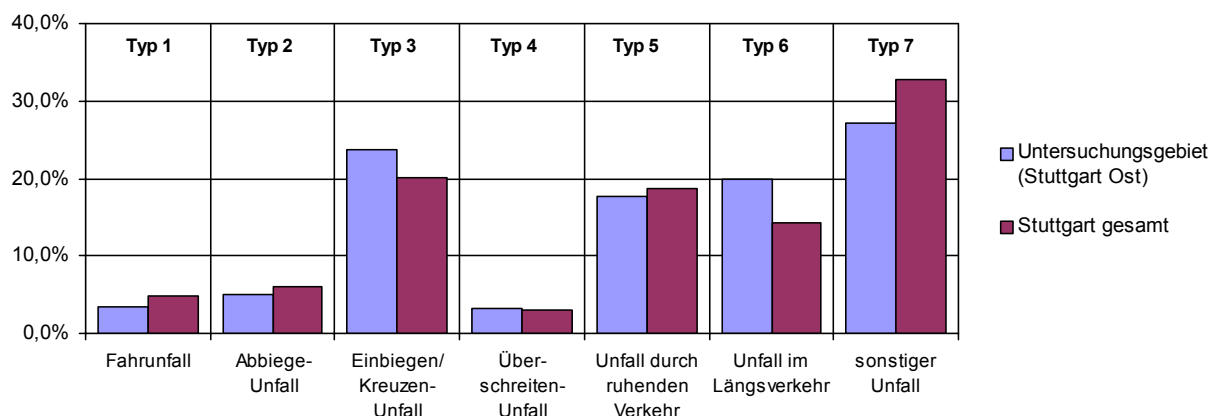


Abbildung 2-4: Verteilung des Unfalltyps im Untersuchungsgebiet (Stuttgart Ost) und für das gesamte Stadtgebiet von Stuttgart

**Unfallart:** Über die Unfallart wird angegeben, ob und wie die Verkehrsteilnehmer kollidiert sind (FGSV 1974). Bei einer Kollision wird unterschieden zwischen einem *Zusammenstoß mit einem*



anderen Fahrzeug, einem Fußgänger und einem Aufprall auf ein Hindernis, das sich auf der Fahrbahn befindet, wobei für den Zusammenstoß mit einem anderen Fahrzeug über fünf verschiedene Unfallarten hinsichtlich der Bewegungsrichtung differenziert werden (vgl. Tabelle 2-2). Zwei weitere Unfallarten berücksichtigen das *Abkommen von der Fahrbahn*. Alle Unfälle, die nicht über die neun Unfallarten beschrieben werden können, werden als *Unfall anderer Art* klassifiziert.

Für die Unfallart lagen keine Vergleichswerte für das Stadtgebiet Stuttgart vor, so dass die Tabelle 2-2 nur die Häufigkeit des Auftretens der Unfallarten für das Untersuchungsgebiet ausweist. Hierbei ist festzuhalten, dass ein großer Anteil (20,9%) der Unfälle als *Unfall anderer Art* klassifiziert und somit nicht näher spezifiziert ist. Das *Abkommen von der Fahrbahn* und der *Zusammenstoß mit einem entgegenkommenden Fahrzeug* tritt nur sehr selten auf, was aufgrund der ausschließlichen Betrachtung von innerörtlichen Unfällen plausibel ist. Der Hauptanteil mit 26,6% entfällt auf *Unfälle mit Fahrzeugen im ruhenden Verkehr bzw. Fahrzeugen, die aus dem ruhenden in den fließenden Verkehr (oder umgekehrt) wechseln* (Unfallart 1). Die Unfälle mit der Unfallart 3 und 4 können fast vollständig den knotenpunktfreien Verkehrssituationen zugerechnet werden. Der *Zusammenstoß mit einem Fahrzeug, das einbiegt oder kreuzt* (Unfallart 5), entfällt dagegen auf Knotenpunktsituationen und weist einen Anteil von 23,9% auf. Bei der Unfallart 2 sind sowohl Strecken- als auch Knotenpunktunfälle enthalten, wobei die Knotenpunktunfälle überwiegend an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten auftreten.

Tabelle 2-2: Verteilung der Unfallart im Untersuchungsgebiet Stuttgart Ost

Unfallart	Beschreibung	Stuttgart Ost	Unfallart	Beschreibung	Stuttgart Ost
0	Unfall anderer Art	20,9%	5	Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das einbiegt oder kreuzt	23,9%
1	Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das anfährt, anhält oder im ruhenden Verkehr steht	26,6%	6	Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger	2,5%
2	Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das vorausfährt oder wartet	10,8%	7	Aufprall auf ein Hindernis auf der Fahrbahn	0,2%
3	Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt	6,7%	8	Abkommen von der Fahrbahn nach links	2,7%
4	Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das entgegenkommt	2,7%	9	Abkommen von der Fahrbahn nach rechts	3,0%

**Unfallursache:** Zur Angabe der vorliegenden Ursache, die zu einem Unfall führte, wird das Ursachenverzeichnis nach StVUnfStatG angewandt, das neben *Fehlern bei der Fahrzeugführung* Ursachen zu der *Verkehrstüchtigkeit des Fahrers*, *technische Mängel am Fahrzeug*, Mängel bei der *Ladung* und Angaben zu den *Straßen- und Witterungsverhältnissen* enthält. Im Gegensatz zu dem Unfalltyp und der Unfallart können mehrere Unfallursachen zu einem Unfall angegeben werden. Dabei sieht die Richtlinie zur Unfalldokumentation vor, dass Angaben zu den Straßen- und Witterungsverhältnissen als übergeordnet wirkende Ursache zum Unfall angegeben werden. Die übrigen Ursachen sind hingegen den am Unfall beteiligten Personen zuzuordnen.

Bei den personenbezogenen Ursachen treten in der Praxis ausschließlich die Ursachen zum Fehlverhalten und zur Verkehrstüchtigkeit auf. Im Sinne der Beweissicherung zur Klärung der Schuld- und insbesondere der Haftungsfrage wird somit grundsätzlich ein Fehlverhalten bei dem Unfallverursacher festgesetzt. Dies lässt u.a. der hohe Anteil an Unfällen erkennen, bei denen keine näheren Angaben zur Unfallursache gemacht werden und trotz allem von einem Fehler bei der Fahrzeugführung (Ursache 49) ausgegangen wird. Die Unfallursache spiegelt somit in erster Linie das Fehlverhalten der Kraftfahrzeugführer bei Unfällen wider.

Tabelle 2-3: *Verteilung der Unfallursache zur Fahrtüchtigkeit und zum Fehlverhalten im Untersuchungsgebiet (Stuttgart Ost) und im gesamten Stadtgebiet Stuttgart*

Nummer	Ursache	Stuttgart Ost	Stuttgart gesamt
1	Alkoholeinfluss	6,7%	6,4%
12-13	Geschwindigkeit	6,7%	6,6%
14-15	Abstand	8,7%	5,5%
16-23	Überholen	1,5%	1,5%
24-25	Fehler beim Vorbeifahren	0,2%	0,3%
26	Fehler beim Fahrstreifenwechsel	5,4%	2,8%
27-33	Nichtbeachten der Vorfahrt	20,5%	16,1%
35-37	Abbiegen, Wenden und Rückwärtsfahren	16,1%	14,0%
38-42	Falsches Verhalten gg. Fußgängern	0,5%	1,1%
49	Anderer Fehler bei Fahrzeugführung	30,9%	39,8%

In Tabelle 2-3 sind die im Untersuchungsgebiet aufgetretenen personenbezogenen Ursachen aufgeführt und über die Nummer der Bezug zum Ursachenverzeichnis hergestellt. Des Weiteren ist die prozentuale Verteilung der Unfallursachen für das gesamte Stadtgebiet gegenübergestellt. Die in der Summe auftretende Abweichung zu 100% ist auf die Ursachen zurückzuführen, die in der Tabelle nicht aufgeführt sind. Unter Ausschluss des nicht näher spezifizierten Fehlverhaltens, auf das fast ein Drittel entfällt, bilden das *Nichtbeachten der Vorfahrt* mit 20,5% und das *Fehlverhalten beim Abbiegen, Wenden und Rückwärtsfahren* mit 16,1% die Hauptunfallursachen für die Unfälle im Stuttgarter Osten. Als weiter häufig auftretende Unfallursachen liegen *Fahren unter Alkohol*, die *Geschwindigkeitsüberschreitung* und ein *zu geringer Sicherheitsabstand* vor. Neben einer guten Übereinstimmung zu der Verkehrsunfallstatistik von Stuttgart werden für andere Städte<sup>1</sup> und in der Literatur (u.a. SCHNABEL & LOHSE 1997) dieselben Hauptunfallursachen angegeben.

#### **Ergebnis der Analyse der originären polizeilichen Unfalldaten:**

- Das gewählte Untersuchungsgebiet im Stuttgarter Osten kann als repräsentativ bezüglich des Verkehrs- und Unfallgeschehens für das Stadtgebiet von Stuttgart und für andere Städte angesehen werden.
- Bei den meisten Unfällen liegt eine Konfliktsituation zwischen einem wartepflichtigen und einem vorfahrtsberechtigten Verkehrsteilnehmer vor. Dadurch kommt es meist zu einer Kollision mit einem abbiegenden oder kreuzenden Fahrzeug.

<sup>1</sup> vgl. Verkehrsunfallstatistik von 1999 der Stadt Heidelberg (<http://home.t-online.de/home/pdhd-pressestelle/vu99.htm>)

- Die Analyse der originären Unfalldaten der Polizei kann im Hinblick auf Wirkungsfelder von Fahrerassistenzsystemen nur bedingt Aufschluss geben. Dies ergibt sich insbesondere aus einer verteilten und teils redundanten Datenhaltung sowie einer Vielzahl nicht näher spezifizierter Unfälle.

## 2.4 Situationsbezogene Verkehrs- und Unfallanalyse

Ausgangspunkt der folgenden situationsbezogenen Verkehrs- und Unfallanalyse bilden die in Kapitel 2.4.1 klassifizierten Unfallsituationen. Nach einer Betrachtung der Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Unfallsituationen in Kapitel 2.4.2 folgt in Kapitel 2.4.3 eine Betrachtung der Unfallkosten. Dazu werden die Unfallfolgen, die sich durch die entstandenen Personen- und Sachschäden ergeben, den einzelnen Unfallsituationen zugeordnet. In Kapitel 2.4.4 wird das Unfallrisiko behandelt. Hierzu werden u.a. die Verteilung der Verkehrssituationen, die der Fahrer bei einer typischen Stadtfahrt erlebt, herangezogen. Im abschließenden Kapitel 2.4.5 wird der Frage nachgegangen, welche Fehlverhalten der Autofahrer zu Unfallsituationen führen.

### 2.4.1 Klassifizierung der Unfallsituationen anhand polizeilicher Unfalldaten

Mit der in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Methodik zur Modellierung des Unfallgeschehens kann über standardisierte Verkehrssituationen die Unfallsituation aus Sicht der beteiligten Fahrer dargestellt werden. Dies wird genutzt, um anhand der vorliegenden Daten des Unfalldateninformationssystems UDIS und der Verkehrsunfallbeschreibung mit dem enthaltenen Unfallbericht und der Unfallskizze die Unfallsituationen zu rekonstruieren. Von den insgesamt 406 Unfällen müssen 82 Unfälle ausgeklammert werden, da zu diesen keine ausreichenden Informationen zum Unfallhergang vorliegen oder das Klassifikationsschema für Verkehrssituationen nicht angewandt werden kann. Dies betrifft:

- Unfälle, bei denen eine Unfallflucht vorliegt und keine Zeugenaussagen zu dem Unfallhergang vorhanden sind. Im innerstädtischen Verkehr handelt es sich hierbei insbesondere um Unfälle, bei denen ein parkendes Fahrzeug beschädigt wird und der Unfallverursacher Fahrerflucht begeht<sup>1</sup>.
- Unfälle, bei denen keine Kraftfahrzeugführer beteiligt sind.

Bei den 324 verbleibenden Unfällen wird getrennt nach Unfallverursacher und Unfallbeteiligtem<sup>2</sup> die jeweilige Unfallsituation klassifiziert. Dabei wird die Einschränkung getroffen, dass unabhängig von der Anzahl der Unfallbeteiligten nur eine Unfallsituation pro Unfall klassifiziert wird. Dies betrifft im Wesentlichen die Auffahrunfälle, bei denen mehrere in einer Kolonne befindliche Fahrzeuge aufeinander geschoben werden und daher mehrere Unfallbeteiligte dokumentiert sind, die

---

<sup>1</sup> Bei der Vielzahl derartiger Unfälle – 65 von 406 Unfällen im Untersuchungsgebiet – kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich alle diese Unfälle am dokumentierten Unfallort durch Fremdverschulden ereignet haben.

<sup>2</sup> Die Festlegung Unfallverursacher und Unfallbeteiligter ergibt sich aus den polizeilichen Unfalldaten, in denen der vermeintlich Schuldige als Verursacher mit der Ordnungsnummer ON 01 belegt wird. Die Beteiligten erhalten die Ordnungsnummer ON 02 und höher. Des Weiteren handelt es sich dabei sehr häufig um Unfälle mit geringem Sachschaden.

jedoch alle dieselbe Unfallsituation erlebt haben. Somit konnten insgesamt 546 Unfallsituationen erfasst werden. In Tabelle 2-4 sind die klassifizierte Unfallsituationen für das Untersuchungsgebiet aufgeführt. Darin sind die Unfallsituationen der Unfallverursacher und der Unfallbeteiligten enthalten.

Tabelle 2-4: Anzahl der Unfallsituationen im Stuttgarter Osten im Jahr 1996 (in %)

Straßen- typ	Knoten- typ	Fahrtrichtung			Straßen- typ	Knoten- typ	Fahrtrichtung		
		F0	F1	F2			F0	F1	F2
C1	K0	16,5	-	-	C4	K0	7,7	-	1,3
	K1	5,5	-	1,3		K1	0,4	0,2	0,5
	K2	-	-	-		K2	2,6	0,9	0,9
	K3	0,5	-	-		K3	0,5	-	0,2
	K4	-	-	0,2		K4	0,7	2,4	3,5
C2	K0	8,2	-	0,9	C5	K0	1,5	-	0,2
	K1	6,8	0,9	3,3		K1	0,2	-	-
	K2	-	-	-		K2	1,1	0,2	-
	K3	3,8	0,4	0,5		K3	-	-	-
	K4	-	0,2	0,4		K4	-	0,5	1,1
C3	K0	4,4	-	1,5					
	K1	1,5	-	0,4					
	K2	-	-	-					
	K3	9,5	0,2	1,1					
	K4	3,3	1,1	1,1					

Auf die in mehreren Untersuchungen hingewiesenen Ungenauigkeiten der polizeilichen Unfalldaten und der amtlichen Unfallstatistik (u.a. HAUTZINGER 1985) ist anzumerken, dass durch die hier gewählte mikroskopische Betrachtung der Unfälle anhand des in der Verkehrsunfallbeschreibung geschilderten Unfallhergangs, eine Vielzahl der Fehler, die bei der Charakterisierung der Unfallstelle und der Klassifizierung von Unfalltyp, -art und -ursache auftreten, erkannt und korrigiert werden können. Das Problem der zum Teil beträchtlichen Dunkelziffer von Unfällen (s. HAUTZINGER 1993, SIEGENER & LENHART 1986) wird durch die Betrachtung der relativen Häufigkeit abgeschwächt. Des Weiteren ist die Dunkelziffer besonders hoch bei Unfällen ohne Beteiligung des motorisierten Verkehrs und bei Unfällen mit geringem Sachschaden. Es handelt sich somit um Unfallsituationen, die nicht im Einflussbereich eines Fahrerassistenzsystems liegen bzw. nur ein geringes Sicherheitssteigerungspotenzial aufweisen.

#### 2.4.2 Analyse der Unfallsituationen

Über eine Betrachtung der Unfallsituationen sollen die Verkehrssituationen ausfindig gemacht werden, in welchen der Autofahrer verstärkt in Konfliktsituationen gerät, die in ihrer Konsequenz zu einem Unfall führen. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Verkehrsteilnehmer selbst verschuldet oder unverschuldet in diese Konfliktsituation gelangt. Bei den in Tabelle 2-4 aufgeführten Unfallsituationen fällt auf, dass für verschiedene Verkehrssituationen keine bzw. nur sehr wenig Unfallsituationen vorliegen. So treten z.B. die Unfälle an rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkten nur in Wohnstraßen (C4 und C5) auf, da bei mehrstreifigen Straßen (C1 bis C3) diese Art der Vorfahrtsregelung nicht angewandt wird. Umgekehrt treten bei den Wohnstraßen nur wenige Unfälle an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten auf, da diese Knotenpunktregelung überwiegend

auf den übergeordneten Straßen anzutreffen ist. Zu den Unfallsituationen mit Fahrtrichtungsänderung nach links (F2), die in den knotenfreien Verkehrssituationen (K0) auftreten ist anzumerken, dass diese auf misslungene Wendemanöver und Abbiegevorgänge in Grundstückseinfahrten zurückzuführen sind.

Die statistische Analyse der Unfallsituationen liefert die Häufigkeit des Auftretens von kritischen Verkehrssituationen, die in ihrer Konsequenz zu einem Unfall führen. Im Kontext der situationsbezogenen Analyse entspricht die ermittelte Häufigkeit der Unfallsituationen dabei der *Unfallhäufigkeit*.

Für die Verteilung der Unfallsituationen innerhalb der einzelnen Straßentypen zeigt sich eine annähernde Gleichverteilung innerhalb der Typen C1 bis C4. Nur in den Einbahnstraßen liegen mit 4,8% deutlich weniger Unfallsituationen vor. Hiernach sind 24,0% der Unfallsituationen den Durchgangsstraßen (C1) und 49,4% den Hauptverkehrsstraßen (C2 und C3) zuzuordnen. Nach TOPP (1986) ereignen sich ca. 65% aller Innerortsunfälle auf den Verkehrs- und Hauptverkehrsstraßen. Die Häufigkeit der Unfallsituationen bezüglich des Knotentyps ergibt, dass es sich bei 42% der Unfallsituationen um knotenfreie Situationen (K0) handelt. Dagegen sind 316 Unfallsituationen, das entspricht 58%, den Knotenpunkten zuzuordnen. Der Anteil liegt etwas unter den in der Literatur (z.B. MENSEBACH 1994) angegebenen Werten. Hiernach ereignen sich innerhalb geschlossener Ortschaften 65% der Unfälle an Knotenpunkten. Bei den Knotenpunktsituationen (K1 bis K4) zeigt sich, dass 21% der Unfallsituationen an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten auftreten. Der größte Anteil entfällt mit 31% auf die durch Beschilderung geregelten Knotenpunkte. Die geringste Häufigkeit mit 6% wird den rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkten zuteil. Aufgrund der vielen und häufig schweren Unfälle sind für eine Sicherheitsbewertung die Knotenpunkte besonders untersuchungsrelevant (KORDA 1999), weshalb im Folgenden die Unfallsituationen an Knotenpunkten detailliert betrachtet werden.

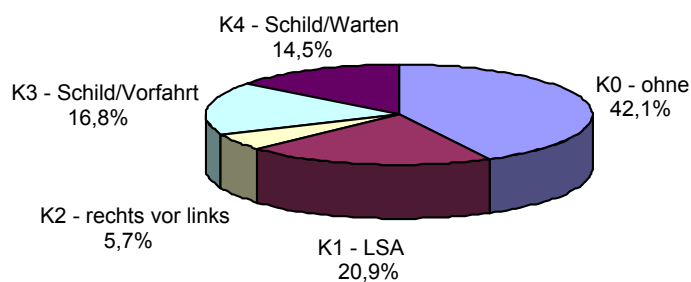


Abbildung 2-5: Häufigkeit der Unfallsituation in Abhängigkeit des Knotentyps

**Unfallsituationen an Knotenpunkten:** Durch Zusammenfassen der Unfallsituationen nach den Situationselementen Knotentyp und Fahrtrichtung und einer Normierung auf 100 Unfallsituationen ergibt sich die in Tabelle 2-5 aufgeführte prozentuale Verteilung der Unfallsituationen an Knotenpunkten. Bei ausschließlicher Betrachtung der Knotenpunktunfälle (K1 bis K4) entfallen

- 36% der Unfallsituationen auf lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte (K1),
- 10% auf rechts-vor-links-geregelte Knotenpunkte (K2) und
- 54% auf schildergeregelte Knotenpunkte (K3 und K4).

Bei den lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten fällt dabei der hohe Anteil an Fahrtrichtungsänderungen nach links (F2) auf. In jeder vierten Unfallsituation ist ein Abbiegemanöver nach links enthalten, wobei sich die Unfallsituationen gleichermaßen auf Verursacher und Beteiligte aufteilen (Tabelle 2-6). In den Untersuchungen von BAIER & SCHLABBACH (1976) und ZIBUSCHKA (1980) werden ähnliche Anteile für Linksabbiegeunfälle ermittelt. Es kommt dabei überwiegend zu einer Kollision mit einem Fahrzeugführer, der entgegenkommt und ohne Fahrtrichtungsänderung den Knotenpunkt überqueren wollte. Bei komplexen Knotenpunkten, an denen über mehrere Fahrstreifen abgebogen wird, zeigen sich darüber hinaus Probleme bei der Bahnführung, wodurch es zu einer Kollision zwischen Fahrzeugen kommt, die sich in gleicher Richtung bewegen.

Der geringste Anteil der Knotenpunktunfälle entfällt auf die rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkte, die verstärkt innerhalb Wohngebieten (Zone 30) und somit in Bereichen mit einer geringen Verkehrsbelastung auftreten.

Mit 54% liegen die meisten Unfallsituationen an schildergeregelten Knotenpunkten vor. Auffällig ist hierbei, dass der vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer in 85% der Unfallsituationen ohne Fahrtrichtungsänderung den Knotenpunkt überqueren wollte und bei dem wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer in 72% der Fälle eine Fahrtrichtungsänderung vorliegt. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass an schildergeregelten Knotenpunkten wesentlich häufiger die Fahrtrichtung geändert wird, wenn der Fahrer wartepflichtig ist (s. Tabelle 2-12). So ändert ein wartepflichtiger Fahrer in 64% der Fälle die Fahrtrichtung, wohingegen ein vorfahrtsberechtigter Fahrer mit 13% weitaus seltener eine Änderung der Fahrtrichtung vornimmt. Die Unterscheidung nach Wartepflicht und Vorfahrtsrecht enthält indirekt die Vorfahrtsmissachtung. So liegen die Unfallsituationen für die Verursacher überwiegend an den schildergeregelten Knotenpunkten mit Wartepflicht und die Unfallsituationen der Beteiligten überwiegend an Knotenpunkten, an denen sie das Vorfahrtsrecht besitzen.

Tabelle 2-5: Häufigkeit der Unfallsituationen an Knotenpunkten in Abhängigkeit des Knotentyps und der Fahrtrichtung (in %)

Knotentyp	F0 geradeaus	F1 rechts	F2 links	
K1 – LSA	24,7	1,9	9,5	36,1
K2 – rechts vor links	6,3	1,9	1,6	9,8
K3 – Schild/Vorfahrt	25,0	0,9	3,2	29,1
K4 – Schild/Warten	7,0	7,3	10,8	25,0
	63,0	12,0	25,0	100,0

Tabelle 2-6: Unfallsituationen an Knotenpunkten getrennt nach Verursacher (a) und Beteiligten (b)

(a)

Knotentyp	Unfallverursacher			
	F0	F1	F2	
K1	23,8	1,8	10,7	36,0
K2	6,1	2,4	1,8	10,4
K3	2,4	1,8	5,5	9,8
K4	11,6	13,4	18,9	43,9
	43,9	19,5	36,6	100,0

(b)

Knotentyp	Unfallbeteiligter			
	F0	F1	F2	
K1	25,7	2,0	8,6	36,2
K2	6,6	1,3	1,3	9,2
K3	49,3	-	0,7	50,0
K4	2,0	0,7	2,0	4,6
	83,6	3,9	12,5	100,0

**Konfliktflächen im Knotenpunktbereich:** Der insgesamt hohe Anteil von Abbiegevorgängen bei Unfällen an Knotenpunkten ergibt sich aus der erhöhten Kollisionsgefahr durch kreuzende Verkehrsströme. Zur Lokalisierung der Konflikte im Knotenpunktbereich kann die Überfahrt des Knotenpunkts in Konfliktflächen eingeteilt werden (siehe u.a. ERKE & GSTALTER 1985, ZIMOLONG et al. 1978). Hiernach kann eine Konfliktfläche definiert werden als Ort, an dem sich zum selben Zeitpunkt zwei Verkehrsteilnehmer befinden. Ziel der Verkehrsregelung ist, durch eine zeitliche und räumliche Trennung zu vermeiden, dass sich mehrere Verkehrsteilnehmer zum gleichen Zeitpunkt in einer Konfliktfläche aufhalten. In der in Abbildung 2-6 dargestellten Konfliktfläche 1 ereignen sich die Unfälle im Längsverkehr, d.h. Auffahrunfälle, die sich durch einen zu geringen Abstand zum Vordermann oder einer nicht angepassten Geschwindigkeit ergeben. In der Konfliktfläche 2 liegen die Unfallsituationen mit einer Vorfahrtsverletzung gegenüber entgegenkommenden Fahrzeugen und in der Konfliktfläche 3 die Unfälle mit Fußgängern, die die Fahrbahn überschreiten.

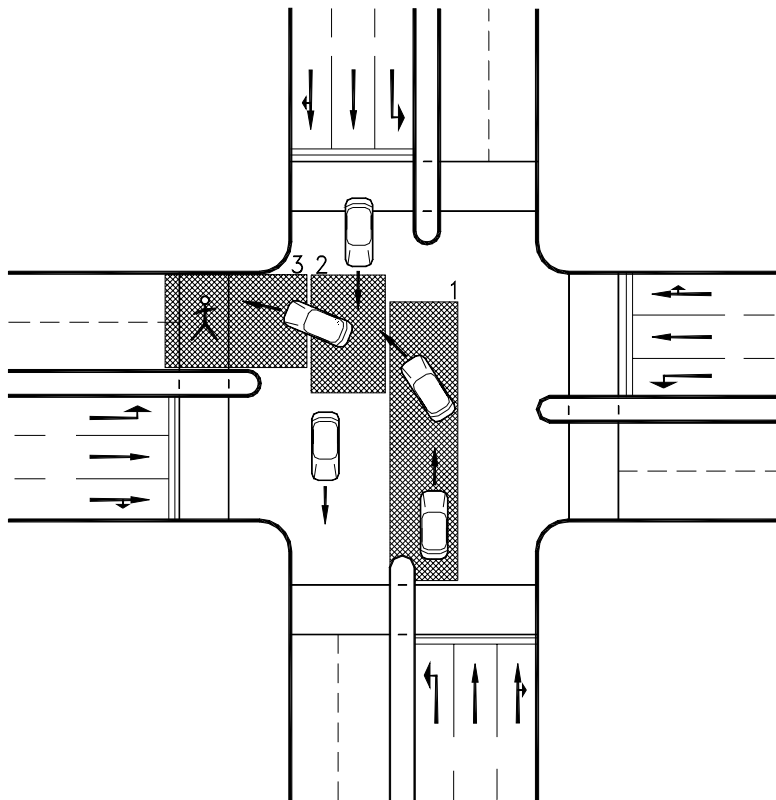


Abbildung 2-6: Konfliktflächen des Linksabbiegeverkehrs (aus ERKE & GSTALTER, 1985)

### 2.4.3 Unfallkosten

Hinsichtlich der Ermittlung des Sicherheitssteigerungspotenzials zukünftiger Fahrerassistenzsysteme ist neben der Betrachtung der Unfallhäufigkeit eine Analyse der Unfallkosten von Bedeutung, da diese Hinweise zu der Schwere des Unfalls geben. Dazu werden die im Rahmen der polizeilichen Unfallaufnahme ermittelten Daten zu den Unfallfolgen genutzt, die u.a. die entstandenen

Sach- und Personenschäden ausweisen. Für die im Stuttgarter Osten durchgeführte Untersuchung ergeben sich für das Jahr 1996 in der Summe:

- 2,1 Mio. DM Sachschaden<sup>1</sup>
- 119 Leichtverletzte
- 17 Schwerverletzte
- 1 Getöteter<sup>2</sup>

In Tabelle 2-7 sind die Unfalldaten im Untersuchungsgebiet dem Unfallgeschehen innerorts im gesamten Bundesgebiet gegenübergestellt. Bei den Unfällen mit Personenschaden liegt der Anteil der Schwerverletzten etwas unter dem Bundesdurchschnitt. Bezüglich der durchschnittlichen Zahl der verletzten Personen bei einem Unfall sind im Stuttgarter Osten bei den Schwerverletzten etwas weniger und bei den Leichtverletzten etwas mehr verunglückte Personen zu verzeichnen.

Tabelle 2-7: Vergleich der Unfalldaten im Untersuchungsgebiet zum Unfallgeschehen innerorts im gesamten Bundesgebiet

	Bundesrepublik Deutschland 1996		Untersuchungsgebiet (Stuttgart Ost)	
<b>UPS</b> *)	236.000		99	
<b>Verletzte</b>	291.131		137	
darunter <b>Getötete</b>	2.131	0,7%	1	0,7%
<b>Schwerverletzte</b>	54.300	18,7%	17	12,4%
<b>Leichtverletzte</b>	234.700	80,6%	119	86,9%
<b>Verletzte / 100 Unfälle</b>	123,4		138,4	
darunter <b>Getötete</b>	0,9		1,0	
<b>Schwerverletzte</b>	23,0		17,2	
<b>Leichtverletzte</b>	99,5		120,2	

\*) Anzahl der Unfälle mit Personenschaden als schwerste Unfallfolge

Die Zuordnung der Unfallfolgen zu den Unfallsituationen zeigt, dass bezüglich des Straßentyps 61% der Sachschäden und 75% der Leicht- bzw. 64% der Schwerverletzten auf die Straßen mit zwei und mehr Fahrstreifen pro Fahrtrichtung (C1 und C2) entfallen. Die Anteile an den Sach- und Personenschäden liegen somit deutlich über dem Anteil der Unfälle auf Straßen vom Typ C1 und C2 (Kapitel 2.4.2). Die ermittelte steigende Unfallzahl auf den Hauptverkehrsstraßen bei ausschließlicher Betrachtung von Unfällen mit Personenschäden deckt sich mit verschiedenen Untersuchungsergebnissen von MÜLLER et al. (1983), KLEIN & SCHWEIG (1991) und PAUEN-HÖPPNER & HÖPPNER (1984). Als Gründe werden insbesondere die hohe Kfz-Verkehrstärke und Kfz-Geschwindigkeit, eine breite Fahrbahn und die hohe Anzahl querender Fußgänger angeführt (TOPP 1986). Ein ähnlicher Trend liegt bei den knotenfreien Unfallsituationen (K0) vor, auf die bei einem Anteil von 42% der Unfallsituationen knapp 50% der Sach- und Personenschäden entfallen.

<sup>1</sup> Die Schätzung der Schadenshöhe durch die Polizei erfolgte 1996 in der Währungseinheit DM. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die Unfallkosten und alle davon abgeleiteten Größen in DM angegeben.

<sup>2</sup> Der eine Unfalltote ist auf einen Unfall an einer lichtsignalgesteuerten Kreuzung zurückzuführen. Mit der gewählten Grundgesamtheit von 324 Unfällen bzw. 546 Unfallsituationen ist die Unfallfolge „Getöteter“ nicht signifikant, weshalb im weiteren Verlauf der Untersuchung der Unfalltote als Schwerverletzter behandelt wird.



Innerhalb der Knotenpunktsituationen ist eine deutliche Verschiebung zu den lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten festzustellen. Bei einem Anteil von 36% der Unfallsituationen entfallen 46% der Sachschäden, 58% der Leichtverletzten und 100% der Schwerverletzten auf diesen Knotentyp.

Die *Unfallkosten* ergeben sich aus der Summe der Personen- und Sachschäden. Dazu sind die Personenschäden monetär darzustellen. In verschiedenen Untersuchungen wurden die volkswirtschaftlichen Kosten von Verkehrsunfällen festgesetzt und dabei u.a. die Folgekosten von Personenschäden ermittelt. Nach BAUM et al. (1998) sind bei den Unfallkosten die nachstehenden Kostenarten zu unterscheiden:

- Reproduktionskosten: enthalten Kosten, die zur Wiederherstellung des Zustands vor dem Unfall notwendig sind (z.B. Arzt-, Rehabilitations-, Verwaltungs- und Rechtsfolgekosten)
- Ressourcenausfallkosten: beziffern den entstandenen Schaden, der sich aus der aufgrund der Schädigung von Personen und Sachen nicht zur Verfügung stehenden Arbeitsleistung ergibt
- Unfallvermeidungskosten: Kosten, die durch den Verkehrsteilnehmer zur Vermeidung von Verkehrsunfällen aufgebracht werden (z.B. Ausrüstung des Fahrzeugs mit ABS oder Airbag)
- Humanitäre Kosten: Diese Kostenart berücksichtigt die psychische Beeinträchtigung der Angehörigen von Unfallopfern. So wird u.a. die geminderte Arbeitsleistung der Angehörigen in den Unfallfolgekosten berücksichtigt.

Die Unfallkosten variieren in den einzelnen Untersuchungen (BAST, PLANCO (1990), UPI (1991), INFRAS/IWW (1995)) sehr stark in den berücksichtigten Kostenarten und in der Festsetzung der Kostenhöhe. In Abhängigkeit der herangezogenen Kostensätze variieren die jährlichen Unfallkosten für den Straßenverkehr in der Bundesrepublik Deutschland zwischen 19,6 und 81 Mrd. DM. Für die angestrebte Analyse ist insbesondere eine Differenzierung der Unfallfolgekosten hinsichtlich der Personenschäden für Schwer- und Leichtverletzte von Bedeutung, weshalb die Untersuchungen von PLANCO und INFRAS/IWW hierfür nicht herangezogen werden können. Da eine plausible Berücksichtigung der humanitären Kosten derzeit noch nicht gegeben ist und die in UPI festgesetzten Kosten als willkürlich anmutende Wertansätze kritisiert werden (BAUM et al. 1998), werden die Kostensätze von HÖHENSCHIED (1999) genutzt (Tabelle 2-8), die auf die Untersuchung der BAST (KRUPP & HUNDHAUSEN 1984) zurückgehen und ausschließlich die Reproduktions- und Ressourcenausfallkosten berücksichtigen.

Anhand der polizeilichen Unfalldaten können zu jedem Unfall die Unfallkosten ermittelt werden. Sind zu einem Unfall zwei Unfallsituationen klassifiziert, werden im Rahmen der situationsbezogenen Betrachtung die Unfallkosten gleich gewichtet auf die Unfallsituationen aufgeteilt. Von einer Aufteilung der Sach- und Personenschäden, entsprechend der polizeilichen Unfallaufnahme, wird abgesehen, da das Schadensausmaß stark korreliert ist mit dem Gebrauchswert und der Sicherheitsausstattung der Unfallfahrzeuge. So wird sich bei einem neuen Oberklassefahrzeug in aller Regel ein deutlich höherer Sachschaden als bei einem alten Kleinwagen ergeben. Dafür fallen aufgrund eines besseren Insassenschutzes die Personenschäden häufig wesentlich geringer aus.

Tabelle 2-8: *Unfallkosten bei Personenschäden infolge eines Straßenverkehrsunfalls (nach HÖHENSCHIED 1999)*

	Reproduktionskosten	Ressourcen- ausfallkosten	Summe
Leichtverletzter	1.950 DM	2.150 DM	4.100 DM
Schwerverletzter	29.450 DM	43.550 DM	73.000 DM
Toter	20.600 DM	1.500.000 DM	1.520.600 DM

### Analyse der Unfallkosten in Unfallsituationen

Für das Untersuchungsgebiet ergeben sich neben 2,1 Mio. DM Sachschaden noch Unfallkosten in Höhe von 1,3 Mio. DM für die Schwerverletzten und 0,46 Mio. DM für die Leichtverletzten und somit in der Summe Unfallkosten von 3,9 Mio. DM. In Tabelle 2-9 sind die sich ergebenden Unfallkosten für die einzelnen Unfallsituationen aufgeführt.

Wie bereits bei der Betrachtung der Unfallfolgen angedeutet liegt bei den Straßentypen C1 bis C4 im Vergleich zu der Unfallhäufigkeit keine Gleichverteilung mehr vor. Vielmehr ist eine Konzentration auf die Straßen mit mehreren Fahrstreifen pro Fahrtrichtung (C1 und C2) festzustellen. Bezüglich des Knotentyps zeigt sich, dass 48% der Unfallkosten auf knotenfreie Unfallsituationen entfallen und somit ein um 8 Prozentpunkte höherer Anteil als bei der Unfallhäufigkeit vorliegt.

Tabelle 2-9: *Unfallkosten in den Unfallsituationen für Stuttgart Ost im Jahr 1996 (in TDM und %)*

Straßen- typ	Knoten- typ	Fahrtrichtung			Straßen- typ	Knoten- typ	Fahrtrichtung			
		F0	F1	F2			F0	F1	F2	
C1	K0	<b>716</b> 18,3%	-	-	C4	K0	<b>337</b> 9,6%	-	-	<b>13</b> 0,3%
	K1	<b>590</b> 15,1%	-	-		<b>112</b> 2,9%	K1	<b>16</b> 1,4%	<b>1</b> 0,0%	<b>18</b> 0,5%
	K2	-	-	-		K2	<b>51</b> 1,3%	<b>33</b> 0,8%	<b>12</b> 0,3%	
	K3	<b>19</b> 0,5%	-	-		K3	<b>7</b> 0,2%	-	-	<b>3</b> 0,1%
	K4	-	-	<b>13</b> 0,3%		K4	<b>14</b> 0,3%	<b>29</b> 0,7%	<b>73</b> 1,9%	
C2	K0	<b>420</b> 10,8%	-	-	C5	K0	<b>83</b> 2,1%	-	-	<b>2</b> 0,0%
	K1	<b>304</b> 8,7%	<b>93</b> 2,4%	<b>57</b> 1,4%		K1	<b>2</b> 0,1%	-	-	-
	K2	-	-	-		K2	<b>31</b> 0,8%	<b>7</b> 0,2%	-	-
	K3	<b>72</b> 1,8%	<b>5</b> 0,1%	<b>25</b> 0,6%		K3	-	-	-	-
	K4	-	<b>2</b> 0,0%	<b>3</b> 0,1%		K4	-	<b>9</b> 0,2%	<b>20</b> 0,5%	
C3	K0	<b>228</b> 5,8%	-	-						
	K1	<b>44</b> 1,1%	-	-						
	K2	-	-	-						
	K3	<b>181</b> 4,6%	<b>1</b> 0,0%	<b>10</b> 0,3%						
	K4	<b>61</b> 1,6%	<b>13</b> 0,8%	<b>20</b> 0,5%						

**Unfallkosten an Knotenpunkten:** Der im Vergleich zu der Unfallhäufigkeit geringere Anteil der Unfallkosten an Knotenpunkten gilt nicht generell für Knotenpunktsituationen. Dies zeigt sich in Tabelle 2-10, in der die Verteilung der Unfallkosten ausschließlich für Knotenpunktsituationen (K1 bis K4) aufgeführt ist. Demnach liegen

- 65% der Unfallkosten an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten (K1),
- 7% an rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkten (K2) und
- 28% an schildergeregelten Knotenpunkten (K3 und K4).

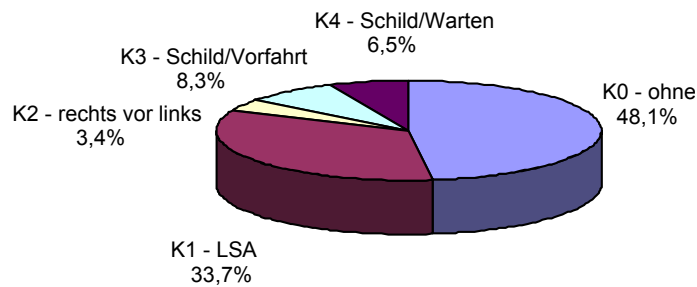


Abbildung 2-7: Unfallkosten in Abhängigkeit des Knotentyps

Unter Berücksichtigung der Unfallhäufigkeit (vgl. Tabelle 2-5) zeigt sich für die lichtsignalgesteuerten Knotenpunkte (K1), dass bei einem Anteil von 36% der Unfallsituationen 65% der Kosten auf diesen Knotentyp entfallen. Der deutliche Anstieg der Unfallschwere bei Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen zeigt sich u.a. auch in einer Untersuchung von VOB (1994). Dies ist insbesondere auf die wesentlich höhere Zahl von Personenschäden zurückzuführen, was im folgenden Abschnitt anhand der Betrachtung der mittleren Unfallkosten verdeutlicht wird.

Tabelle 2-10: Unfallkosten in Abhängigkeit des Knotentyps und der Fahr- richtung (in %)

Knotentyp	F0 geradeaus	F1 rechts	F2 links	
K1 – LSA	50,7	4,6	9,6	64,9
K2 – rechts vor links	4,0	2,0	0,6	6,6
K3 – Schild/Vorfahrt	13,8	0,3	1,8	15,9
K4 – Schild/Warten	3,7	2,6	6,4	12,6
	72,2	9,4	18,4	100,0

### Mittlere Unfallkosten

Durch die Bildung des Quotienten aus der Summe der Unfallfolgekosten  $K_{US}$  und der Anzahl der Unfallsituationen  $Z_{US}$ , können die mittleren Unfallkosten  $\bar{K}_{US}$  zu einer Unfallsituation bestimmt werden:

$$\bar{K}_{US} = \frac{K_{US}}{Z_{US}} \quad (2-1)$$

Unter Berücksichtigung aller Unfallsituationen errechnen sich bei über 3,9 Mio. DM Unfallkosten und 546 Unfallsituationen im Untersuchungsgebiet die mittleren Unfallkosten einer Unfallsituation im Stadtbereich zu 7.200 DM. Es muss hierbei berücksichtigt werden, dass es sich nicht um die durchschnittlichen Kosten eines Unfalls handelt, sondern um die durchschnittlichen Kosten, die sich für einen Verkehrsteilnehmer ergeben, der im Stadtverkehr in eine Unfallsituation gerät. Bei einer Differenzierung hinsichtlich des Knotentyps können die mittleren Unfallkosten für knotenfreie Unfallsituationen, Unfallsituationen an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten usw. berechnet werden. Die Ergebnisse der mittleren Unfallkosten in Abhängigkeit des Knotentyps sind in Tabelle 2-11 aufgeführt. Mit 11.600 DM liegen die mittleren Unfallkosten bei Unfallsituationen an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten am höchsten. Die geringsten Kosten (3.400 DM) entstehen bei den Unfallsituationen an schildergeregelten Knotenpunkten. Die mittleren Unfallkosten, als Maß für die durchschnittliche Schadenshöhe einer Unfallsituation, bringt dabei auch das von der Unfallsituation ausgehende Gefährdungspotenzial zum Ausdruck.

Tabelle 2-11: *Mittlere Unfallkosten für Unfallsituationen im Stadtverkehr*

Knotentyp	Mittlere Unfallkosten $\overline{K}_{US}$ [DM/Unfallsituation]
K0 – knotenfrei	8.200
K1 – LSA	11.600
K2 – rechts vor links	4.300
K3+K4 – Schild	3.400

#### 2.4.4 Unfallrisiko

Mit Ausnahme der mittleren Unfallkosten wurden in den vorherigen Kapiteln ausschließlich absolute Unfallkennziffern ermittelt. Über relative Unfallkennziffern, die den Bezug zu der Fahrleistung oder Population beinhalten, werden Hinweise auf das Gefährdungspotenzial und somit auf das Unfallrisiko gegeben. Gängige Kennziffern hierzu sind:

- Unfalldichte und Unfallkostendichte (Streckenlänge)
- Unfallbelastung und Unfallkostenbelastung (Population)
- Unfallrate und Unfallkostenrate (Fahrleistung)

Bei sämtlichen relativen Unfallkennziffern zeigt sich häufig die Beschaffung der Bezugsdaten als äußerst problematisch, da diese zumeist an verschiedenen Stellen erhoben werden müssen oder vielfach für den Untersuchungszeitraum gar nicht vorliegen.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird auf eine Analyse der Unfallbelastung verzichtet, da für den Stuttgarter Osten – aufgrund des hohen Anteils des Durchgangsverkehrs – die Bevölkerungszahl keine repräsentative Bezugsgröße darstellt. Geeignete relative Unfallkennziffern bilden die Unfallrate und die Unfallkostenrate. Im Gegensatz zu der üblicherweise verwendeten Bezugsgröße des durchschnittlichen Tagesverkehrs (DTV) wird in dieser Arbeit die Häufigkeit des Auftretens von Verkehrssituationen bei einer typischen Stadtfahrt als Maß für die Fahrleistung genutzt.

#### Verkehrssituationen bei einer typischen Stadtfahrt

Neben der Analyse des Unfallgeschehens ist zur Beschreibung der Verkehrsabläufe im Stadtverkehr die Häufigkeit des Auftretens der Verkehrssituationen bei einer Stadtfahrt zu diskutieren. Es gilt festzustellen wie häufig eine Verkehrssituation von einem Fahrer bei einer Stadtfahrt erlebt bzw. durchfahren wird.

Zur quantitativen Beschreibung des Verkehrsablaufs wurden von FASTENMEIER (1995) die von BENDA (1983) in München erhobenen Daten genutzt, um Situationenkataloge für die repräsentativen Fahrttypen *Fahrt von/zur Arbeit*, *Erledigungsfahrt*, *Freizeitfahrt* und *Wochenendfahrt* aufzustellen. In Anlehnung an diese Situationenkataloge, wird im Folgenden ein Situationenkatalog für eine **Stadtfahrt** abgeleitet, als eine ausschließlich innerorts verlaufende Fahrt, die nur die hier betrachteten Situationselemente Straßentyp, Knotentyp und Fahrtrichtung enthält.

Innerhalb der einzelnen Fahrttypen sind ca. 80 Verkehrssituationen pro Fahrt enthalten (FASTENMEIER 1995). Des Weiteren wird für eine Verkehrssituation bei einer Stadtfahrt eine mittlere Länge von 66 Metern und eine Dauer von 7 Sekunden angegeben. In Tabelle 2-12 ist die Häufigkeit des

Auftretens der einzelnen Verkehrssituationen angegeben. Dabei sind die Werte auf 100 normiert, so dass sich direkt der prozentuale Anteil ergibt. Diese Aufstellung soll Hinweise geben wie häufig eine Verkehrssituation durchfahren wird und in welchen Kombinationen die Situationselemente auftreten.

Hiernach ist ersichtlich, dass eine Stadtfahrt überwiegend auf den Durchgangs- und Hauptverkehrsstraßen (C1 bis C3) verläuft. Nur 12% der Verkehrssituationen liegen innerhalb von Wohnquartieren (C4 und C5). Die rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkte (K2) treten nur bei den untergeordneten Straßen auf. Insgesamt besteht eine Stadtfahrt aus 53% knotenfreien Verkehrssituationen (K0) und 47% Knotenpunktsituationen (K1 bis K4).

Tabelle 2-12: Häufigkeit von Verkehrssituationen für eine Stadtfahrt (in %)

Straßen- typ	Knoten- typ	Fahrtrichtung			Straßen- typ	Knoten- typ	Fahrtrichtung		
		F0	F1	F2			F0	F1	F2
C1	K0	21	-	-	C4	K0	2	-	-
	K1	6	1	1		K1	-	0,5	0,5
	K2	-	-	-		K2	1	0,5	0,5
	K3	5	-	-		K3	-	-	-
	K4	-	-	-		K4	-	1	1
C2	K0	13	-	-	C5	K0	2	-	-
	K1	3	1	1		K1	1	-	-
	K2	-	-	-		K2	1	-	-
	K3	4	0,5	0,5		K3	-	-	-
	K4	-	0,5	0,5		K4	-	0,5	0,5
C3	K0	15	-	-					
	K1	3	1	1					
	K2	-	-	-					
	K3	5	0,5	0,5					
	K4	3	0,5	0,5					

Die Verteilung der Knotenpunktsituationen zeigt: Die Hälfte der Knotenpunktsituationen beziehen sich auf schildergeregelte Knotenpunkte (K3 und K4), wobei bei zwei Dritteln ein Vorfahrtsrecht (K3) für den Fahrer besteht; 43% der Knotenpunktsituationen führen über lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte. Nur bei jeder 16. Knotenpunktsituation gilt die Rechts-vor-links-Regelung.

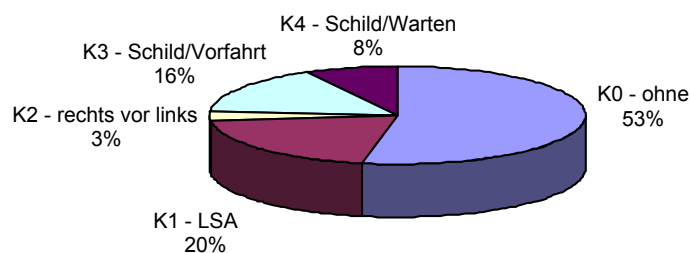


Abbildung 2-8: Häufigkeit von Verkehrssituationen für eine Stadtfahrt in Abhängigkeit des Knotentyps

### Unfallsituationsrate und Unfallsituationskostenrate

In Anlehnung an die auf eine Stelle oder Strecke bezogene Unfallrate wird über die Anzahl der Unfälle  $Z$  in dem betrachteten Gebiet in einem Jahr und der Jahresfahrleistung  $FL$  innerhalb dieses Gebietes die flächenbezogene Unfallrate  $U_r$  berechnet:

$$U_r = \frac{Z \cdot 10^6}{FL} \quad (2-2)$$

Für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland ergibt sich für die innerörtlichen Unfälle im Jahr 1996 eine Unfallrate von 2,5. Bei 406 Unfällen im Stuttgarter Osten und einer aus den Belastungsplänen des Regionalverkehrsplans von 1995 abgeleiteten Jahresfahrleistung von 166 Mio. Kfzkm erhält man für das Untersuchungsgebiet eine Unfallrate von 2,4.

Mit der Modellierung einer Stadtfahrt durch standardisierte Verkehrssituationen wird eine Fahrstrecke von einem Kilometer durchschnittlich von ca. 12 Verkehrssituationen repräsentiert (vgl. FASTENMEIER 1995). Die 166 Mio. Kfzkm entsprechen somit 1.992 Mio. Verkehrssituationen, die im Jahr 1996 im Stuttgarter Osten aufgetreten sind. Über die Anzahl der aufgetretenen Verkehrssituationen und dem prozentualen Anteil einer Verkehrssituation im Stadtverkehr (s. Tabelle 2-12), kann auf die Zahl der Verkehrssituationen  $Z_{VS}$ , die in einem Jahr im Untersuchungsgebiet aufgetreten sind, geschlossen werden.

Über die gegebene Anzahl der Unfallsituationen  $Z_{US}$  und der im obigen Absatz ermittelten Zahl der Verkehrssituationen  $Z_{VS}$  kann über

$$U_{r,VS} = \frac{Z_{US} \cdot 10^6}{Z_{VS}} \quad (2-3)$$

die Unfallsituationsrate  $U_{r,VS}$  ermittelt werden. Für das Untersuchungsgebiet ergibt sich mit 546 Unfallsituationen somit eine Unfallsituationsrate von 0,23 Unfallsituationen pro 1 Mio. Verkehrssituationen. Analog zur Unfallsituationsrate kann mit

$$K_{r,VS} = \frac{K_{US} \cdot 10^6}{Z_{VS}} \quad (2-4)$$

die Unfallsituationskostenrate  $K_{r,VS}$  berechnet werden. Für das Untersuchungsgebiet liegt die Unfallsituationskostenrate bei 2,0 TDM pro 1 Mio. Verkehrssituationen.

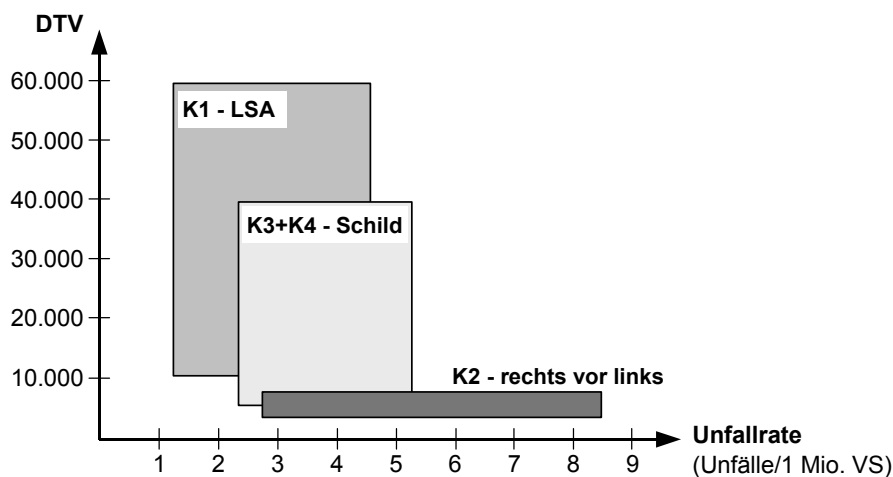


Abbildung 2-9: Einsatzbereich und Verkehrsregelung sowie korrespondierende Unfallraten an städtischen Knotenpunkten in Abhängigkeit vom DTV (nach MENSEBACH (1994))

Durch entsprechendes vorheriges Gruppieren der Anzahl der Unfallsituationen bzw. der Summen der Unfallkosten und der Anzahl der Verkehrssituationen nach verschiedenen Situationselementen können die Unfallsituationsraten und Unfallsituationskostenraten bestimmt werden. Hinsichtlich der

unterschiedlichen Straßentypen ist die drei- bis viermal höhere Unfallrate innerhalb schmaler Straßen (C4) auffällig (vgl. Tabelle 2-13a). Die exponierte Stellung dieses Straßentyps kommt ebenso bei der Kostenrate zum Ausdruck. Für die einzelnen Knotenpunkte liegt an den rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkten (K2) die Unfallrate am höchsten. Die geringste Unfallrate weisen die lichtsignalgesteuerten Knotenpunkte (K1) auf. In MENSEBACH (1970) wird die gleiche Abstufung der Unfallrate für die verschiedenen Regelungsarten an Knotenpunkten ermittelt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Unfallsituationsrate durch die bestehende Abhängigkeit zu den DTV-Werten für die Knotenpunktregelung erheblich beeinflusst wird (Abbildung 2-9).

Tabelle 2-13: Unfallsituationsrate  $U_{r,VS}$  und Unfallsituationskostenrate  $K_{r,VS}$  in Abhängigkeit des Straßentyps (a) und des Knotentyps (b)

(a) Straßentyp	$U_{r,VS}$ [US/1 Mio. VS]	$K_{r,VS}$ [TDM/1 Mio. VS]	(b) Knotentyp	$U_{r,VS}$ [US/1 Mio. VS]	$K_{r,VS}$ [TDM/1 Mio. VS]
C1	0,20	2,1	K0	0,21	1,8
C2	0,30	2,2	K1	0,28	3,3
C3	0,21	1,0	K2	0,55	2,2
C4	0,86	4,9	K3+K4	0,37	1,2
C5	0,22	1,5			

Unter Berücksichtigung der Unfallkosten verschiebt sich das Bild dahingehend, dass mit 3.300 DM pro 1 Mio. Verkehrssituationen **an den lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten eine dreimal so hohe Unfallsituationskostenrate** vorliegt als an den schildergeregelten Knotenpunkten (s. Tabelle 2-13b). Hinsichtlich den Fahrtrichtungsmanövern zeigen die Verkehrssituationen ohne Fahrtrichtungsänderung dieselbe Unfallsituationsrate wie Verkehrssituationen, in denen nach rechts abgebogen wird. Wird dagegen eine **Fahrtrichtungsänderung nach links** vorgenommen, steigt die **Unfallsituationsrate** um das **2,5fache** an.

### Unfallsituationsdichte und Unfallsituationskostendichte

Bezieht man die Unfallzahlen bzw. die Unfallkosten auf einen Streckenabschnitt so lassen sich die Unfalldichte bzw. die Unfallsituationskostendichte berechnen. Im Rahmen der hier durchgeführten situationsbezogenen Unfallanalyse dient nicht der Streckenabschnitt, sondern die Verkehrssituation als Bezugsgröße. Die Unfallsituationsdichte  $U_{d,VS}$  für Knotenpunkte ist definiert durch:

$$U_{d,VS} = \frac{Z_{US}}{N_{VS}} \quad \text{mit } N_{VS} = \text{Anzahl der Knotenpunkte vom Typ } K_{VS} \quad (2-5)$$

Die Unfallsituationskostendichte berechnet sich für Knotenpunkte zu

$$K_{d,VS} = \frac{K_{US}}{N_{VS}} \quad (2-6)$$

Bei den knotenfreien Verkehrssituationen dient als Bezugsgröße die Streckenlänge in Kilometer.

Die so ermittelten Werte zeigen sowohl für die Unfallsituationsdichte wie für die Unfallsituationskostendichte – ausgehend von den Straßen vom Typ C1 – eine kontinuierlich absteigende Tendenz. Für Knotenpunkunfälle wird die Unfalldichte auf die Anzahl der Knotenpunkte mit der entsprechenden Vorfahrtsregelung im Untersuchungsgebiet bezogen. Dabei weisen die lichtsignal-

gesteuerten Knotenpunkte die höchste Unfallsituationsdichte auf. Unter Berücksichtigung der Unfallkosten verstärkt sich dieser Eindruck.

- Für die 20 lichtsignalgesteuerten Knotenpunkte (K1) im Untersuchungsgebiet ergeben sich für das Jahr 1996 durchschnittlich 62.800 DM Unfallkosten pro Knotenpunkt (vgl. Tabelle 2-14),
- auf die schildergeregelten Knotenpunkte entfallen 6.400 DM pro Knotenpunkt,
- auf die rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkte entfallen 1.200 DM pro Knotenpunkt.

Tabelle 2-14: *Unfallsituationsdichte  $U_{d,vs}$  und Unfallsituationskostendichte  $K_{d,vs}$  in Abhängigkeit des Knotentyps pro Jahr*

Knotentyp	$U_{d,vs}$ [US/Knotenpunkt]	$K_{d,vs}$ [TDM/Knotenpunkt]
K1 – LSA	5,3	62,8
K2 – rechts vor links	0,3	1,2
K3+K4 – Schild	2,0	6,4

**Ergebnis der situationsbezogenen Analyse des Verkehrs- und Unfallgeschehens im innerstädtischen Straßenverkehr:** Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass an schildergeregelten und lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten der Fahrer häufig in Unfallsituationen gerät. Die Unfallschwere liegt an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten deutlich höher als in allen anderen Unfallsituationen im Stadtverkehr. **Mit den lichtsignalgesteuerten und schildergeregelten Verkehrssituationen sind somit Verkehrssituationen im Stadtverkehr identifiziert, bei denen eine signifikante Sicherheitssteigerung durch den Einsatz eines Fahrerassistenzsystems zu erwarten ist.** Da die bisherigen Betrachtungen noch keine Hinweise geben, bei welchen Tätigkeiten der Fahrer unterstützt werden soll, wird im Folgenden das Fehlverhalten in Unfallsituationen näher untersucht.

#### 2.4.5 Fehlverhalten in Unfallsituationen

Unter dem Fehlverhalten wird grundsätzlich das Abweichen vom Soll-Verhalten verstanden, wobei nach JENSCH et al. (1978) das Soll-Verhalten nicht von den juristischen Normen ableitbar ist, sondern sich aus der sachlich begründeten Notwendigkeit der jeweiligen Verkehrssituation ergibt. Vom Fahrer wird somit ein situationsangepasstes Fahrerverhalten gefordert. Das Fahrerverhalten ist bestimmt von Tätigkeiten, die dem Fahrer zur Fortbewegung im Verkehrsgeschehen dienen. Nach JÜRGENSOHN (1997) kann eine Unterteilung entsprechend der Einflussnahme auf den Fahrprozess in direkte und indirekte Tätigkeiten erfolgen. Die indirekten Tätigkeiten bestehen im Wesentlichen aus der Informationsaufnahme und -verarbeitung zur Gewinnung von Entscheidungskriterien für das weitere Handeln. Die direkten Tätigkeiten dienen der Realisierung der gewünschten Fahrzeugbewegung, zu deren Umsetzung der Fahrer die entsprechenden Steuerelemente wie Lenkrad, Gas- und Bremspedal usw. betätigt. In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass auch nicht ausgeführte Tätigkeiten, die im Wesentlichen auf Wahrnehmungsfehler, wie das Übersehen eines anderen Verkehrsteilnehmers oder die Missachtung der Verkehrsregelung, zurückzuführen sind, ebenso zu den Fahretätigkeiten gerechnet werden müssen.



Ein situationsangepasstes Fahrerverhalten ist gekennzeichnet von dem Freisein von Konfliktsituationen. Ein davon abweichendes Verhalten führt den Fahrer in eine Konfliktsituation, wobei mit zunehmender Abweichung der Schweregrad der Konfliktsituation steigt. Mit der Untersuchung des *Fehlverhaltens in Unfallsituationen* werden somit nur die gravierendsten Verhaltensfehler berücksichtigt.

### **Fehlverhaltenkatalog**

Zur Untersuchung des Fehlverhaltens in Unfallsituationen wird ein Katalog – bestehend aus acht Fehlverhalten – aufgestellt, der den notwendigen Bezug zur Unfallsituation herstellt und eine eindeutige Beschreibung des Fehlverhaltens gestattet. Es sind dabei nur Fehlverhalten enthalten, die anhand der polizeilichen Unfalldaten identifiziert und den klassifizierten Unfallsituationen zugeordnet werden können. Dadurch fällt das Fehlverhalten im Wesentlichen auf den Aufgabenbereich, in welchem der Fahrer sich innerhalb des Verkehrsraums bewegt und der maßgeblich durch den Straßenausbau, die Verkehrsregelung, die gewählte Fahrtrichtung und nicht zuletzt durch die übrigen Verkehrsteilnehmer beeinflusst wird. Die dabei auftretenden Fehler liegen weniger bei der Aktionsausführung, als vielmehr auf Seiten der Informationsaufnahme und -verarbeitung und somit bei den indirekten Tätigkeiten.

Im Rahmen der Untersuchung werden folgende Fehlverhalten unterschieden:

- FV1 Abkommen von der Fahrbahn
- FV2 Fehler in der Abstandsregelung
- FV3 Fehler beim Fahrstreifenwechsel
- FV4 Missachtung der Lichtsignalanlage
- FV5 Missachtung der Vorfahrt
- FV6 Fehler beim Wenden
- FV7 Fehler beim Ein- und Ausparken
- FV8 Falsches Verhalten gegenüber Fußgängern und Radfahrern

Das *Abkommen von der Fahrbahn* (FV1) beinhaltet sämtliche Vorgänge, bei denen eine fehlerhafte Querführung des Fahrzeugs vorliegt. Neben dem Abkommen von der Fahrbahn und dem Abkommen auf die Gegenfahrbahn sind Fehler in der Spurhaltung enthalten. Unter FV2 sind die Fehler in der Längsführung zusammengefasst. Durch die Einschränkung auf Fehlverhalten in Unfallsituationen sind hierbei neben der Unaufmerksamkeit eine Geschwindigkeitsüberschreitung und ein zu geringer Sicherheitsabstand zu sehen, wodurch es zu einer Kollision mit einem in gleicher Richtung fahrenden Fahrzeug kommt. Dieser Fehlertyp wird im Folgenden als *Fehler in der Abstandsregelung* (FV2) bezeichnet.

Das Fehlverhalten *Fehler beim Ein- und Ausparken* (FV7) findet bei Unfällen Anwendung, bei denen beim Ein- oder Ausparken oder einem anderen Rangiermanöver ein parkendes Fahrzeug oder ein anderes feststehendes Hindernis beschädigt wird. Bei Unfällen, bei denen es infolge des Abkommens von der Fahrbahn zu einer Kollision mit einem parkenden Fahrzeug kommt, wird nicht der Fehler beim Ein- und Ausparken (FV7), sondern das Abkommen von der Fahrbahn (FV1) als Fehlverhalten festgesetzt. Wird hingegeben bei einem Wende- oder Rangiermanöver vom Fahrer nicht ausreichend auf das umliegende Verkehrsgeschehen geachtet und kommt es dadurch zu einer Kollision mit einem anderen aktiv am Verkehrsgeschehen teilnehmenden Fahrzeug, so wird in diesen Fällen ein *Fehler beim Wenden* (FV6) festgesetzt.

Die Fehlverhalten FV3 bis FV5 beinhalten die Verkehrsregelung hinsichtlich Vorfahrt bzw. Vorrang, die durch eine Lichtsignalanlage oder ein Verkehrszeichen angezeigt werden oder sich aus den allgemeinen Verkehrsregeln ergeben. Der *Fehler beim Fahrstreifenwechsel* (FV3), der wie das Abkommen von der Fahrbahn (FV1) in den Bereich der Querführung fällt, unterscheidet sich von FV1 dahingehend, dass der Fahrer hier bewusst den Wechsel des Fahrstreifens einleitet und dabei einen anderen Verkehrsteilnehmer übersieht, der sich seitlich in gleicher Richtung bewegt. Bei der *Missachtung der Vorfahrt* (FV5) kommt es aufgrund einer Verletzung der Vorfahrt bzw. des Vorrangs eines Verkehrsteilnehmers zu einer Kollision. Dies ergibt sich daraus, dass der Unfallverursacher die geltende Vorfahrts- bzw. Vorrangsregelung nicht wahrnimmt oder die zur Verfügung stehende Zeit für die Ein- bzw. Überfahrt falsch einschätzt (vgl. LEUTZBACH & PAPAVALIOU 1988). Ebenso kann die Ursache in einem Übersehen des bevorrechtigten Verkehrsteilnehmers liegen. Die Missachtung der Vorfahrt ist nicht auf schilder- und rechts-vor-links-geregelte Knotenpunkte beschränkt. Sie findet ebenso an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten (K1) oder beim Einfahren in ein Grundstück Anwendung, wenn beim Linksabbiegen der bevorrechtigte Gegenverkehr missachtet wird. Die *Missachtung der Lichtsignalanlage* (FV4) wird in den Unfallsituationen festgesetzt, bei denen der Verkehrsteilnehmer die Anzeige der Lichtsignalanlage missachtet. In aller Regel entspricht dies einer Überfahrt bei Rot.

Mit dem *falschen Verhalten gegenüber Fußgängern und Radfahrern* (FV8) wird das Fehlverhalten gegenüber den schwächeren Verkehrsteilnehmern klassifiziert. Im Allgemeinen liegt hier eine Vorfahrts- oder Vorrangsverletzung infolge des Übersehens des Verkehrsteilnehmers vor. Nicht explizit als Fehlverhalten sind die Geschwindigkeitsüberschreitung und der Alkoholeinfluss enthalten. Diese tauchen zum einen immer in Kombination mit einem anderen Fehlverhalten auf, da sie in der Regel keine ausreichende Voraussetzung für einen Unfall darstellen (ERKE 1985). Zum anderen liegen diese nur bedingt im Unterstützungsbereich eines Fahrerassistenzsystems für den Stadtverkehr. Beiden Ursachen muss durch restriktive bzw. administrative Maßnahmen begegnet werden.

### **Analyse des Fehlverhaltens in Unfallsituationen**

Nach dem oben dargestellten Katalog wird das Fehlverhalten in Unfallsituationen klassifiziert. Da das Fehlverhalten auf Seiten des Unfallverursachers liegt, kann die Festsetzung nur für die 312 Unfallsituationen der Unfallverursacher erfolgen.

Hinsichtlich der Verteilung des Fehlverhaltens in den einzelnen Straßentypen zeigt sich, dass das Fehlverhalten FV1 überwiegend und das Fehlverhalten FV3 ausschließlich auf den Straßen vom Typ C1 und C2 auftritt, d.h. auf Straßen mit zwei und mehr Fahrstreifen pro Fahrtrichtung und somit auf Straßen mit einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit und Verkehrsdichte. Dies gilt ebenso für die Auffahrunfälle, bei denen ein Fehler in der Abstandsregelung (FV2) vorliegt. Im Gegensatz dazu ist ein Fehler beim Ein- und Ausparken und beim Rangieren (FV7), bei denen auf ein parkendes Fahrzeug oder ein sonstiges Hindernis aufgefahren wird, überwiegend den Wohnstraßen (C4 und C5) zuzuordnen. Die Rotüberfahrt tritt verstärkt auf den übergeordneten Straßen auf, da sich an diesen vornehmlich die lichtsignalgesteuerten Knotenpunkte befinden. Die Vorfahrtsmissachtung liegt gehäuft bei den 2-3 streifigen und schmalen Straßen (C3 bis C5) vor. Durch die geringe Anzahl von Unfällen mit Fußgängern und Radfahrern kann beim Fehlverhalten

gegenüber den schwächeren Verkehrsteilnehmern keine Häufung hinsichtlich des Straßen- und Knotentyps festgestellt werden.

**Fehlverhalten in knotenfreien Unfallsituationen (K0):** In den knotenfreien Unfallsituationen ist ein großer Anteil der Unfälle (26%) auf einen Fehler beim Ein- und Ausparken (FV7) zurückzuführen. Unter Hinzunahme der 10% der Unfälle mit einem Fehlverhalten beim Wenden (FV6) passieren somit **über ein Drittel der Unfälle im Stadtverkehr** nicht innerhalb der eigentlichen Fahrt, sondern **bei Fahrtantritt bzw. -austritt** oder bei einem **Wende- bzw. Rangiermanöver**.

Tabelle 2-15: Fehlverhalten in Unfallsituationen im Stuttgarter Osten im Jahr 1996

Fehlverhalten		Stuttgart Ost
FV1	Abkommen von der Fahrbahn	14,4%
FV2	Fehler in der Abstandsregelung	18,0%
FV3	Fehler beim Fahrstreifenwechsel	6,7%
FV4	Missachtung der Lichtsignalanlage	7,4%
FV5	Missachtung der Vorfahrt	28,2%
FV6	Fehler beim Wenden	6,7%
FV7	Fehler beim Ein- und Ausparken	16,4%
FV8	Falsches Verhalten gegenüber FG und RF	2,2%

Die **häufigsten Fehlverhalten** bei Streckenunfällen sind mit 31% das **Abkommen von der Fahrbahn** (FV1) und mit 16% die **Fehler in der Abstandsregelung** (FV2). Als weitere stark vertretene Fehlerquelle erweist sich der Fahrstreifenwechsel (FV3). Die fünf Unfälle, bei denen eine Vorfahrtsmissachtung vorliegt, sind auf Abbiegevorgänge in Grundstückseinfahrten zurückzuführen, bei denen der bevorrechtigte Gegenverkehr nicht beachtet wurde. Diese Unfälle werden im Rahmen der Klassifizierung der Unfallsituationen nicht als Knotenpunkt, sondern als Streckenunfall klassifiziert (s. S. 17).

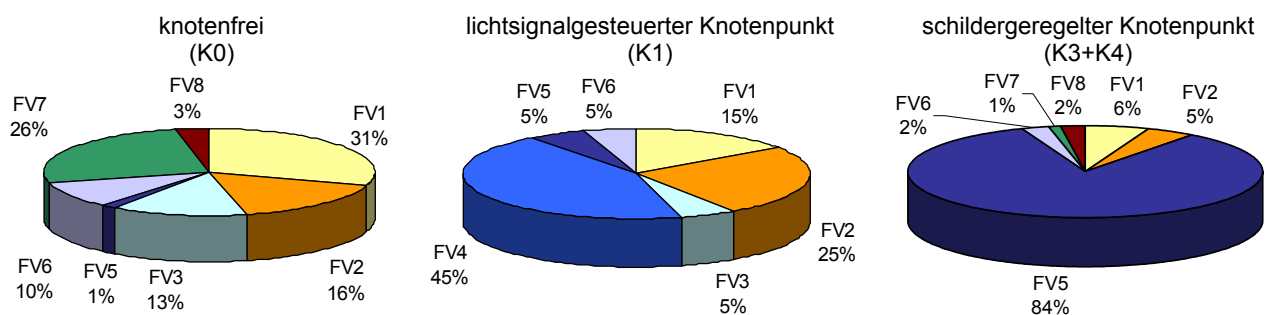


Abbildung 2-10: Fehlverhalten in Unfallsituationen in Abhängigkeit des Knotentyps

**Fehlverhalten in Unfallsituationen an Knotenpunkten:** Eine Betrachtung des Fehlverhaltens in Knotenpunktsituationen zeigt, dass bei lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten (K1) die Missachtung der Lichtsignalanlage (FV4) mit 45% das häufigste Fehlverhalten darstellt. Als weitere Fehlerquellen sind bei diesem Knotentyp die Abstandsregelung (FV2) mit 25% und die Querführung (FV1) mit 15% zu beachten. An den schildergeregelten Knotenpunkten (K3 und K4) liegt

meist die Vorfahrtsmissachtung als Fehlverhalten vor. Dies gilt ebenso für die rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkte (K2).

Bei der **Missachtung der Lichtsignalanlage** (FV4) und der **Vorfahrtsmissachtung** (FV5) zeigt sich anhand der Unfalldaten, dass dieses Fehlverhalten **mit zunehmenden Alter verstärkt auftritt**. In einer Untersuchung von RÜHLE (1996) wird dieses Phänomen ebenso dargestellt und auf eine sinkende Leistungsfähigkeit der älteren Verkehrsteilnehmer zurückgeführt, die sich in einer verlangsamten Informationsaufnahme und -verarbeitung ausdrückt.

**Ergebnis der Analyse des Fehlverhaltens in Unfallsituationen:** Bei einer Fokussierung der Betrachtung des Fehlverhaltens in Unfallsituationen auf die Knotenpunkunfälle ist im Ergebnis festzuhalten, dass an den **schilder- und rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkten** ein Fahrer bei der Erkennung der geltenden **Vorfahrts- und Vorrangsregelung** unterstützt werden muss. An den **lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten** ist der größte Sicherheitsgewinn von einem Fahrerassistenzsystem zu erwarten, das einer **Missachtung der Lichtsignalanlage** entgegenwirkt. Ebenso ist bei diesem Knotentyp die Vorfahrtsmissachtung zu beachten, auch wenn für das Untersuchungsgebiet nur eine geringe Anzahl von Vorrangs- und Vorfahrtsmissachtungen aufgetreten sind. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass in Stuttgart eine Lichtsignalsteuerung weitgehend vermieden wird, bei der sich kreuzende Verkehrsströme ergeben. Für andere Städte (z.B. Berlin) ist zu vermuten, dass an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten die Vorfahrtsmissachtung in noch stärkerem Maße anzutreffen ist, was im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht wurde.

## 2.5 Ergebnisse

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Verkehrs- und Unfallanalyse hatte das Ziel, die Stellen mit erhöhtem Konfliktpotenzial im innerörtlichen Straßenverkehr aufzudecken, an denen durch den Einsatz eines Fahrerassistenzsystems ein signifikanter Sicherheitsgewinn erwartet werden kann. Dazu wurden standardisiert Verkehrssituationen formuliert, die es gestatten, das komplexe Verkehrs- und Unfallgeschehen zu modellieren und damit einer systematischen Betrachtung zugänglich zu machen. Die vorgestellte Untersuchungsmethodik bietet den Vorteil, dass das Unfallgeschehen aus der Sicht des Fahrers beschrieben wird, was sich insbesondere in einer detaillierten Darstellung der Unfallsituationen für alle am Unfall beteiligten Kraftfahrzeugführer niederschlägt. Dabei kann auf die Unfalldaten der Polizei zurückgegriffen werden, wodurch eine kosten- und zeitintensive Erhebung der Unfalldaten entfällt. Die Untersuchung basiert auf 324 polizeilich erfassten Unfällen im Stuttgarter Osten aus dem Jahr 1996. Anhand dieser Unfälle konnten 546 Unfallsituationen klassifiziert werden.

Als Ergebnis der Verkehrs- und Unfallanalyse ist festzuhalten, dass sich im Stadtverkehr

- **58% der Unfallsituationen an Knotenpunkten** ereignen,

wobei diese mit

- **21% an lichtsignalgesteuerten** und
- **31% an schildergeregelten Knotenpunkten**

verstärkt auftreten. Als Hauptunfallursachen sind neben der Geschwindigkeitsüberschreitung und einem zu geringen Sicherheitsabstand insbesondere die Nichtbeachtung der Vorfahrt und ein Fehlverhalten beim Abbiegen festzuhalten (s. Kapitel 2.3.2 – Unfallursache). Die situationsbezogene Betrachtung des Fehlverhaltens in Unfallsituationen (Kapitel 2.4.5) zeigt, dass ein zukünftiges Fahrerassistenzsystem den Fahrer besonders vor

- **Rotüberfahrten** und
- **Vorfahrtsmissachtungen**

schützen muss.

Die aus einer Unfallsituation resultierenden Unfallkosten, die sich aus Sach- und Personenschäden zusammensetzen, dienen als Indikator für die Unfallschwere (vgl. Kapitel 2.4.3). Für den hier untersuchten innerstädtischen Straßenverkehr liegen an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten deutlich höhere Unfallkosten vor als an allen anderen Knotenpunktarten, was insbesondere auf Schwerverletzte zurückzuführen ist. Von den innerstädtischen Unfällen fallen demnach

- **52% der Unfallkosten an Knotenpunkten** an.

Differenziert nach der Art der Knotenpunktregelung verteilen sich die Unfallkosten im Stadtverkehr zu

- **34% auf lichtsignalgesteuerte** und
- **15% auf schildergeregelte Knotenpunkte**.

Die in Kapitel 2.4.4 ermittelten Unfallsituationsraten und Unfallsituationskostenraten verstärken diesen Eindruck. Im Vergleich zu den Streckensituationen (K0) weisen **sämtliche Knotenpunkt-situationen** (K1 bis K4) eine **höhere Unfallsituationsrate** auf, wobei die rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkte mit 0,55 Unfallsituationen pro 1 Mio. Verkehrssituationen die höchste Rate erkennen lassen. Für die schildergeregelten Knotenpunkte ergibt sich eine Unfallsituationsrate von 0,37, für lichtsignalgesteuerte 0,28. Das **hohe Gefährdungspotenzial an lichtsignal-gesteuerten Knotenpunkten** zeigt die Unfallsituationskostenrate, die bei diesem Knotentyp bei **3.300 DM pro 1 Mio. Verkehrssituationen** liegt und damit einen fast doppelt so hohen Wert aufweist wie knotenfreie Verkehrssituationen. Ebenso weisen die schildergeregelten Knotenpunkte mit 1.200 DM und die rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkte mit 2.200 DM eine deutlich geringere Unfallsituationskostenrate auf.

**Aufgrund der Unfallhäufigkeit, der Unfallsituationsrate, der Unfallsituationskostenrate und des Fehlverhaltens in Unfallsituationen ist eine signifikante Sicherheitssteigerung im Stadtverkehr durch eine Fahrerassistenz an lichtsignalgesteuerten und schildergeregelten Knotenpunkten zu erwarten, an denen der Fahrer in der korrekten Erkennung der geltenden Vorfahrts- bzw. Vorrangsregelung unterstützt wird.**

### **Abschätzung des Sicherheitssteigerungspotenzials**

Abschließend soll noch das Sicherheitssteigerungspotenzial eines Fahrerassistenzsystems abgeschätzt werden, das den Fahrer in den entsprechenden Verkehrssituationen über die Anzeige der Lichtsignalanlage und die Vorfahrtsregelung informiert. Dazu werden das Unfallvermeidungs-

potenzial und die mögliche Reduktion der Unfallkosten herangezogen. Unter der Annahme, dass es mit einem derartigen Fahrerassistenzsystem gelingt

- 75% der Unfälle aufgrund einer Rotüberfahrt (FV4) und
- 50% der Unfälle aufgrund einer Vorfahrtsmissachtung (FV5)

zu vermeiden, wird eine erste Abschätzung des Unfallvermeidungspotenzials vorgenommen. Mit den in Kapitel 2.4.5 ermittelten prozentualen Anteilen des Fehlverhaltens FV4 und FV5 in Knotenpunktsituationen sind hiernach

- 36% der Unfälle an lichtsignalgesteuerten und
- 42% der Unfälle an schildergeregelten Knotenpunkten

vermeidbar. Mit einem Anteil von 21% bzw. 31% am Gesamtunfallgeschehen und 34% bzw. 15% an den Gesamtunfallkosten im Stadtverkehr kann ein Fahrerassistenzsystem, das den Fahrer über die geltende Vorfahrtsregelung informiert, somit zu einer **Reduktion** von bis zu

- ca. **20% der Unfälle** und
- ca. **18% der Unfallkosten**

beitragen. Übertragen auf das gesamte Stadtgebiet von Stuttgart wären pro Jahr ca. 1.500 Unfälle bzw. ca. 14 Mio. DM Unfallkosten vermeidbar. Inwieweit durch eine entsprechend frühzeitige Information über die Anzeige der Lichtsignalanlage und zur geltenden Vorfahrtsregelung auch Auffahrunfälle vermieden werden könnten, bleibt dabei unberücksichtigt.

In der Literatur finden sich ähnliche Werte zum Unfallvermeidungspotenzial von sicherheitssteigernden Fahrerassistenzsystemen. So wurde innerhalb des PROMETHEUS-Projekts für das Verhindern von Unfällen an Knotenpunkten auf Außerortsstraßen und Autobahnen eine Reduktion der Unfälle mit Personenschäden von ca. 4,5% abgeschätzt. Unter Berücksichtigung der Innerortsstraßen wird von einem Unfallvermeidungspotenzial von über 20% ausgegangen (MARBURGER et al. 1990). Ebenso prognostizieren FRANK & REICHART (2000) für zukünftige sicherheitsrelevante Assistenzsysteme eine Verbesserung der Verkehrssicherheit von bis zu 20%.

Zusammenfassend ist somit festzuhalten, dass ein Fahrerassistenzsystem, das den Fahrer bei der Erkennung der Vorfahrts- und Lichtsignalregelung unterstützt, ein Sicherheitssteigerungspotenzial aufweist, das als sicherheitssteigernde Maßnahme zu einem signifikanten Rückgang der Unfallzahlen und -schäden führt. Durch den in verschiedenen Untersuchungen (u.a. PUCHER & PELKA 1981, ERKE & ZIMOLONG 1978, ZIMOLONG et al. 1977) nachgewiesenen Zusammenhang zwischen Unfallzahl und Konfliktzahl, kann neben einer signifikanten Reduktion der Verkehrsunfälle auch von einer deutlichen Reduktion der Konfliktsituationen im Stadtverkehr ausgegangen werden.

Eine Auswahl von möglichen Ausprägungen derartiger sicherheitssteigernder Fahrerassistenzsysteme wird im folgenden Kapitel 3 gegeben. In einer allgemeinen Einführung in Fahrerassistenzsysteme wird neben einer kurzen Darstellung der Aufgaben der Fahrzeugführung ein Ansatz für eine systematische Einteilung von Fahrerassistenzsystemen definiert. Diese Einteilung wird u.a. dazu genutzt, um die Anforderungen an die Informationsqualität von Fahrerassistenzsystemen festzusetzen.

### **3 Assistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit**

Ziel der Fahrerassistenz ist es, den Fahrer nach dessen Regeln und Erwartungen in der Erfüllung seiner Fahraufgaben zu unterstützen (REICHART 1996). Bei sicherheitssteigernden Fahrerassistenzsystemen besteht nach MOCK-HECKER et al. (1992) die Hauptaufgabe in der Erkennung von kritischen Verkehrssituationen und in einer adäquaten Reaktion auf die erkannte Gefährdung.

Die Einsatzarten der Fahrerassistenz und die Ausprägungen von Fahrerassistenzsystemen können dabei in vielfältiger Weise variieren. Mit einer Unterscheidung hinsichtlich der Fahraufgaben (Kapitel 3.1), innerhalb derer das Assistenzsystem den Fahrer unterstützt, den Variationen in der Unterstützungsstrategie, die ausgehend vom Informieren und Warnen über das Intervenieren bis hin zum Agieren gehen kann, und schließlich durch die verschiedenen denkbaren Systemkonzepte, die sich in fahrzeugautonom, infrastrukturgestützt und kooperativ gliedern lassen, wird in Kapitel 3.2 ein Ansatz für eine systematische Einteilung von Fahrerassistenzsystemen definiert, die als Grundlage für die weiteren Betrachtungen dient. Insbesondere soll hierdurch eine transparente Darstellung der Auswirkungen auf die Informationsqualität, die sich durch verschiedene Ausprägungen von sicherheitssteigernden Fahrerassistenzsystemen für den Stadtverkehr ergeben, ermöglicht werden. Auf diesen Sachverhalt wird in Kapitel 3.3 – Anforderungen an die Informationsqualität von Fahrerassistenzsystemen – ausführlich eingegangen. Es wird hierzu erörtert, welche Anforderungen an die Informationsqualität von Fahrerassistenzsystemen gestellt werden müssen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Den Abschluss dieses Kapitels stellt die Vorstellung verschiedener sicherheitssteigernder Fahrerassistenzsysteme für den Stadtverkehr dar. Schwerpunktmäßig werden verschiedene Kreuzungsassistenzsysteme vorgestellt.

#### **3.1 Aufgaben der Fahrzeugführung**

Bei der Fortbewegung im Straßenverkehr ergibt sich für den Kraftfahrzeugführer die Aufgabe entsprechend seiner Absichten und den Gegebenheiten der vorliegenden Verkehrssituation zu handeln. Die notwendigen Handlungen bestehen in der Informationsaufnahme und -verarbeitung zur Gewinnung von Entscheidungskriterien für das weitere Handeln und deren Umsetzung durch die im Fahrzeug befindlichen Steuerelemente. Eine zweckmäßige und häufig genutzte Darstellung der Fahrzeugführungsaufgabe bildet das 3-Ebenen-Modell (vgl. u.a. BERNOTAT 1970, DONGES 1978, KÄPPLER & BERNOTAT 1985, GSTALTER 1988), das die Aufgabenebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung unterscheidet (Abbildung 3-1). Dabei ist die Aufgabe der Fahrzeugführung in den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt eingebettet.

Die *Navigationsebene* beinhaltet die Auswahl der Fahrtroute innerhalb des bestehenden Straßennetzes. Eine Festlegung der Fahrtroute erfolgt meist vor der Fahrt und ist bei häufig befahrenen Routen dem Fahrer bekannt. Während der Fahrt hat der Fahrer auf die Einhaltung der geplanten Route zu achten. Dazu werden vom Fahrer die im Straßenraum befindlichen Informationsquellen (Wegweiser, Straßennamen) und andere Orientierungshilfen genutzt. Bei auftretenden Störungen, die durch Stau, Baustellen, Umleitungen usw. hervorgerufen werden, kann sich für den Fahrer die Aufgabe ergeben eine Alternativroute zu finden.

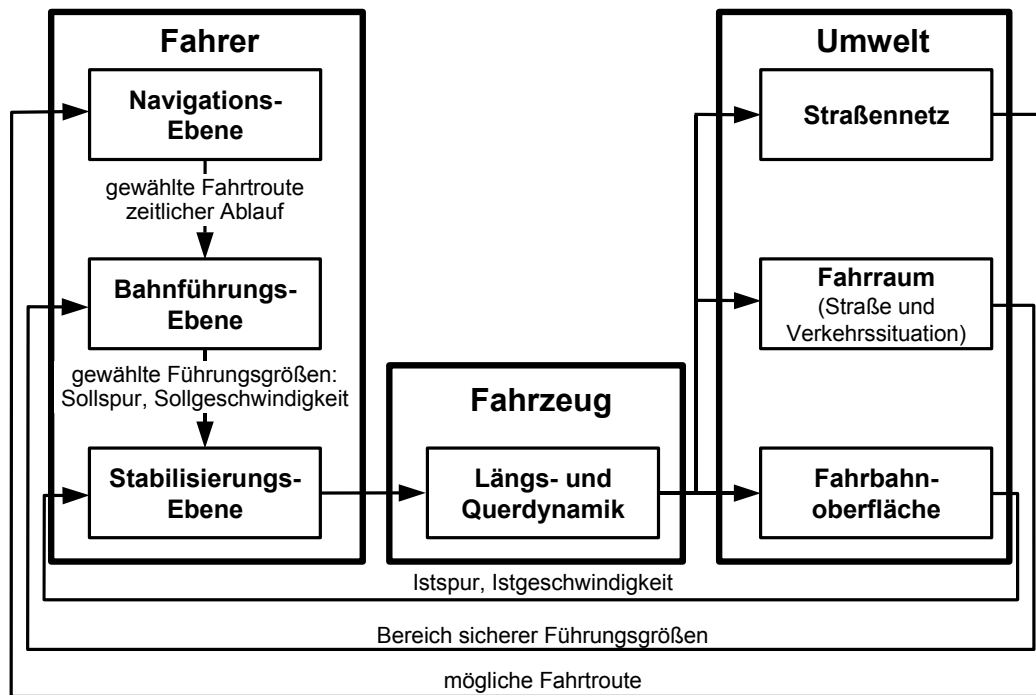


Abbildung 3-1: 3-Ebenen-Modell der Fahrzeugführungsaufgabe (nach DONGES 1982)

Die Realisierung der Fahrtroute erfolgt auf der *Bahnführungsebene*. Der Fahrer muss aus den situativen Gegebenheiten, die sich aus dem Straßenverlauf, den Verkehrsregeln, den anderen Verkehrsteilnehmern usw. ergeben, die notwendigen Führungsgrößen wie Sollspur und Sollgeschwindigkeit ableiten. Die Führungsgrößen sind vom Fahrer so zu wählen, dass er sich konfliktfrei im Straßenraum bewegen kann.

Auf der *Stabilisierungsebene* erfolgt die Umsetzung der gewählten Führungsgrößen. Vom Fahrer werden dazu die im Fahrzeug vorhandenen Stellglieder wie Lenkrad, Brems- und Gaspedal genutzt. Außerdem findet ein permanenter Abgleich zwischen den Soll- und Istwerten statt. Neben der Führung des Fahrzeugs auf dem gewünschten Kurs ergibt sich für den Fahrer die Aufgabe, das Fahrzeug in einem stabilen Zustand zu halten.

Für die sensormotorischen Tätigkeiten des Menschen hat RASMUSSEN (1983) eine Unterteilung des menschlichen Verhaltens in die drei Kategorien wissensbasiertes, regelbasiertes und fertigkeitbasiertes Verhalten vorgenommen. Das *wissensbasierte* Verhalten ergibt sich in komplexen Aufgaben, bei denen vom Menschen unvorbereitet und untrainiert Handlungen verlangt werden. In DONGES & NAAB (1996) wird zwischen den Kategorien des menschlichen Verhaltens und den Ebenen der Fahrzeugführungsaufgabe der Zusammenhang dargestellt. Danach verlangt die Navigationsaufgabe aufgrund ihrer Komplexität überwiegend ein wissensbasiertes Verhalten. Das *regelbasierte* Verhalten ist überwiegend der Bahnführungsebene zugeordnet. Der Fahrer hat hierbei auf situative Gegebenheiten zu reagieren, die schon häufiger aufgetreten sind und für die er über ein korrespondierendes Repertoire von Verhaltensmustern verfügt. Die Stabilisierungsebene erfordert ein *fertigkeitbasiertes* Verhalten. Dieses ist gekennzeichnet von reflexartigen Reiz-Reaktions-Mechanismen, die über einen gewissen Lernprozess eintrainiert sind und vom Fahrer selbstständig ohne bewusste Kontrolle ausgeführt werden.



Nach RASMUSSEN (1983) sinkt, ausgehend von der Navigationsebene, die Komplexität der Fahraufgabe und steigt die Frequenz der Tätigkeit. Stellt man der Fahrerbelastung die Fehlverhaltensursachen durch den Fahrer (VOY et al. 1986) gegenüber, so sind die Informationsdefizite primär der Navigations- und Bahnführungsebene und die Handlungsdefizite der Stabilisierungsebene zuzuordnen. Bezogen auf die Arbeitspsychologie ergeben sich nach HACKER (1978) Fehlhandlungen durch:

- fehlende Information
- fehlende Nutzung vorhandener Information
- falsche Nutzung vorhandener Information

Dabei bringt die fehlende Information ebenso wie die fehlende Nutzung einer vorhandenen Information ein Informationsdefizit zum Ausdruck. Bei falscher Nutzung überwiegt hingegen das Handlungsdefizit (vgl. Abbildung 3-2).

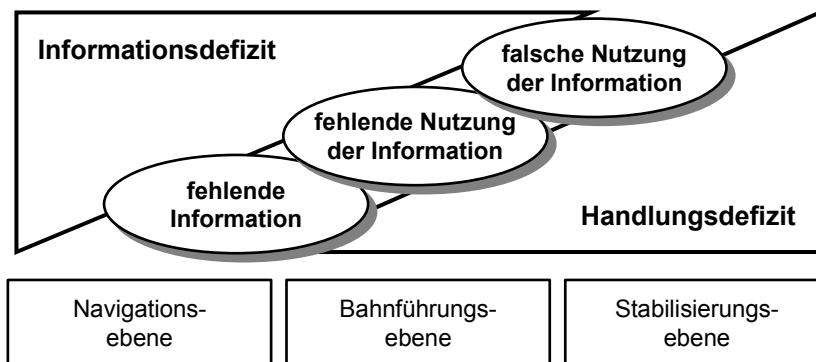


Abbildung 3-2: Ursachen der Fehlhandlungen nach HACKER (1978) in Abhängigkeit der Fahraufgabenebene nach DONGES (1982)

### 3.2 Ansatz einer systematischen Einteilung von Fahrerassistenzsystemen

Für eine strukturierte Darstellung der Auswirkungen verschiedener Ausprägungen von Fahrerassistenzsystemen auf die Informationsqualität ist eine systematische Einteilung von Fahrerassistenzsystemen notwendig. In MINDERHOUD & BOVY (1997) wird eine funktionale Einteilung über drei Entwicklungsachsen vorgestellt, die neben der Art der Unterstützung die planerische Ebene hinsichtlich der Navigation und die ausführenden Ebenen bezüglich der Längs- und Querverführung unterscheidet. Weitere Ansätze zur Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen finden sich u.a. in BRAESS (1986), EVERTS (1992) und WEILKES (2000).

Unter Berücksichtigung der in der Literatur vorhandenen Klassifizierungen von Fahrerassistenzsystemen wird im Folgenden eine **Einteilung von Fahrerassistenzsystemen** vorgestellt, die eine Unterscheidung hinsichtlich der **Assistenzebene**, der **Assistenzstrategie** und dem **Assistenzkonzept** vorsieht (Tabelle 3-1). In diesem Ansatz wird über die Assistenzebene ausgedrückt, bei welcher Aufgabe der Fahrzeugführung der Fahrer unterstützt wird. Die Assistenzstrategie unterscheidet die Art der Informationsdarbietung und ist eng verbunden mit dem Eingriffsniveau sowie dem Automationsgrad. Eine Differenzierung hinsichtlich fahrzeugautonomer, infrastrukturgestützter und kooperativer Systeme erfolgt über das Assistenzkonzept.

Tabelle 3-1: Funktionale Kategorien zur systematischen Einteilung von Fahrerassistenzsystemen

Assistenzstrategie	Assistenzkonzept	Assistenzebene
<ul style="list-style-type: none"> <li>- informieren</li> <li>- warnen</li> <li>- intervenieren</li> <li>- agieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fahrzeugautonom</li> <li>- infrastrukturgestützt</li> <li>- kooperativ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Navigationsebene</li> <li>- Bahnführungsebene</li> <li>- Stabilisierungsebene</li> </ul>

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Fahrerassistenzsysteme betrachtet, die in dem Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt wirken. Es handelt sich um Systeme, die den Fahrer bei der Fahraufgabe (s. Kapitel 3.1) unterstützen und dadurch direkt oder indirekt Einfluss auf den Bewegungsablauf des Fahrzeugs nehmen. Komfort-, Unterhaltungs- und Auskunftssysteme finden keine Berücksichtigung.

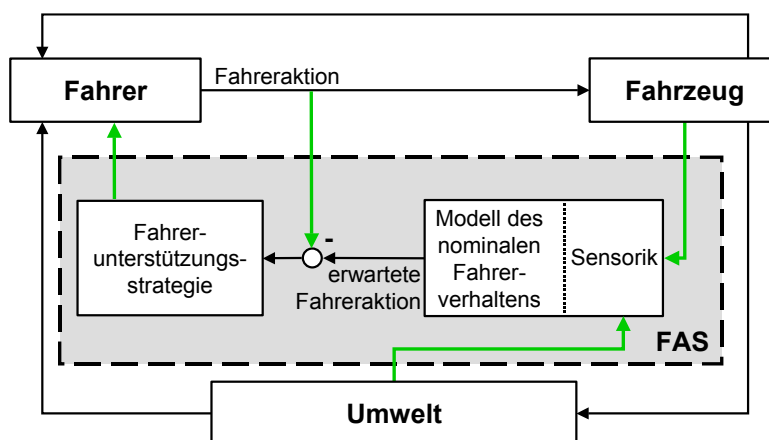


Abbildung 3-3: Grundkonzept der Fahrerassistenz (nach REICHART 1996)

Innerhalb des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug-Umwelt nimmt der Fahrer aus der Umwelt und dem Fahrzeug Informationen auf, verarbeitet diese zu Führungsgrößen, die er als Stellgrößen an das Fahrzeug weitergibt. Die daraus resultierende Fahrzeugbewegung wirkt als Regelgröße auf die Umwelt. Der Fahrer steht hierbei in einer engen Wechselwirkung mit anderen Verkehrsteilnehmern und somit auch mit anderen Fahrer-Fahrzeug-Systemen (vgl. KÄPPLER & BERNOTAT 1985). Informationen vom Fahrzeug, insbesondere über den dynamischen Fahrzeugzustand, erhält der Fahrer u.a. durch Fahrzeugbewegungen und Fahrgeräusche.

Über die Integration des Fahrerassistenzsystems (FAS) in den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt ergibt sich das in Abbildung 3-3 dargestellte Grundkonzept der Fahrerassistenz, das nach REICHART (1996) die folgenden Kernelemente besitzt:

- die Erfassung der Fahrumgebung und der relevanten Fahrzeugparameter mit entsprechender Sensorik
- die Bewertung der Fahrsituation
- die modellgestützte Bestimmung eines Sollverhaltens des Fahrzeugs
- der Vergleich mit den vom Fahrer eingeleiteten Fahrmanövern
- die daraus abgeleitete Unterstützung.

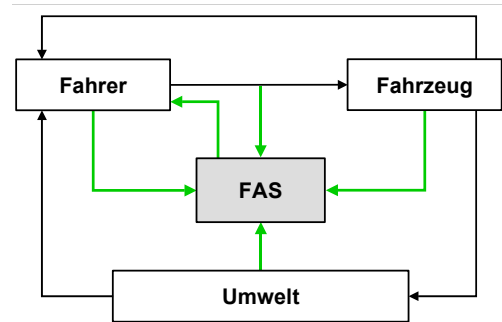
Der dargestellte Ansatz geht von dem Einsatz der Sensorik als Informationsquelle aus. Mittels Kommunikation können weitere Informationen aus der Fahrumgebung in das Fahrerassistenzsystem einfließen. Des Weiteren wirkt die Fahrerunterstützung durch das Assistenzsystem immer auf den Fahrer. Eine Unterstützungsstrategie, die direkt auf das Fahrzeug wirkt, ist nicht explizit dargestellt, da REICHART (1996) von einer stets vom Fahrer übersteuerbaren Fahrerunterstützung ausgeht.

### Assistenzstrategie

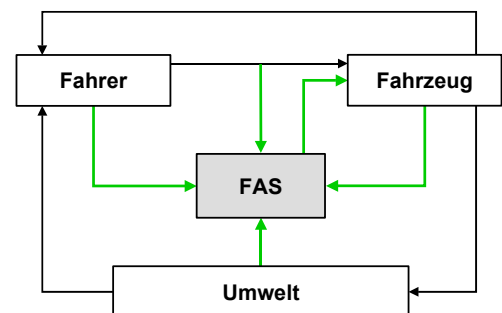
Die Assistenzstrategie beschreibt die **Art der Fahrerunterstützung** eines Fahrerassistenzsystems **unter Berücksichtigung des Zusammenwirkens von Fahrer und Fahrzeug**. Es werden hierbei die Assistenzstrategien **informieren**, **warnen**, **intervenieren** und **agieren** unterschieden. Dabei repräsentieren das Informieren und Warnen einen **indirekten Eingriff**, das Intervenieren und Agieren einen **direkten Eingriff** in den Fahrprozess. Eine ähnliche Einteilung in die verschiedenen Unterstützungsstrategien finden sich u.a. in LEGAT (1988), MOCK-HECKER et al. (1992), REITER (1992), PRÄTORIUS (1992), KÖNIG (1995), ZACKOR (1995), REICHART (1996), MINDERHOUD & BOVY (1997) NAAB (1998) und ZACKOR (1999). Dabei variiert sowohl die Anzahl als auch die Bezeichnung der Assistenzstrategien. Durchgängig ist die Unterscheidung von Unterstützungsformen, bei denen der Fahrer informiert wird und bei denen das Assistenzsystem in den Fahrprozess eingreift.

**Indirekter Eingriff: Informierende und warnende** Assistenzsysteme unterstützen den Fahrer dadurch, dass sie in entsprechenden Situationen dem Fahrer einen Hinweis geben. Im Gegensatz zum Informieren erfolgt beim Warnen der Hinweis nur in einer Gefahrensituation und ist in seiner Formulierung so gewählt, dass mit dem Warnhinweis eine konkrete Handlungsweise verbunden ist, die vom Fahrer mit hoher Wahrscheinlichkeit – unabhängig von seiner ursprünglichen Handlungsabsicht – unmittelbar umgesetzt wird. Der Fahrer ist bei beiden Assistenzstrategien das ausführende Organ und behält somit den vollen Entscheidungs- und Verantwortungsfreiraum (LEGAT 1988).

(a) informieren und warnen



(b) intervenieren



(c) agieren

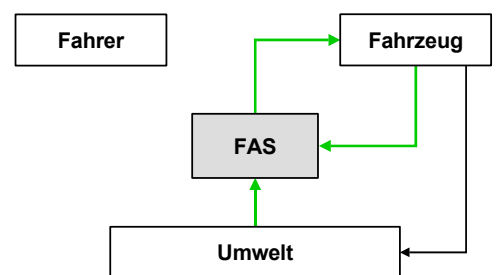


Abbildung 3-4: Einfluss der Assistenzstrategie eines Fahrerassistenzsystems auf den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt

Zur Verdeutlichung der Wirkungsweise der verschiedenen Assistenzstrategien und insbesondere zur Darstellung der sich daraus ergebenden Unterschiede, wird der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt herangezogen. Hierzu wird das Fahrerassistenzsystem (FAS) gekapselt und als eine weitere Systemkomponente im Regelkreis integriert (s. Abbildung 3-4). Um das Zusammenwirken des Fahrerassistenzsystems mit den anderen Komponenten des Regelkreises besser zu veranschaulichen, wird im Gegensatz zu Abbildung 3-3 auf eine detaillierte Beschreibung der internen Abläufe verzichtet.

Für das Fahren mit einem informierenden und warnenden System bleiben alle Wirkungsgrößen, wie sie sich beim Fahren ohne Fahrerassistenz ergeben, erhalten. Zusätzlich bekommt der Fahrer im Bedarfsfall informatorische oder warnende Hinweise vom Fahrerassistenzsystem (Abbildung 3-4a). Das Assistenzsystem bezieht die zur Entscheidungsfindung und Hinweisgenerierung notwendigen Informationen aus Umwelt, Fahrzeug und Fahrer, wobei nicht zwangsweise alle Systemkomponenten als Informationsquellen genutzt werden müssen. Dem Fahrer obliegt dabei immer die Entscheidung, ob er dem Handlungsvorschlag des Fahrerassistenzsystems folgt oder an seiner eigenen Handlungsabsicht festhält, die sich auf die eigenen aus der Umwelt und vom Fahrzeug bezogenen Informationen stützt. Zur Realisierung muss der Fahrer weiterhin die entsprechenden Stellglieder betätigen.

**Direkter Eingriff:** Bei der Assistenzstrategie **intervenieren** erfolgt im Bedarfsfall ein Eingriff durch das Assistenzsystem in das Bewegungsverhalten des Fahrzeugs. Im Regelkreismodell (Abbildung 3-4b) zeigt sich das dadurch, dass das Assistenzsystem nicht wie beim Informieren und Warnen auf den Fahrer, sondern direkt auf das Fahrzeug wirkt. Über die Wirkungsgröße Fahrzeug-Fahrer bemerkt der Fahrer den vom Assistenzsystem geänderten Bewegungsablauf bzw. Fahrzeugzustand. Der Fahrer hat aber weiterhin die Möglichkeit seine selbst ermittelten Führungsgrößen an das Fahrzeug weiterzugeben (u.a. LEGAT 1988, REICHART 1996, MINDERHOUD & BOVY 1997). So wird bei den Spurhaltesystemen u.a. der Ansatz verfolgt, die vom System aufgrund einer Abweichung von der Sollspur vorgenommene Korrektur dem Fahrer als haptische Anzeige im Lenkrad anzuzeigen. Der Fahrer kann die angezeigten Korrekturen jederzeit übersteuern (FRANK & REICHART 2000).

Das **Agieren** beschreibt die Assistenzstrategie, bei der der Fahrer vollständig aus dem Regelprozess entnommen ist (vgl. Abbildung 3-4c). Das Fahrerassistenzsystem leitet die zur Realisierung des als optimal identifizierten Bewegungsablaufs notwendigen Führungsgrößen direkt an das Fahrzeug weiter. Dabei hat der Fahrer – mit Ausnahme der Aktivierung und Deaktivierung des Systems – keinerlei Eingriffsmöglichkeiten. Dies soll am Beispiel ABS verdeutlicht werden. Das Assistenzsystem unterstützt den Fahrer bei der optimalen Verzögerung des Fahrzeugs unter Erhaltung seiner Lenkfähigkeit. Durch Betätigen des Bremspedals wird ABS aktiviert und agiert ab diesem Zeitpunkt völlig autonom hinsichtlich der Verzögerung einzelner Räder. Durch Lösen des Bremspedals oder bei Stillstand des Fahrzeugs wird das ABS wieder deaktiviert. In der Abbildung 3-4c ist das Aktivieren und Deaktivieren des Systems durch den Fahrer nicht dargestellt. Ferner ist zu berücksichtigen, dass sich der Eingriff des Fahrerassistenzsystems auch auf eine Teilaufgabe der Fahrzeugführung beschränken kann. So beeinflusst ABS zum Beispiel nur die Längsführung des Fahrzeugs.

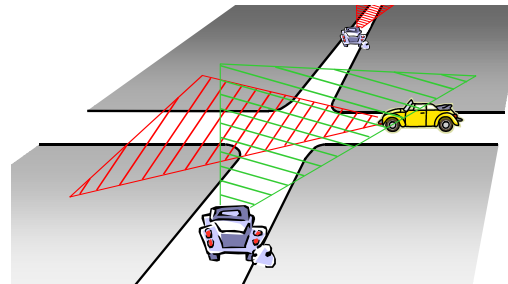
Aufgrund ihres direkten Eingriffs in den Prozess der Fahrzeugführung werden die intervenierenden und agierenden Fahrerassistenzsysteme auch als **Regelsysteme** angesehen. Die informierenden und warnenden Systeme, die den Fahrer durch Hinweise unterstützen, werden vielfach auch als **Informationssysteme** bezeichnet (u.a. METZLER et al. 1988, REISTER et al. 1988, ZIMDAHL et al. 1988, EVERTS 1992). Zusammenfassend lässt sich hinsichtlich der Assistenzstrategie festhalten, dass sie maßgeblich die Art der Informationsübermittlung an den Fahrer bzw. das Fahrzeug beschreibt. Daneben bestimmt die Assistenzstrategie das Eingriffsniveau (vgl. PRÄTORIUS 1992) und den Automatisierungsgrad (vgl. MINDERHOUD & BOVY 1997).

### Assistenzkonzept

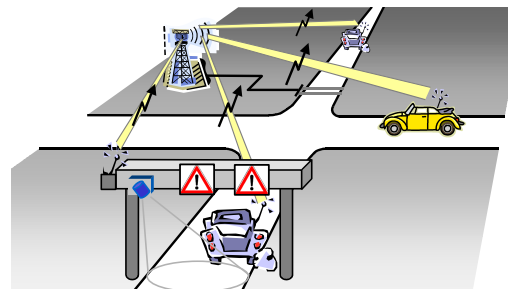
Das zweite beschreibende Element in diesem Ansatz zur Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen bildet das Assistenzkonzept, das **fahrzeugautonome, infrastrukturgestützte** und **kooperative** Ansätze unterscheidet. Durch das Assistenzkonzept wird im Wesentlichen das **Zusammenwirken von Fahrzeug und Umwelt im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt** beschrieben. Des Weiteren beinhaltet das Assistenzkonzept Hinweise zu der Art der Informationsgewinnung bzw. den genutzten Informationsquellen.

Das **fahrzeugautonome** Assistenzkonzept unterscheidet sich von den beiden anderen Konzepten dahingehend, dass das Fahrerassistenzsystem keine Kommunikationskomponente zum Austausch von Daten und Informationen mit Infrastruktureinrichtungen oder anderen Verkehrsteilnehmern nutzt. Die zur Fahrerunterstützung notwendigen Informationen bezieht das System durch im Fahrzeug befindliche Sensoren. Es kommen hierbei Sensoren zur Erfassung des aktuellen Fahrzeugzustands wie z.B. die Fahrzeuggeschwindigkeit zum Einsatz. Informationen über das Fahrzeugumfeld lassen sich beispielsweise durch Radarsensoren, Digitalkameras, Regensensoren usw. gewinnen. Die Möglichkeit der Umfelderkennung unterliegt hierbei starken Restriktionen, die maßgeblich durch die eingesetzte Sensorik bestimmt sind. Daneben können weitere im Fahrzeug vorhandene Informationen von anderen Informations- (IS) und Fahrerassistenzsystemen (FAS) genutzt werden, wie z.B. die im Navigationssystem vorgehaltene aktuelle Fahrzeugposition oder eine an Bord befindliche digitale Straßenkarte.

(a) fahrzeugautonom



(b) infrastrukturgestützt



(c) kooperativ

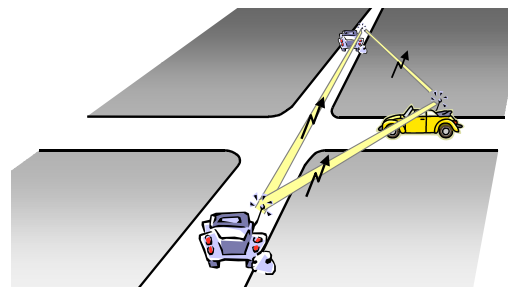


Abbildung 3-5: Unterscheidung der Fahrerassistenzsysteme hinsichtlich des Assistenzkonzepts

Ein **infrastrukturgestütztes** Fahrerassistenzsystem nutzt im Gegensatz zu einem fahrzeugautonomen System zusätzliche Infrastruktureinrichtungen. Des Weiteren liegt beim infrastrukturgestützten Konzept häufig eine globale Leitstrategie verbunden mit einem zentralen Informationsmanagement zugrunde, das im weiteren Verlauf auch als Dienst bezeichnet wird. Der Dienst bezieht über eigene in der Umwelt platzierte Sensoren (z.B. Baken, Schleifen usw.) die notwendigen Informationen. Ebenso können einzelne Fahrzeuge als Informationslieferant auftreten. Der Dienst verarbeitet sämtliche zur Verfügung stehenden Informationen und kommuniziert die erforderlichen Informationen zur Umsetzung der Leitstrategie ins Fahrzeug. Neben der Telekommunikation können hierbei auch Infrastruktureinrichtungen wie Wechselverkehrszeichen oder Lichtsignalanlagen genutzt werden.

Dem **kooperativen** Assistenzkonzept fehlt im Gegensatz zum infrastrukturgestützten Konzept eine zentral geregelte Leitstrategie durch einen Dienst. Grundlage dieses Konzepts bildet die Kommunikation zwischen den einzelnen Verkehrsteilnehmern zum Austausch der Informationen hinsichtlich des Fahrzeugzustands und der Fahrerabsichten. Ziel ist es, kritische Verkehrssituationen frühzeitig zu erkennen und entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten. Dies kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass eine erkannte Gefahrensituation wie Glatteis an die nachfolgenden Fahrzeuge übermittelt wird.

Dies heißt in diesem Zusammenhang nicht, dass bei einem kooperativen bzw. fahrzeugautonomen Assistenzkonzept keinerlei Infrastruktur genutzt wird. So ist bei einem kooperativen Ansatz sicherlich denkbar, dass die Fahrzeug-Fahrzeug Kommunikation mittels GSM erfolgt. Ausschlaggebend für die Unterscheidung muss sein, ob Infrastruktur speziell für eine Fahrerassistenz eingerichtet oder nur eine infrastrukturgestützte Basistechnologie genutzt wird. Dies ist zweckmäßig, da ansonsten die heute schon existierenden und als fahrzeugautonom eingestuften Navigationssysteme durch die Verwendung von GPS zur absoluten Positionsbestimmung als infrastrukturgestützte Systeme bezeichnet werden müssten.

### **Assistenzebene**

Die Assistenzebene charakterisiert die **Aufgabenebene, in der eine Fahrerunterstützung erfolgt**. Entsprechend der in Abbildung 3-1 dargestellten hierarchischen Gliederung der Aufgaben der Fahrzeugführung werden Fahrerassistenzsysteme unterschieden, die auf der **Navigations-**, der **Bahnführungs-** und der **Stabilisierungsebene** den Fahrer unterstützen.

Ein typischer Vertreter eines Fahrerassistenzsystems auf der Navigationsebene ist das Navigationssystem bzw. Zielführungssystem. Der Abstands- und Geschwindigkeitsregler (ACC) entlastet den Fahrer bei der Findung der korrekten Sollgröße für die Längsregelung und somit auf der Bahnführungsebene. Fahrerassistenzsysteme auf der Stabilisierungsebene sind u.a. das Antiblockiersystem (ABS), das elektronische Stabilisierungsprogramm (ESP) und die Antischlupfregelung (ASR).

### **Zusammenhang zwischen Assistenzebene, Assistenzstrategie und Assistenzkonzept**

Die Hauptaufgabe der Fahrerassistenz ist es, den Fahrer in den Bereichen zu unterstützen, in denen er Schwächen aufweist (REISTER et al. 1988). Dabei muss die Assistenz so gestaltet sein, dass sie die Fahrer entlastet und nicht belastet. Um das auf der Stabilisierungsebene primär vorliegende Handlungsdefizit (s. Kapitel 3.1) zu reduzieren, muss der Fahrer bei der Ausführung der Fahr-

aufgabe unterstützt werden (vgl. PANIK 1987). Somit sind hier nur agierende und intervenierende Assistenzsysteme sinnvoll. Umgekehrt ist auf der Navigationsebene eine informierende bzw. warnende Assistenz zur Beseitigung des Informationsdefizits die ideale Assistenzstrategie. Hinsichtlich der Bahnführungsebene ist eine solche Einteilung nicht zu identifizieren (Abbildung 3-6).

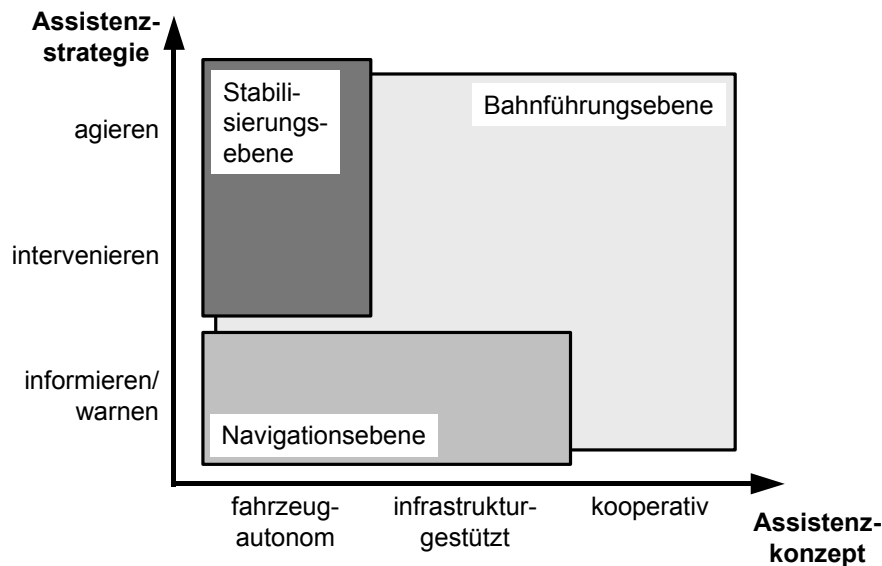


Abbildung 3-6: Unterstützungsebene eines Fahrerassistenzsystems in Abhängigkeit der Assistenzstrategie und des Assistenzkonzepts

Des Weiteren ist in der Abbildung das Assistenzkonzept dargestellt. Auch hier kann hinsichtlich der Bahnführungsebene kein Assistenzkonzept ausgeschlossen werden. Bezüglich der Stabilisierungsebene sind nur fahrzeugautonome Systeme denkbar, da hierfür ausschließlich Informationen vom unmittelbaren Fahrzeugumfeld bzw. vom Bewegungszustand des eigenen Fahrzeugs benötigt werden. Durch Informationen von anderen Fahrzeugen bzw. eines Diensts ist kein Nutzen für eine Fahrerunterstützung auf der Stabilisierungsebene zu erwarten. Auf der Navigationsebene sind fahrzeugautonome und infrastrukturgestützte Systeme durch die am Markt verfügbaren Navigationssysteme bereits realisiert. Ein kooperativer Ansatz ist theoretisch denkbar, aufgrund der notwendigen großräumigen Informationsverteilung jedoch nicht praktikabel.

### 3.3 Anforderungen an die Informationsqualität von Fahrerassistenzsystemen

Ein Fahrerassistenzsystem hat neben einer Entlastung des Fahrers primär das Ziel den Fahrer in kritischen Verkehrssituationen zu unterstützen und dadurch zu einer Steigerung der Verkehrssicherheit beizutragen. Dazu ist es zwingend notwendig, dass nicht vom Assistenzsystem selbst, z.B. infolge einer Fehlfunktion, eine Gefährdung ausgeht. In diesem Zusammenhang ist der Frage nachzugehen welche Anforderungen an die Informationen eines Fahrerassistenzsystems gestellt werden müssen, um in einem definierten Rahmen einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Davon ausgehend, dass die Anforderungen an die Informationsqualität bei verschiedenen Fahrerassistenzansätzen variieren, sollen im Folgenden grundlegende Unterschiede hinsichtlich der Anforderungen an die Informationsqualität in Abhängigkeit der in Kapitel 3.2 getroffenen Einteilung von Fahrer-

assistenzsystemen dargestellt werden. Die juristischen Konsequenzen einer Fehlfunktion oder das gesellschaftlich akzeptierte Risiko technischer Systeme werden hierbei nicht erörtert.

Den Haupteinfluss auf die Anforderungen an die Informationsqualität trägt die **Assistenzstrategie**. Sie bestimmt im Wesentlichen das Eingriffsniveau (vgl. Abbildung 3-7). Dem mit steigendem Eingriffsniveau wachsenden Gefährdungspotenzial muss durch die Festsetzung eines ausreichend hohen Sicherheitsniveaus bzw. einer entsprechenden Sicherheitsklasse begegnet werden (vgl. KÖNIG 1995). Um dem notwendigen Sicherheitsniveau zu genügen, müssen gewisse Anforderungen an die fahrerunterstützende Information gestellt werden, wobei in diesem Zusammenhang unter der fahrerunterstützenden Information nicht nur der Hinweis an den Fahrer, sondern auch der direkte Eingriff zur Steuerung eines Aktors verstanden wird (vgl. Abbildung 3-9).

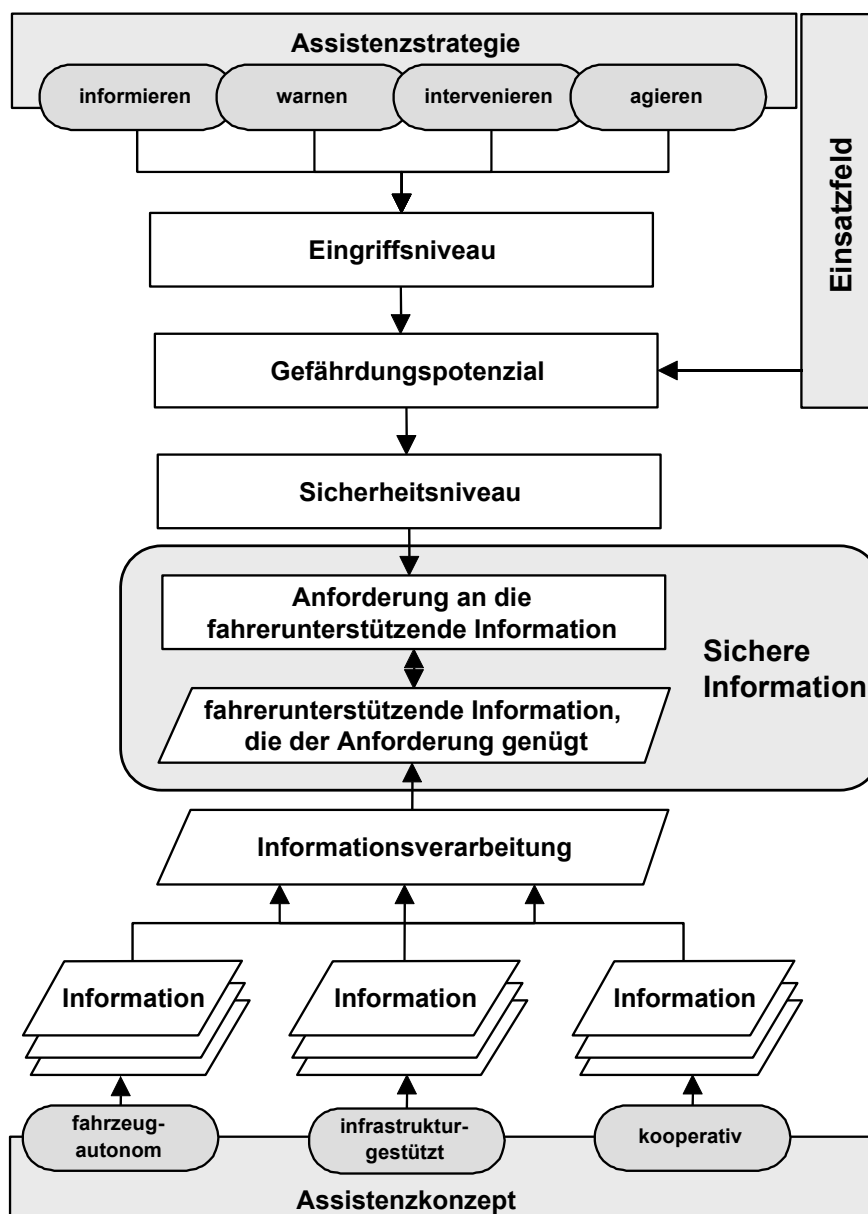


Abbildung 3-7: Einfluss von Assistenzstrategie und Assistenzkonzept auf die fahrerunterstützende Information und deren Qualität



Im Gegensatz zum direkten Eingriff zeichnet sich der indirekte Eingriff durch ein geringeres Gefährdungspotenzial aus und stellt somit eine geringere Anforderung an die fahrerunterstützende Information. Dies ergibt sich daraus, dass beim **indirekten Eingriff** der Fahrer weiterhin im Fahrprozess voll integriert ist und dadurch als Filter fungiert, der bei einem falsch gegebenen Hinweis kompensatorisch wirken kann (vgl. REICHART 1996). Dagegen kann beim **direkten Eingriff** der Fahrer im Falle eines Systemversagens meistens keine Korrekturmaßnahmen mehr vornehmen.

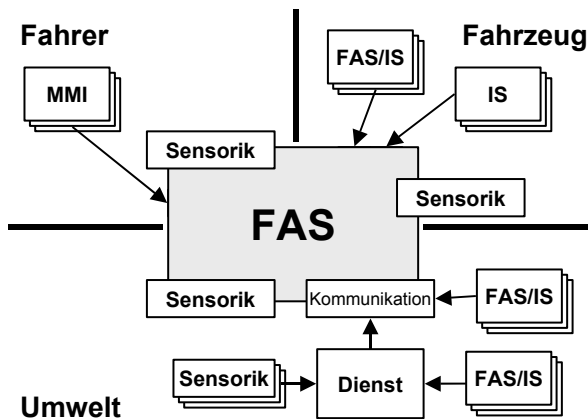


Abbildung 3-8: Schematische Darstellung der möglichen Informationsquellen eines Fahrerassistenzsystems

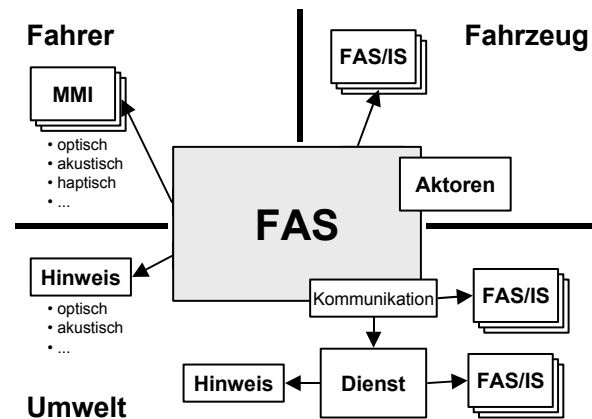


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung sämtlicher Möglichkeiten der Informationsabgabe eines Fahrerassistenzsystems

Ebenso bestimmt das Einsatzfeld des Fahrerassistenzsystems das Gefährdungspotenzial und somit auch die Informationsanforderung. So trägt eine Einparkhilfe aufgrund der geringen Fahrzeuggeschwindigkeit sicherlich ein wesentlich geringeres Gefährdungspotenzial als ein Geschwindigkeits- und Abstandsregler, der bei einer Autobahnfahrt eingesetzt wird.

Zur Generierung einer fahrerunterstützenden Information muss das System die dazu notwendigen Informationen vom Fahrer, Fahrzeug und aus der Umwelt gewinnen. Die möglichen Informationsquellen sind in Abbildung 3-8 schematisch dargestellt. Da es in der Realität keine hundertprozentige Garantie für fehlerfreie Daten und Informationen geben kann, ist innerhalb der Datenprozessierung ein Informationsmanagement notwendig, das qualitativ nicht taugliche Daten und Informationen identifiziert und geeignet behandelt. **Für einen sicheren Betrieb eines Systems sind Informationen notwendig, die zu jeder Zeit die an sie gestellten Anforderungen erfüllen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Informationen mit dieser Eigenschaft als „Sichere Information“ bezeichnet.** Welche Daten und Informationen in ein Fahrerassistenzsystem einfließen und wie diese zu der eigentlichen fahrerunterstützenden Information verarbeitet werden, ist maßgeblich bestimmt durch das zugrunde gelegte **Assistenzkonzept** (vgl. Abbildung 3-7).

Zusammenfassend dargestellt sind zu den grundsätzlich geltenden Unterschieden in den Anforderungen an die Informationsqualität und -verarbeitung bei einem Fahrerassistenzsystem folgende Punkte festzuhalten:

- Im Mittelpunkt steht, wie in Abbildung 3-7 dargestellt, die **„Sichere Information“** als die Information, welche die gestellten Anforderungen an die Informationsqualität zur Gewähr-

leistung des verlangten Sicherheitsniveaus erfüllt. Die Sichere Information bildet eine wesentliche **Voraussetzung für den sicheren Betrieb eines Fahrerassistenzsystems**.

- In der Reihenfolge informieren – warnen – intervenieren – agieren erhöhen sich aufgrund eines ansteigenden Eingriffsniveaus die **Anforderungen an die Qualität der fahrerunterstützenden Information**.
- Durch die Integration verschiedener Informationsquellen und durch eine verteilte Informationsverarbeitung wird das Qualitätsmanagement, welches zur Gewährleistung der geforderten Informationsqualität unerlässlich ist, erschwert. Somit wachsen in der Reihenfolge fahrzeugautonom – infrastrukturgestützt – kooperativ die **Anforderungen an das Qualitäts- und Informationsmanagement** innerhalb der Datenprozessierung.

Hinsichtlich der Assistenzebene ist anzumerken, dass aufgrund der zunehmenden Aufgabenkomplexität von der Stabilisierungs- zur Navigationsebene auch die Komplexität der Informationsstruktur steigt. Weitere entscheidende Einflüsse auf die Anforderungen an die Informationsqualität sind nicht auszumachen, was überwiegend an den zuvor diskutierten und in Abbildung 3-6 dargestellten bestehenden Abhängigkeiten zwischen der Assistenzebene und der Assistenzstrategie bzw. dem Assistenzkonzept liegt.

### 3.4 Sicherheitssteigernde Assistenzsysteme für den Stadtverkehr

Die in Kapitel 2 dargestellte Analyse des Verkehrs- und Unfallgeschehens zeigt, dass ein signifikantes Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit im Stadtverkehr durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen besteht. Dabei wurde u.a. ein Unfallvermeidungspotenzial von 20% für ein Fahrerassistenzsystem ermittelt, das den Fahrer hinsichtlich der Vorfahrts- und Vorrangsregelung an Knotenpunkten unterstützt. Daneben ist eine Vielzahl weiterer Systeme zur Steigerung der Verkehrssicherheit denkbar, wobei einige sich bereits im Forschungs- bzw. Entwicklungsstadium befinden oder kurz vor der Serienreife stehen. Hinsichtlich der Entwicklung und Einführung zukünftiger Fahrerassistenzsysteme finden sich entsprechende Aufstellungen u.a. in GEDULD (1997), METZLER (1998), EHMANN et al. (2000), FRANK & REICHART (2000), BARRENSCHEEN & EICHORN (2001), FRIEDRICH et al. (2001) und HIPP & SCHALLER (2001), bei denen keine Einschränkung auf den innerstädtischen Verkehr gegeben ist. In Anlehnung an die genannten Quellen enthält Abbildung 3-10 eine Aufstellung bereits existierender und zukünftiger Fahrerassistenzsysteme. Unberücksichtigt bleiben hierbei alle Systeme zur Fahrdynamikregelung, wie ABS und ESP.

Die **Navigationssysteme** sind bereits seit mehreren Jahren erfolgreich im Einsatz. Weiterentwicklungen gehen in Richtung einer dynamischen Zielführung, die durch die Einbeziehung der aktuellen Verkehrslage insbesondere auf Störungen, wie einen Stau, durch die Berechnung einer Alternativroute reagieren können (NEUKIRCHNER 1996). In HAMBERGER et al. (1996) wird vorgeschlagen das Navigationssystem zur Streckenvorausschau zu nutzen, um den Fahrer über streckenspezifische Ereignisse wie Kurven und Kreuzungen zu informieren. Derartige Informationen können auch im Rahmen eines ACC-Systems genutzt werden, um die örtlich geltende Geschwindigkeitsregelung zu berücksichtigen und eine angepasste Regulierung der Geschwindigkeit in Kurven vorzunehmen (SCHRAUT 2000).

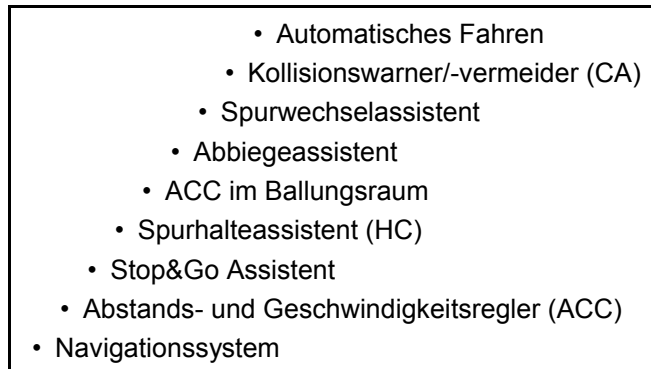


Abbildung 3-10: *Entwicklungslinie der Fahrerassistenzsysteme*

Das **ACC-System** (Adaptive Cruise Control) unterstützt den Fahrer bei der Längsregelung und bildet eine Weiterentwicklung des Tempomaten. Es reagiert bei einer Unterschreitung des Sicherheitsabstands zu dem vorausfahrenden Fahrzeug selbstständig durch eine Reduktion der Geschwindigkeit. Verlässt das vorausfahrende Fahrzeug den Fahrstreifen beschleunigt das System wieder auf die eingestellte Geschwindigkeit. Da bisher noch nicht mit der notwendigen Verlässlichkeit ermittelt werden kann, ob sich ein Objekt innerhalb des relevanten Fahrstreifens befindet, erfolgt bei stehenden Objekten keine Unterstützung (NAAB 1998). Des Weiteren reichen die derzeit genutzten Verzögerungswerte des ACC nicht aus, um auf große Geschwindigkeitsdifferenzen zu reagieren. Die heute eingesetzten ACC-Systeme sind vielmehr als Komfort-, denn als Sicherheitssystem konzipiert (WEILKES 2000) und werden vom Autofahrer auch als solches eingeschätzt (NIRSCHL & KOPF 1998). Eine Ausdehnung des Arbeitsbereichs von ACC auf niedrige Fahrzeuggeschwindigkeiten bis hin zum Fahrzeugstillstand mündet in einen **Stop&Go Assistenten** bzw. in ein **ACC im Ballungsraum**. Diese haben das Ziel den Fahrer in extrem belastenden Situationen wie Stau oder dichtem Verkehr zu unterstützen (WEILKES 2000, NAAB 1998). Dazu sind zusätzliche Sensoren zur Umfelderkennung und Methoden zur Situationserkennung notwendig.

Eine Fahrerunterstützung in der Querführung wird mit der Entwicklung von **Spurhaltesystemen** verfolgt. Dazu wird über eine Videokamera der vorausliegende Straßenabschnitt erfasst, um mittels Bildverarbeitung die Fahrbahnmarkierung zu extrahieren und die relative Lage des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens zu berechnen. Bei einer Abweichung von der Sollspur werden korrigierende Lenkmomente angebracht (vgl. FRANK & REICHART 2000). Hinsichtlich eines **Abbiegeassistenten** laufen Entwicklungen im Nutzfahrzeugsektor mit dem Schwerpunkt der Vermeidung von Kollisionen mit Radfahrern beim Rechtsabbiegen (HIPPE & SCHALLER 2001). Mit Laser- oder Radarscanner wird der Seitenraum überwacht und im Bedarfsfall ein akustischer und optischer Hinweis an den Fahrer gegeben. Ebenso wäre es denkbar, durch geeignete nach vorne gerichtete Sensoren, bevorrechtigten Gegenverkehr zu erkennen und den Fahrer somit bei Linksabbiegevorgängen zu unterstützen. Der **Spurwechselassistent** bildet ein weiteres System, das den Fahrer bei der Querführung unterstützt. Dazu muss das System den gesamten Verkehr vor und hinter dem Fahrzeug, sowohl auf der Fahr- als auch auf der Zielspur, überwachen. Bei einem bevorstehenden sicherheitskritischen Fahrstreifenwechsel kann der Fahrer über entsprechende Hinweise gewarnt werden. Die **Kollisionswarner/-vermeider** bilden eine weitere Gruppe von Fahrerassistenzsystemen. Für diese Systeme ergeben sich extrem hohe Anforderungen an die

Umfelderfassung, die Situationsinterpretation zur Erkennung von kritischen Verkehrssituationen und die Ableitung adäquater Reaktionen zur Gefahrenabwehr.

In dem von 1996 bis 2000 laufenden Forschungsprojekt MOTIV (s. REICHART & HIPPE 2000) wurden u.a. Systeme zur Abbiege- und Spurwechselassistenten, zum ACC im Ballungsraum und vorausschauendes Fahren durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation untersucht und prototypisch realisiert. Daneben sind viele weitere Systeme und Systemansätze publiziert, die jedoch häufig nur Teilfunktionen der beschriebenen Assistenzsysteme bilden oder sich auf ganz bestimmte Verkehrssituationen beschränken. Es sind hierzu u.a. der bereits erwähnte Kurven- und Kreuzungswarner (HAMBERGER et al. 1996), eine von KOPISCHKE (2000) dargestellte Notbremsfunktion und die Erkennung von Verkehrsschildern (METZLER 1998) und Hindernissen zu nennen. Im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts INVENT werden derzeit verschiedene Assistenzsysteme wie Stauassistenten, Kreuzungsassistenten und Querführungsassistenten erforscht.

Speziell für Kreuzungssituationen wird in KRÜGER et al. (2001) ein Konzept für ein zukünftiges Assistenzsystem vorgestellt, das den älteren Fahrern bei der Bewältigung der äußerst komplexen Verkehrssituationen an innerstädtischen Knotenpunkten hilft. Dabei wird der Fahrer u.a. bei der Vorfahrts- und Vorrangsregelung unterstützt. Im Gegensatz zu KRÜGER et al. (2001), bei dem von einem fahrzeugautonomen Ansatz ausgegangen wird, findet sich bei GÖTTING (2001) ein Szenario für das automatische Fahren in der Stadt, wo u.a. Funkanlagen an Kreuzungen dargestellt sind, die im Kreuzungsbereich die geltende Vorfahrtsregelung und Fahrtrichtungsinformation ins Fahrzeug kommunizieren. Bereits innerhalb des Projekts LISB wurden LSA-Anlagen untersucht, die ihren aktuellen Status mittels Infrarotsender ins Fahrzeug kommunizieren (VOY 1984).

### **Kreuzungsassistentensysteme**

Aufgrund des hohen Anteils von Knotenpunktunfällen im Stadtverkehr ist der Einsatz eines Fahrerassistenzsystems gerechtfertigt, das den Fahrer bei der Durchfahrt von Knotenpunkten unterstützt. Solche, speziell in Knotenpunktsituationen wirkende Systeme werden im weiteren Verlauf als Kreuzungsassistentensysteme bezeichnet. Mögliche Ausprägungen von Kreuzungsassistentensystemen sind zum Beispiel:

- ein Navigationssystem, das als weitere Optimierungsoption die „sicherste Route“ anbietet
- ein Ampel- und Vorfahrterkenner, der die durch Lichtsignalanlage und Verkehrszeichen angezeigte Vorfahrtsregelung im Fahrzeug darstellt und evtl. bei einer drohenden Missachtung in den Fahrprozess eingreift
- ein Kollisionswarner bzw. -vermeider für den Kreuzungsbereich, der vor Fahrzeugen, die sich auf Kollisionskurs befinden warnt oder über entsprechende Eingriffe versucht die Kollision zu verhindern.

**Navigationssystem mit Optimierungsoption sicherste Route:** Ein derartiges System unterstützt den Fahrer nicht speziell in Kreuzungssituationen. Vielmehr soll der Fahrer auf einer Route mit möglichst wenigen kritischen Verkehrssituationen (vgl. Kapitel 2.4) durch die Stadt geführt werden. Dazu müssen die bekannten Unfallschwerpunkte umfahren und unfallträchtige Fahrmanöver wie

das Linksabbiegen nach Möglichkeit vermieden werden. Inwieweit der Sicherheitsgewinn durch einen Mehrweg aufgezehrt wird, soll an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden.

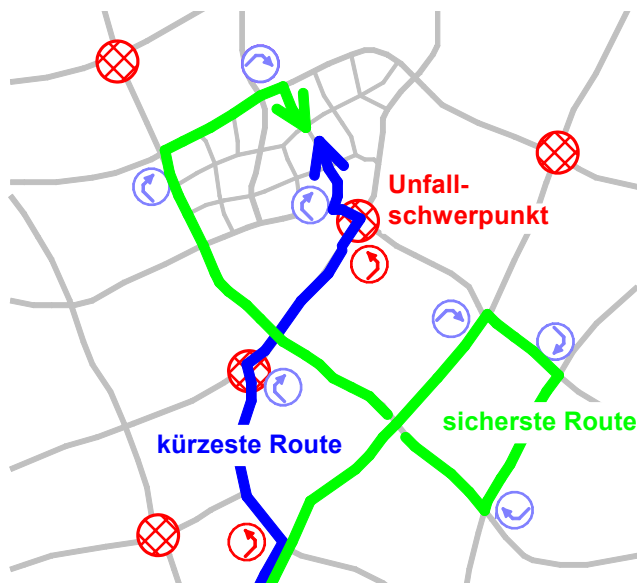


Abbildung 3-11: Navigationssystem mit Optimierungsoption sicherste Route

Aufgrund der Unterstützung auf der Navigationsebene kommen hierbei nur informierende Systeme in Betracht. Hinsichtlich des Assistenzkonzepts ist neben einem fahrzeugautonomen ein infrastrukturgestützter Ansatz denkbar. Beim zuerst Genannten ist eine Ergänzung der digitalen Straßenkarte hinsichtlich der Ausweisung von unfallträchtigen Kreuzungen und riskanten Fahrmanövern an Kreuzungen notwendig. Des Weiteren ist eine Anpassung des Routing-Algorithmus erforderlich. Bei einem infrastrukturgestützten Konzept ist neben einer zentralseitigen Berechnung der Route ebenso denkbar, dass die Routenberechnung im Fahrzeug verbleibt und die zusätzlich benötigten Informationen bei Bedarf von einer Zentrale ins Fahrzeug übertragen werden.

**Ampel- und Vorfahrterkennung:** Ein derartiges System kann in einem ersten Ansatz so gestaltet sein, dass es den Fahrer hinsichtlich der geltenden Vorfahrtsregelung informiert. Wird dazu ein fahrzeugautonomes Assistenzkonzept gewählt, ist eine Videokamera notwendig, die die im Straßenraum befindlichen Verkehrszeichen und Lichtsignale erkennt (vgl. METZLER 1998). Ebenso ist es möglich, die Vorfahrtsinformationen in einer Karte vorzuhalten (vgl. KRÜGER et al. 2001). Auf einen Hinweis zur aktuellen Anzeige der Lichtsignalanlage muss hierbei verzichtet werden. Bei entsprechender Ausstattung der Infrastruktur ist es denkbar, dass die Lichtsignalanlagen und Verkehrszeichen die geltende Vorfahrtsregelung mittels Nahbereichskommunikation ins Fahrzeug übertragen (VOY 1984). Wie beim Navigationssystem mit der Optimierungsfunktion sicherste Route können die zur Ergänzung der digitalen Straßenkarte notwendigen Informationen zur Vorfahrtsregelung auch von einer Zentrale kommen.

Neben einer informierenden Assistenzstrategie ist ebenso eine warnende oder intervenierende Unterstützungsform vorstellbar. Dies würde bedeuten, dass das Kreuzungsassistenzsystem nur dann den Fahrer unterstützt, wenn die Gefahr besteht, dass der Fahrer die geltende Vorfahrtsregelung missachtet. Für eine gesicherte Erkennung einer drohenden Vorfahrtsverletzung sind u.a. genaue

Kenntnisse über die aktuelle Position und den aktuellen Bewegungszustand des Fahrzeugs erforderlich. Im Falle eines indirekten Eingriffs ist der Fahrer unmissverständlich zu einer sofortigen Bremsung aufzufordern, im Falle eines direkten Eingriffs wird die Bremsung selbsttätig vom System eingeleitet.

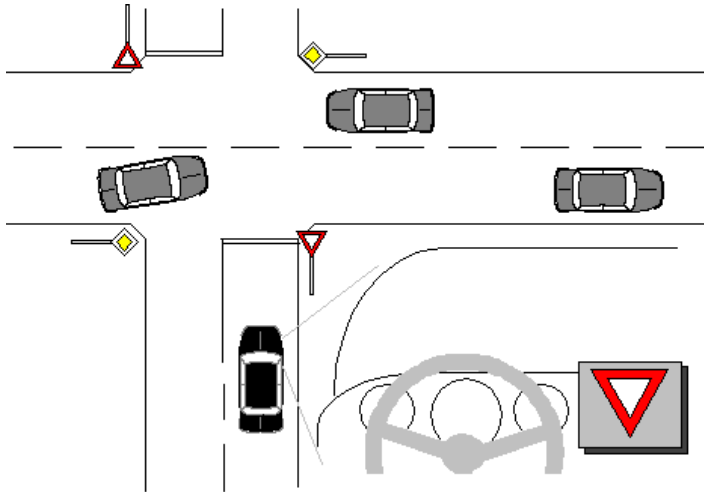


Abbildung 3-12: Ampel- und Vorfahrterkennung

**Kollisionswarner im Kreuzungsbereich:** Ziel eines derartigen Systems ist es, den Fahrer vor einer drohenden Kollision mit einem anderen Verkehrsteilnehmer zu warnen. So kann der Fahrer bei der korrekten Erkennung der Vorrangsregelung unterstützt werden. Ebenso ist es denkbar den Fahrer vor Fahrzeugen, die sich auf Kollisionskurs befinden zu warnen. Hierfür sind genaue Kenntnisse über die Absichten der anderen Verkehrsteilnehmer notwendig. Wird ein fahrzeugautonomer Ansatz gewählt, so muss über geeignete Sensoren und Auswertestrategien auf die Absichten der anderen Verkehrsteilnehmer geschlossen werden. Bei einem kooperativen Konzept können die Verkehrsteilnehmer mittels Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ihre Absichten austauschen, wobei sich hier die Problematik der Berücksichtigung von nicht ausgestatteten Verkehrsteilnehmern stellt.

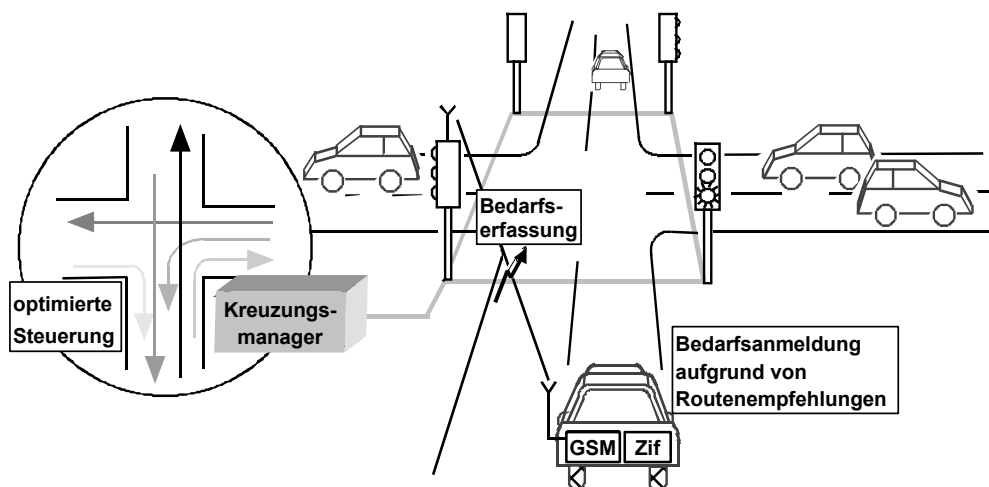


Abbildung 3-13: Kollisionswarner im Kreuzungsbereich

Eine infrastrukturgestützte Variante wäre, dass die Kreuzung entsprechende Kenntnisse über die im unmittelbaren Kreuzungsbereich befindlichen Verkehrsteilnehmer und deren Bewegungsverhalten hat und diese zur Erkennung drohender Kollisionen nutzt, um geeignete Sicherungsmaßnahmen einzuleiten. So könnte bei einer drohenden Rotüberfahrt die gesamte Kreuzung auf Rot geschaltet werden. Die dazu notwendigen Informationen kann die Kreuzung mittels einer Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation oder über infrastrukturgestützte Sensorik (z.B. Schleifen, Baken) beziehen.

Daneben sind weitere Varianten von Kreuzungsassistenzsystemen denkbar. Die obigen, bei weitem nicht vollständigen Ausführungen zeigen, wie vielfältig derartige Systeme ausgelegt sein können. Allen Systemen gemeinsam ist die Erfassung, Verwendung und Verarbeitung von Daten und Informationen zur Generierung fahrerunterstützender Informationen. Eine weitere Gemeinsamkeit besteht darin, dass derartige **sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme** über ihre gesamte Verwendungsdauer einen **sicheren Betrieb** erfordern. Ansonsten dürfen solche Systeme nicht betrieben werden. Aufgrund der dargestellten Bedeutung der Daten und Informationen in solchen Systemen überträgt sich die Forderung eines sicheren Betriebs auf die im System vorhandenen Daten und Informationen. Es sind **Sichere Informationen**, die definiert sind als **Informationen mit einer Qualität, die dem Sicherheitsniveau genügen** (vgl. Kapitel 3.3). Um dies zu erreichen, ist eine **Qualitätssicherung über die gesamte Informationskette** des Fahrerassistenzsystems erforderlich.

Zur Implementierung einer Qualitätssicherung über die gesamte Informationskette sind **einheitliche Qualitätsmerkmale zur Beschreibung der Informationsqualität** notwendig. Dazu müssen die genutzten Qualitätsmerkmale die unterschiedlichen Daten- und Informationstypen, wie sie in Fahrerassistenzsystemen auftreten, geeignet sein. In Kapitel 5 wird hierfür ein **Konzept zur Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität** innerhalb informationsverarbeitender Systeme definiert, welches dafür geeignete Qualitätsmerkmale enthält und ein Analyseverfahren zur Bewertung der Informationsqualität über den gesamten Informationsverarbeitungsprozess von Fahrerassistenzsystemen umfasst. In Kapitel 6 wird der oben dargestellte Ampel- und Vorfahrterkenner aufgegriffen, um die Anwendung des Qualitätskonzepts am Beispiel eines Fahrerassistenzsystems darzustellen. Zuvor werden in Kapitel 4 Qualitäts- und Zuverlässigkeitskonzepte verschiedener verwandter Fachbereiche sowie die grundlegenden Normen zur Qualität und Zuverlässigkeit vorgestellt.

## 4 Qualität und Zuverlässigkeit sicherheitsrelevanter Systeme

In den verschiedenen Fachbereichen (Maschinen- und Anlagenbau, ziviler Luftverkehr, schienengebundener Verkehr, Straßenverkehr oder Informationstechnologie) werden unterschiedliche Modelle, Methoden und Konzepte für die Qualitäts- und Zuverlässigkeitsbetrachtung angewandt. Die Konzepte sind dabei stark geprägt von der jeweiligen zugrunde gelegten Zuverlässigkeits- und Sicherheitsphilosophie. Der Schwerpunkt der Betrachtungen in diesem Kapitel liegt in einer Darstellung der genutzten Qualitätsmerkmale und -begriffe sowie einer Vorstellung einiger Verfahren und Methoden, die im Rahmen der Qualitäts- und Zuverlässigkeitsbetrachtung der verschiedenen Fachbereiche verwendet werden.

Vor der Betrachtung der Modelle, Methoden und Konzepte des Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmanagements der einzelnen Fachbereiche wird die allgemeine Bedeutung und Verwendung der Begriffe *Qualität*, *Zuverlässigkeit* und *Sicherheit* aufgearbeitet, wozu insbesondere die grundlegenden Normen zur Qualität und Zuverlässigkeit mit den enthaltenen Begriffsdefinitionen herangezogen werden. Des Weiteren werden verschiedene Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse vorgestellt.

### 4.1 Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit

**Qualität:** Im allgemeinen Sprachgebrauch wird mit dem Wort *Qualität* ein besonders wertvolles, haltbares und sicheres Erzeugnis oder Produkt verbunden (s. u.a. MASING 1986). Aufgrund eines fehlenden objektiven Qualitätsmaßstabs verkörpert die Qualität dabei eine rein subjektive Einschätzung eines Erzeugnisses. So wird z.B. bei einem Qualitätsprodukt automatisch davon ausgegangen, dass es sich um ein Produkt mit überdurchschnittlichen Ausprägungen handelt, obwohl hierfür in aller Regel keine objektiven Merkmale und Kriterien zur Qualitätsbeurteilung vorliegen.

Um eine objektive und quantifizierbare Aussage über die Qualität eines Produkts machen zu können, sind in verschiedenen Normen entsprechende Definitionen für die Qualität formuliert. Nach DIN EN ISO 8402 (1995) ist die Qualität definiert „als die Gesamtheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen“. Eine Einheit ist das, was im Einzelnen beschrieben und betrachtet wird und kann eine Tätigkeit, ein Prozess, ein Produkt, eine Organisation, ein System, eine Person oder irgendeine Kombination daraus sein (DIN EN ISO 8402: 1995).

Mit Erscheinen der DIN EN ISO 9000<sup>1</sup> im Dezember 2000 ist die **Qualität** definiert als

**„Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“**

und stellt dabei eine Kurzfassung einer früheren Definition dar, nach der „die Qualität ein Maß für den Grad ist, in welchem eine Betrachtungseinheit den durch den Verwendungszweck gestellten funktionellen, operationellen und physikalischen Eigenschaften und Anforderungen genügt“ (BIROLINI 1991).

---

<sup>1</sup> Mit Erscheinen der DIN EN ISO 9000 (2000) trat die DIN EN ISO 8402 (1995) außer Kraft. Im Rahmen dieser Arbeit wird die DIN EN ISO 8402 (1995) weiterhin genutzt, da auch sie einen Beitrag zu der hier im Vordergrund stehenden Modellfindung und Begriffsbildung in Kapitel 5 liefert. Ebenso beziehen sich die verschiedenen Qualitätskonzepte anderer Fachbereiche häufig noch auf diese Norm.



Ähnlich der lexikalischen Deutung, nach der die Qualität mit Güte, Beschaffenheit und Wertstufe umschrieben wird, ist bei dieser Definition eine Abstufung der Qualität enthalten. So kann ein Produkt eine von „sehr gut“ bis zu „sehr schlecht“ reichende Qualität aufweisen. Daneben ist zu beachten, dass sich die Qualität immer auf die gestellten Anforderungen bezieht, wobei diese von der beabsichtigten Verwendung der Einheit abhängen.

Die an verschiedenen Stellen genutzte, sehr prägnante Definition „Quality is fitness for use“ geht auf JURAN (1974) zurück und definiert die Qualität über die Gebrauchstüchtigkeit (JURAN 1991) bzw. Gebrauchstauglichkeit (vgl. DIN 55350-11: 1995). Gemäß der Einteilung von GARVIN (1984) verkörpert diese Definition den anwenderbezogenen Ansatz der Qualitätsbetrachtung, nachdem das Erzeugnis die höchste Qualität aufweist, das die Bedürfnisse des Anwenders am besten erfüllt (OESS 1989). Dabei beinhaltet diese Sicht der Qualität ebenso den Mangel, dass entsprechende Merkmale für eine objektive Beschreibung der Qualität eines Erzeugnisses oder Produkts fehlen.

**Zuverlässigkeit:** Neben dem Begriff *Qualität* nimmt der Begriff *Zuverlässigkeit* eine zentrale Rolle im Rahmen der Qualitätsbeschreibung ein. Die Zuverlässigkeit wird als der Teil der Qualität gesehen, der den zeitbezogenen Aspekt betrachtet (DIN EN ISO 8402: 1995). Nach DIN 40041 (1990) ist die **Zuverlässigkeit** definiert als die

**„Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen, bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderung zu erfüllen“.**

In DIN EN ISO 9000 (2000) wird die Zuverlässigkeit als „zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft“ definiert und orientiert sich stark an der technischen Auslegung der Zuverlässigkeit (vgl. u.a. BIROLINI 1991, VDI 4003-2: 1986), die nur die Verfügbarkeit bzw. Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit beschreibt und damit nicht die umfassende Bedeutung der Zuverlässigkeit im Sinne der DIN 40041 (1990) aufweist (Abbildung 4-1).

**Sicherheit:** Unter Sicherheit wird im allgemeinen Sprachgebrauch der Zustand der Gefahrlosigkeit verstanden. Im technischen Verständnis wird die Sicherheit als „Maß für die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit weder Menschen, Sachen noch die Umwelt zu gefährden“ (BIROLINI 1991) gesehen. In DIN VDE 31000-2 (1987) ist die Sicherheit definiert als eine „Sachlage, bei der das Risiko nicht größer ist als das größte noch vertretbare Risiko eines bestimmten technischen Vorgangs oder Zustands“. Eine ähnliche Definition ist in DIN EN ISO 8402 (1995) enthalten. Danach wird die **Sicherheit** mit

**„Zustand, in dem das Risiko eines Personen- oder Sachschadens auf einen annehmbaren Wert begrenzt ist“,**

umschrieben. Beide Definitionen werden dabei der Tatsache gerecht, dass es bei einem technischen System keine absolute Sicherheit geben kann. Ziel muss vielmehr sein, die von technischen Einrichtungen ausgehenden Risiken auf ein vertretbares Maß zu reduzieren. Das Risiko wird in diesem Zusammenhang als „die zu erwartende Häufigkeit des Eintritts eines zum Schaden führenden Ereignisses und das beim Ereigniseintritt zu erwartende Schadensausmaß“ gesehen (DIN VDE 31000-2: 1987).

**Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit:** Der bestehende enge Zusammenhang zwischen der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit bzw. der Sicherheit ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Dabei bildet die Verfügbarkeit gemäß DIN 40041 (1990) ein Zuverlässigkeitsmerkmal, das die Wahrscheinlichkeit beschreibt, mit der ein System in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen ist. Diese Sicht der Zuverlässigkeit betrachtet Maßnahmen, die die Funktionsfähigkeit des Systems erhalten. Dabei sind alle Fehler, welche die Funktionsfähigkeit des Systems beeinträchtigen von Bedeutung. Im Gegensatz dazu sind hinsichtlich der Sicherheit nur die Fehler zu berücksichtigen, die zu einem Versagen der sicherheitsrelevanten Schutzfunktionen führen. Ziel der Zuverlässigkeitsmaßnahmen ist, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von sicherheitsrelevanten Fehlern auf ein akzeptables Maß zu begrenzen. Grundsätzlich gilt dabei, dass mit zunehmendem Risiko sich die Anforderungen – und damit auch die Zuverlässigkeitsforderungen – an die sicherheitsrelevanten Maßnahmen erhöhen. Eine derartig umfassende Sicht der Zuverlässigkeit findet sich ebenso in LAPRIE (1992): „*Dependability* encompasses, among other attributes, *reliability, safety, security and availability*.“ Die Zuverlässigkeit (*dependability*) bildet hierbei die umfassende Sicht, die in Übereinstimmung zu DIN 40041 sowohl den Aspekt der Sicherheit als auch den Aspekt der Verfügbarkeit berücksichtigt. An verschiedenen Stellen (u.a. VDI/VDE 3542-4: 2000) wird die umfassende Sicht der Zuverlässigkeit auch mit Verlässlichkeit umschrieben. Die bei LAPRIE (1992) aufgeführte Kenngröße Zuverlässigkeit (*reliability*) beschreibt in diesem Zusammenhang die Funktionsfähigkeit. Die im Vergleich zum Englischen fehlende Differenziertheit bei der „Zuverlässigkeit“ findet sich im Deutschen ebenso bei der „Sicherheit“ (*safety, security*) wie beim „Fehler“ (*error, fault, nonconformity, human error*).

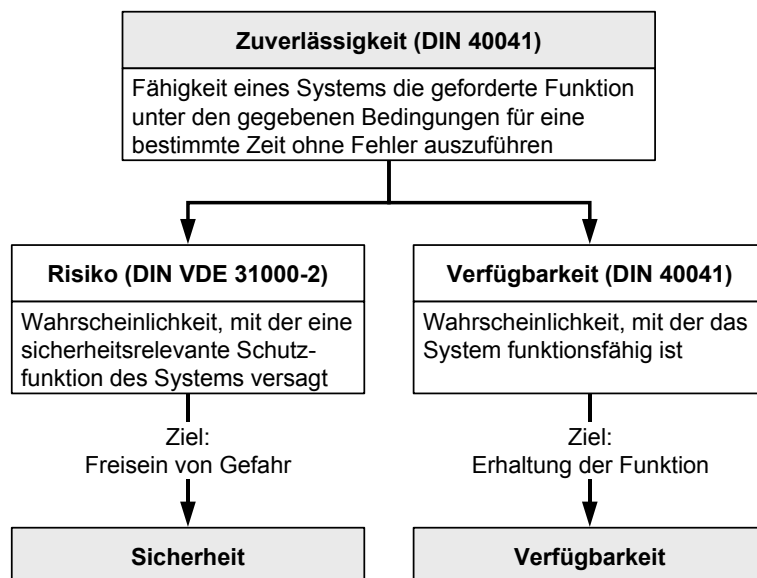


Abbildung 4-1: Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit in Anlehnung an NIX (1984)

## 4.2 Zuverlässigkeits- und Sicherheitskonzepte im Maschinen- und Anlagenbau

Das wachsende Qualitätsbewusstsein des Kunden und die Notwendigkeit einer hohen Leistungsfähigkeit fordern von Maschinen neben einer hohen Fertigungsqualität eine maximale Mengenleistung. Die Rentabilität einer Produktionsanlage ist somit entscheidend geprägt von deren Verfügbarkeit. Die **Verfügbarkeit** (*availability*) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Betrachtungseinheit zu einem gegebenen Zeitpunkt bzw. über eine definierte Zeitspanne die geforderte Funktion unter den gegebenen Arbeitsbedingungen störungsfrei ausführt (VDI 4001-2: 1986, BIROLINI 1991). Dabei umfasst die Verfügbarkeit nicht nur die

- **Zuverlässigkeit** (*reliability*)

als Wahrscheinlichkeit, dass eine Betrachtungseinheit zu einem gegebenen Zeitpunkt die geforderte Funktion unter gegebenen Arbeitsbedingungen ausfallfrei ausführt, sondern auch Aspekte der

- **Instandhaltbarkeit** und
- **Instandsetzbarkeit.**

Im Gegensatz zu der umfassenden Sicht der Zuverlässigkeit gemäß DIN 40041 (1990) ist hier die Zuverlässigkeit im Sinne der Funktionsfähigkeit eines Systems bzw. einer Systemkomponente zu sehen.

Die Sicherheit als ein Maß für die Fähigkeit eines Systems, weder Menschen, Sachen noch die Umwelt zu gefährden, ist im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus unter zwei Gesichtspunkten zu sehen: Erstens darf von der Anlage keine unvermeidbar hohe Gefährdung gegenüber den mit der Anlage arbeitenden Personen ausgehen. Dies betrifft insbesondere die Aspekte der Unfallverhütung und Maßnahmen zur Arbeitssicherheit (Schutz des Arbeitnehmers an seinem Arbeitsplatz vor Gefahren für seine Gesundheit). Zweitens muss die Gefährdung der in unmittelbarer Umgebung lebenden Bevölkerung auf ein akzeptables Maß begrenzt sein. Derartige Überlegungen müssen auch mögliche Einflüsse und Auswirkungen von Katastrophen und Sabotagen beinhalten. Somit nehmen die Sicherheitsbetrachtungen, besonders bei Industrieanlagen mit hohem Gefährdungspotenzial wie Kernkraftwerke und chemische Großanlagen, eine zentrale Rolle ein. Die angewandten Sicherheitskonzepte gründen dabei auf zwei grundsätzliche Sicherheitseigenschaften:

1. **Inhärente Sicherheitseigenschaften**, als dem System innewohnende physikalische Sicherheitseigenschaften
2. **Ingenieurtechnische Sicherheitsmaßnahmen**, als zusätzliche konstruktive Sicherheitsmaßnahmen.

Bei der Entwicklung und Konstruktion derartiger Anlagen sind stets die inhärenten Sicherheitseigenschaften so weit wie möglich auszunutzen (BUTZ et al. 1985). Aufgrund der bestehenden Schwierigkeiten einer empirischen Ermittlung der Ausfallraten einzelner Systemkomponenten wurden im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus schon frühzeitig analytische Methoden genutzt, die eine Quantifizierung des Einflusses einzelner Komponenten auf die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Systems gestatten (UEBING 1981). Im Bereich der Zuverlässigkeits-, Störfall- und Risikoanalyse kommen dabei bevorzugt die Fehlerbaum- und Ereignisablaufanalyse (s. Kap. 4.4) zum Einsatz.

### 4.3 Zuverlässigkeits- und Sicherheitskonzepte für Fahrzeugsysteme im Straßenverkehr

Im Gegensatz zum Schienen- und Luftverkehr ist der Straßenverkehr geprägt von der Möglichkeit die individuellen Transportbedürfnisse spontan und in den Grenzen des vorhandenen Straßennetzes frei von räumlichen und zeitlichen Zwängen zu befriedigen (HIMMELSTEIN et al. 2000). Dies ist nur deshalb möglich, weil hier keine zentrale Steuerung des Verkehrsablaufs existiert, sondern jeder Verkehrsteilnehmer selbst verantwortlich ist, gemäß der geltenden Verkehrsregelung und der vorliegenden Verkehrssituation, einen geeigneten Fahrweg zu finden. Hierbei ist insbesondere ein ausreichender Sicherheitsabstand zu den in Längs- und Querrichtung befindlichen Verkehrsteilnehmern einzuhalten.

Die Maßnahmen, die in den letzten drei Jahrzehnten im Fahrzeugbau ergriffen wurden um die Verkehrssicherheit im Straßenverkehr zu steigern, war bisher geprägt von einer Erhöhung der passiven Sicherheit, d.h. von Maßnahmen zur Minderung der Unfallfolgen. Derzeit laufen die Bestrebungen verstärkt in Richtung einer Erhöhung der aktiven Sicherheit, d.h. in Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen. Daneben findet sich eine immer größere Anzahl von Systemen, die eine bessere Handhabung und einen gesteigerten Komfort bieten. Alle diese Bestrebungen führen zu einer wachsenden Zahl von elektronischen Systemen im Kraftfahrzeug. Eine Betrachtung der Entwicklung des Elektronikanteils in Kraftfahrzeugen zeigt eine stetige Zunahme von elektronischen Bauteilen und Systemen. Bezüglich der Kosten eines Fahrzeugs entfallen heute über 20% auf die Elektrik und Elektronik. Als begünstigende Faktoren für den verstärkten Einsatz von Elektronik im Kraftfahrzeug sind u.a. folgende Punkte zu nennen:

- Fortschritte im Bereich der Mikroelektronik, die sich insbesondere in einer Miniaturisierung und einer exponentiell wachsenden Leistungsfähigkeit der Komponenten ausdrücken
- die immer günstigere Entwicklung des Preis-Leistungsverhältnisses von elektronischen Produkten
- die flexibleren Einsatzmöglichkeiten von elektronischen Bauteilen, was insbesondere den Einbau derartiger Komponenten im Kraftfahrzeug betrifft.

Im Rahmen des Forschungsprojekts PROMETHEUS wurde zum ersten Mal der Einsatz von Elektronik in Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Auswirkungen auf eine effektivere und sicherere Gestaltung des Straßenverkehrs intensiver untersucht. Demnach ist unbestritten, dass der Einsatz von elektronischen Systemen im Kraftfahrzeug die Fahrsicherheit erhöht. Neben einer Entlastung des Fahrers wird dies durch Korrekturen bei Fehlbedienungen und durch Schutzsysteme, welche die Auswirkungen von gefährlichen Systemzuständen verringern, erreicht. Durch weitere Forschungsprojekte (DRIVE, MOTIV, INVENT) und die aktuellen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten wird dieser Trend untermauert. Die heute bereits umfangreiche Unterstützung von Fahrfunktionen durch elektronische Systeme wird sich in Zukunft noch weiter verstärken und könnte bis hin zur autonomen Ausführung einzelner Fahrfunktionen führen. In Kraftfahrzeugen werden somit in zunehmendem Maße sicherheitsrelevante Funktionen von elektronischen Bauteilen und Systemen übernommen.

Durch den Einsatz von elektronischen Komponenten ergeben sich verschiedene Konsequenzen, die hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Sicherheit dieser Systeme zu bedenken sind:

- Im Gegensatz zu mechanischen Bauteilen erfolgen die Ausfälle bei elektronischen Bauteilen in der Regel ohne Vorwarnung. Dem kann nicht durch Wartung, sondern nur durch den frühzeitigen Austausch des gesamten Systems begegnet werden.
- Durch den Einsatz von zusätzlichen (elektronischen) Komponenten erhöht sich die Ausfallrate des Gesamtsystems.

Hieraus ergibt sich die Konsequenz, dass elektronische Systeme so entwickelt werden müssen, dass Ausfälle nahezu ausgeschlossen sind. Die Sicherstellung einer hohen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit betrifft insbesondere aktive Systeme mit Sicherheitsrelevanz (BRAESS & REICHART 1989). Bei einem Ersatz von mechanischen oder hydraulischen Komponenten durch elektronische Bauteile und Systeme wird vielfach der „Stand der Technik“ als Kriterium für die Sicherheit herangezogen, nachdem das neue System mindestens dasselbe Sicherheitsniveau aufweisen muss wie die ursprüngliche Technik (BEER & SCHMIDT 2000, PILZ 2000). Zur Führung des Nachweises der Sicherheit und Zuverlässigkeit elektronischer Systeme im Kraftfahrzeug werden zumeist bewährte Methoden und Verfahren anderer Fachbereiche herangezogen und entsprechend angepasst.

Nach MECKELBURG (1989) sind bei der Entwicklung sicherheitsrelevanter Systeme grundsätzlich drei Schritte erforderlich:

1. die **Risikoanalyse**
2. die **Auswahl organisatorischer und konstruktiver Maßnahmen** zur Reduzierung des vorhandenen Risikos auf ein akzeptables Risiko
3. der **Sicherheitsnachweis**, dass die Auswahl der organisatorischen und konstruktiven Maßnahmen ausreichend ist. Der Nachweis der Wirksamkeit der konstruktiven Maßnahmen ist mit Hilfe analytischer Verfahren zu erbringen.

Über die **Risikoanalyse** soll bereits zu Beginn der Entwurfsphase eine klare Einstufung des Systems hinsichtlich der Sicherheitsanforderung erfolgen. Dazu wird an verschiedenen Stellen (u.a. STALL 1986, TRIER 1990, KÖNIG 1995, BEER & SCHMIDT 2000) vorgeschlagen eine Risikoanalyse gemäß DIN V 19250 (1994) durchzuführen, nach der acht Anforderungsklassen unterschieden werden. In Abhängigkeit der vorliegenden Risikoparameter, die das Schadensausmaß, die Dauer des Aufenthalts im Gefahrenbereich, die Möglichkeit einer Gefahrenabwendung und die Eintrittswahrscheinlichkeit des unerwünschten Ereignisses berücksichtigen, kann über den sich daraus ergebenden Risikopfad auf die vorliegende Anforderungs- bzw. Sicherheitsklasse geschlossen werden.

In Abbildung 4-2 ist der für ein ABS-System sich ergebende Risikopfad beispielhaft dargestellt. Unter Berücksichtigung, dass für Fahrzeugsysteme nicht acht, sondern fünf Sicherheitsklassen unterschieden werden (s. STALL 1986 und TRIER 1990), ergibt sich für ein ABS-System die Sicherheitsklasse 2 (Tabelle 4-1). Der zugrunde gelegte Risikopfad besagt, dass bei einem Systemversagen mit dem Tod mehrerer Personen gerechnet werden muss, das System selten bis öfter aktiv ist und eine Gefahrenabwehr durch den Fahrer nicht möglich ist.

Tabelle 4-1: Einteilung der Sicherheitsklassen für Fahrzeugsysteme nach STALL (1986), TRIER (1990) und KÖNIG (1995)

Klasse	Definition	Beispiele	Systemauslegung
1	<b>sehr großes Gefahrenpotenzial</b> während der Fahrt dauernd aktiv	elektronische Spurführungssysteme elektronische Bremseinrichtungen elektronische Lenkung	3-kanalig, Diversität mit Fehlermeldung
2	<b>großes Gefahrenpotenzial</b> zeitweise aktiv, überwiegend in Aktionsbereitschaft	ABS, ASR, ESP Getriebesteuerungen, Reifendruckregelungen, Airbag	2-kanalig mit Fehlermeldung
3	<b>mittleres Gefahrenpotenzial</b> Fehler führt zu überraschender Fahrzeugreaktion	Geschwindigkeitsregelung und -begrenzung, Sitzverstellung, elektronische Dämpfung und Niveauregulierung	1-kanalig mit Fehlermeldung
4	<b>geringes Gefahrenpotenzial</b> im Fehlerfall Behinderung oder Belästigung	elektronische Einspritzung und Zündung Start-/Stop-Anlagen Alarmanlagen mit Motorabschaltung	qualifizierte Bauelemente
5	<b>ohne Gefahrenpotenzial</b> Rückwirkung auf sicherheitsrelevante Teile ausgeschlossen	Bordcomputer ohne aktiven Eingriff elektronische Außenspiegelverstellung Diagnosesysteme	–

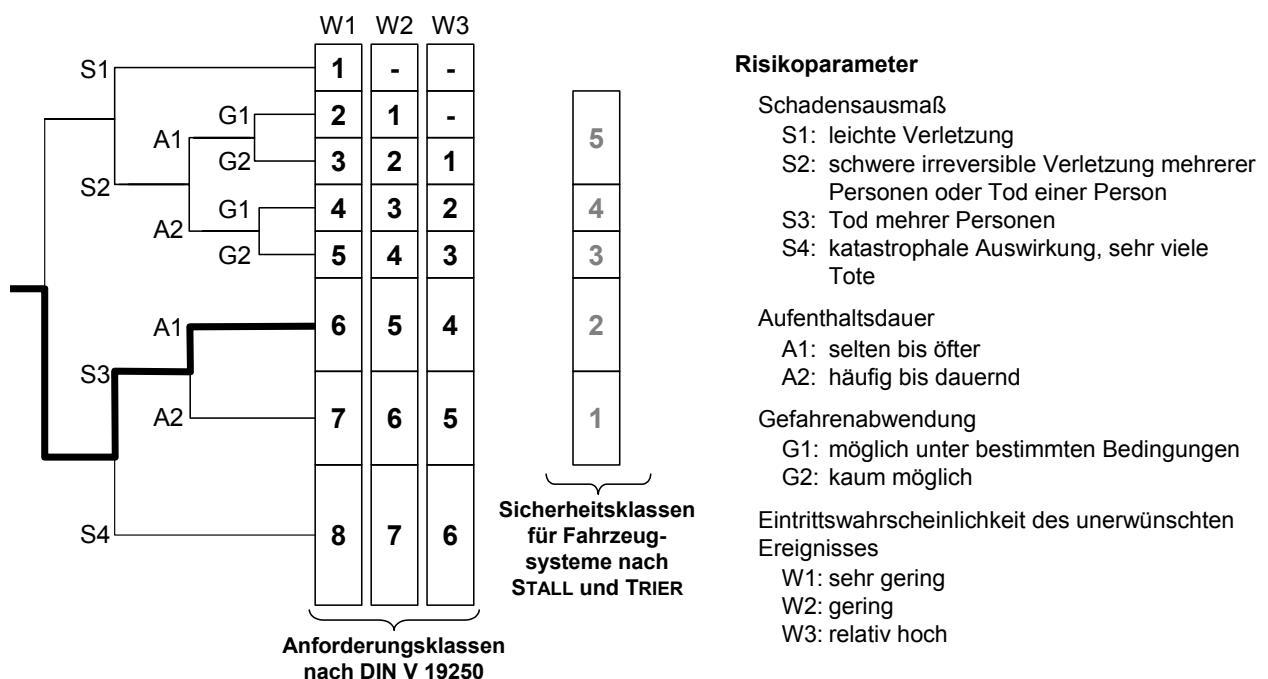


Abbildung 4-2: Risikograph und Anforderungs- bzw. Sicherheitsklassen gemäß DIN V 19250 (1994), STALL (1986), TRIER (1990)

Eine Grundvoraussetzung, um die angestrebte Sicherheitsklasse zu erreichen, ist eine hohe Zuverlässigkeit der Systemkomponenten. Daneben sind geeignete **konstruktive Maßnahmen** festzulegen, welche die Ausfallzeiten eines Systems durch Fehlervermeidung und Fehlerbeherrschung verringern (MEYNA 1994). Nach STALL (1986) und TRIER (1990) können die Konstruktionsmaßnahmen für die Sicherheit eingeteilt werden in:

- Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Bauteile
- Maßnahmen zum Schutz gegen gefährliche Fehler.

Da eine Steigerung der Zuverlässigkeit der einzelnen Bauelemente im System nur bis zu einem bestimmten Grad möglich ist, kommen insbesondere den Maßnahmen, die eine Beherrschung von gefährlichen Fehlern ermöglichen eine besondere Bedeutung zu. Die hierfür notwendigen Redundanzen erhöhen zwar die Zahl der Systemkomponenten und damit auch die Zahl der möglichen Fehler. Die für die Sicherheit entscheidende Zahl von gefährlichen Fehlern kann damit jedoch entscheidend verringert werden (vgl. STALL 1986 und TRIER 1990). Diesem Konzept folgend ist zum Erreichen des geforderten Sicherheitsniveaus eines ABS-Systems ein 2-kanaliger Schaltungsentwurf mit Fehlermeldung notwendig (s. Tabelle 4-1). Der Aufbau eines Schaltungskonzepts der Sicherheitsklasse 2 ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

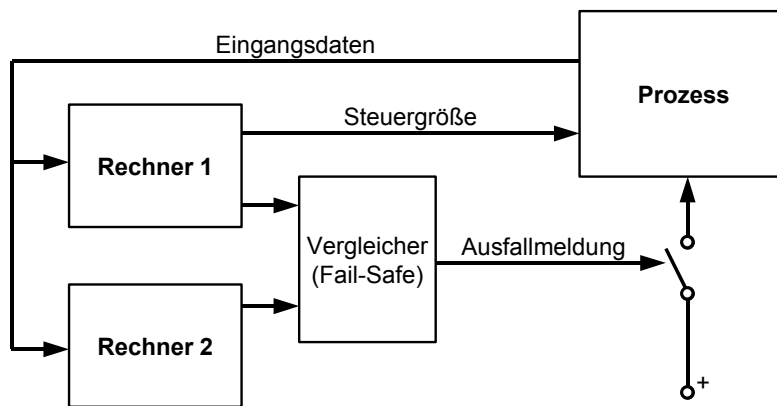


Abbildung 4-3: Zweikanaliges Steuerungssystem mit sicherem Zustand nach STALL (1986) und TRIER (1990)

Um den **Sicherheitsnachweis** zu liefern, dass mit den gewählten konstruktiven Maßnahmen das geforderte Sicherheitsniveau erreicht wird, sind nach MECKELBURG (1989) geeignete analytische Verfahren heranzuziehen. Dabei wird vielfach auf bewährte Verfahren aus anderen Fachbereichen zurückgegriffen. Neben der Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse (FMEA) kommt hierbei u.a. die Fehlerbaumanalyse zum Einsatz (s. BRAESS & REICHART 1989, THEIS 2000, Binfet-Kull et al. 2001).

#### 4.4 Standardisierte Verfahren der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse

Im Folgenden soll ein Überblick über die gängigen Verfahren der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse gegeben werden. Auf einen Teil dieser Verfahren wird im Rahmen der Erarbeitung eines Analyseverfahrens zur Bewertung der Informationsqualität von Fahrerassistenzsystemen (Kapitel 5.4) zurückgegriffen. Wie bereits mehrfach in vorangegangenen Kapiteln angedeutet, werden verschiedene Verfahren zur analytischen Betrachtung der Zuverlässigkeit und Sicherheit technischer Systeme genutzt. Die Aufstellung erhebt dabei keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit. Sie orientiert sich vielmehr an den beschriebenen Verfahren im VDI-Handbuch „Technische Zuverlässigkeit“ und an weiteren grundlegenden standardisierten Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse.

Nach MEYNA (1982) können die Verfahren und Methoden in Boolesche und Nicht-Boolesche Modelle eingeteilt werden (vgl. Abbildung 4-4). Die **Boolesche Modellbildung** weist den Vorteil einer übersichtlichen Darstellung der logischen Zusammenhänge und die Möglichkeit der Quantifi-

zierung auch bei großen komplexen Systemen auf. Dies gilt insbesondere für die **deduktiven** Verfahren, bei denen, ausgehend von einem unerwünschten Ausgangsereignis (= Ausfall des Systems), die Eingangsereignisse und deren Kombinationen (= Ausfall von Systemkomponenten) betrachtet werden, die zu dem unerwünschten Ereignis führen. Bei den **induktiven** Verfahren wird der umgekehrte Weg gegangen. Hier werden, ausgehend von einem besonderen Einzelfall in Form des Ausfalls einer Systemkomponente, die daraus resultierenden Auswirkungen auf das System bestimmt.

Der Vorteil der auf der **Nicht-Booleschen Modellbildung** basierenden Verfahren und Methoden liegt in der möglichen Betrachtung verschiedener Ausfallarten und Berücksichtigung von stochastischen Abhängigkeiten zwischen den Systemkomponenten. Im Gegensatz zu den Verfahren mit Boolescher Modellbildung, bei denen die Betrachtung mit dem Ausfall einer Systemkomponente endet, können bei den Verfahren mit der Nicht-Booleschen Modellbildung auch reparierbare Systeme behandelt werden. Ihre Anwendung ist jedoch auf kleine Systeme oder Systemkomponenten beschränkt.

Weitere charakteristische Unterscheidungsmerkmale bilden die **zeitlichen Anwendungsschwerpunkte** in den verschiedenen Projektphasen des Systems (Projektierung, Realisierung, Verwendung), die **Anwendungsgrenzen** und die angewandten **Auswerteverfahren** (graphisch, analytisch, textlich).

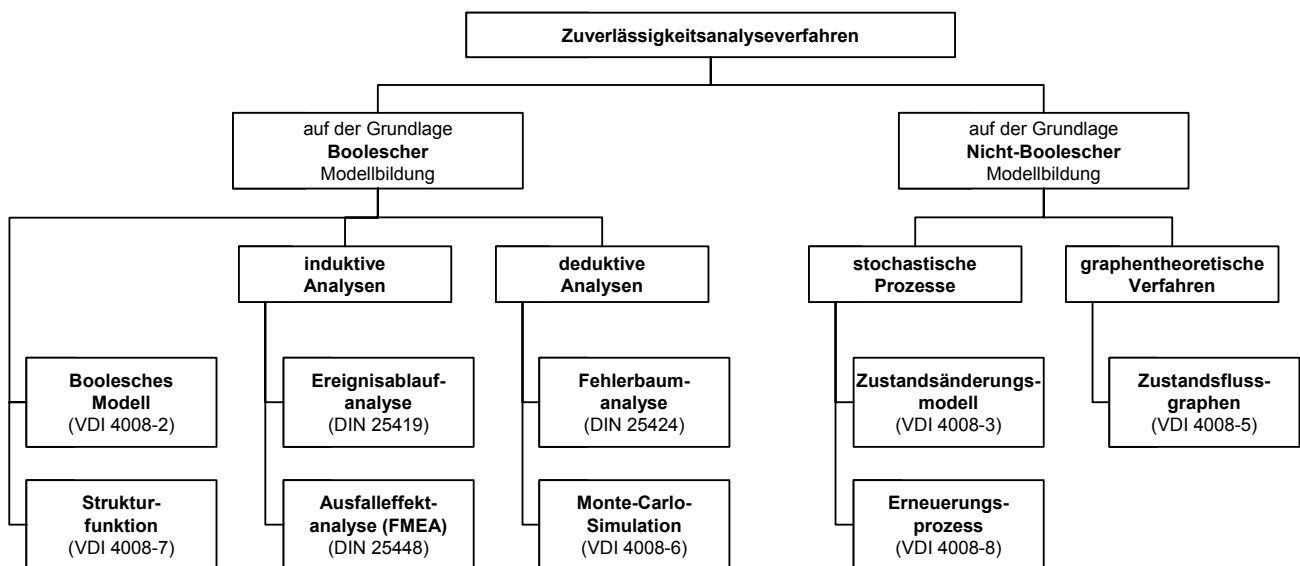


Abbildung 4-4: Übersicht der standardisierten Zuverlässigkeitsanalyseverfahren (in Anlehnung an MEYNA (1982))

**Boolesches Modell (VDI 4008-2):** Das Boolesche Modell ist das gebräuchlichste und zugleich einfachste Modell zur Analyse der Zuverlässigkeit technischer Systeme. Es gestattet eine Beurteilung der Funktionsfähigkeit, einen Vergleich von Systementwürfen, das Aufzeigen von Schwachstellen und den rechnerischen Nachweis von Zuverlässigkeitsforderungen. Die Modellierung der Systemstruktur erfolgt über einfache Reihen- und Parallelanordnungen, wobei sich die logische Verknüpfung der Systembestandteile an der Theorie der Schaltalgebra orientiert. Die Systemzustände werden durch eine zweiwertige Zustandsvariable ausgedrückt. Es werden somit nur die zwei Zustände



$$Z_i = \begin{cases} 1, & \text{wenn Komponente } K_i \text{ ausgefallen} \\ 0, & \text{wenn Komponente } K_i \text{ nicht ausgefallen} \end{cases} \quad (4-1)$$

unterschieden. Bei der Anwendung des Booleschen Modells ist zu beachten, dass zeitliche Abläufe nicht explizit abgebildet werden können. Eine weitere Voraussetzung ist die stochastische Unabhängigkeit der Systemkomponenten hinsichtlich ihres Ausfallverhaltens. Da kompliziertere Strukturen mit dem Booleschen Modell nicht befriedigend zu lösen sind, wird in diesen Fällen zu komplexeren Modellen wie der Strukturfunktion übergegangen.

**Strukturfunktion (VDI 4008-7):** Die Strukturfunktion basiert ebenso wie das Boolesche Modell auf der Booleschen Theorie. Sie bildet die zweiwertige Funktion  $\varphi(\mathbf{Z})$  des Zustandsvektors  $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ , die in Abhängigkeit der Funktionsfähigkeit der  $n$  Komponenten im System die Funktionsfähigkeit des Systems beschreibt. Analog zu (4-1) gilt für die Strukturfunktion:

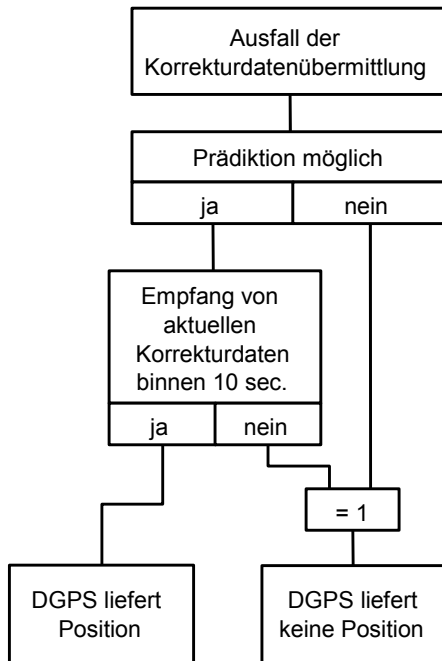
$$\varphi(\mathbf{Z}) = \begin{cases} 1, & \text{wenn das System ausgefallen ist} \\ 0, & \text{wenn das System nicht ausgefallen ist} \end{cases} \quad (4-2)$$

Ausgehend von den Zuverlässigkeitskenngrößen (z.B. Ausfallwahrscheinlichkeit, Verfügbarkeit, Ausfallanzahl, MTBF, MTTF) der Komponenten können Zuverlässigkeitskenngrößen eines Systems ermittelt werden. Bei der Verwendung probabilistischer Zuverlässigkeitskenngrößen kann über die Strukturfunktion die Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems ermittelt werden. Die Strukturfunktion fordert wie das Boolesche Modell stochastische unabhängige Komponenten. Die Vorteile des Verfahrens liegen in dem rechnerischen Nachweis der Systemzuverlässigkeit und der Möglichkeit der Behandlung komplexer Systeme, wobei sich die Komplexität in einer hohen Komponentenzahl, unterschiedlichen Ausfallarten, zeitabhängigen Ausfallraten und starken Redundanzen zeigen kann.

**Ereignisablaufanalyse (DIN 25419):** Die Ereignisablaufanalyse dient der Beschreibung und Bewertung von Ereignisabläufen und wird bevorzugt bei der Untersuchung von Störungen und Störfällen in technischen Systemen eingesetzt. Als induktives Verfahren werden, ausgehend von einem unerwünschten Anfangsereignis, die resultierenden Ereignisabläufe als Auswirkung auf das System bestimmt. Abbildung 4-5 zeigt am Beispiel eines DGPS-Systems (Differential Global Positioning System) die Auswirkungen des Ausfalls der Korrekturdatenübermittlung auf das System.

Der Ereignisablauf wird graphisch mittels eines Ereignisablaufdiagramms dargestellt und zeigt anschaulich die bestehenden logischen Zusammenhänge. Das Schema wird auch genutzt, um die Wahrscheinlichkeiten der Ereignisabläufe zu bestimmen. Dazu müssen die Verzweigungswahrscheinlichkeiten beispielsweise über eine Fehlerbaumanalyse ermittelt werden. Im Ereignisablaufdiagramm treten nur Verzweigungen und ausschließende ODER-Verknüpfungen auf. Diese werden ausnahmslos zur Zusammenfassung von Verzweigungen, die zum selben Ereignis führen, genutzt. Die Ereignisablaufanalyse eignet sich besonders bei der Bestimmung der Häufigkeit bestimmter Zustände, in der Ermittlung von Schwachstellen und Überdimensionierungen und wird im Rahmen von Risikostudien eingesetzt. Entscheidend für einen erfolgreichen Einsatz ist die Berücksichtigung aller Anfangsereignisse, die zu kritischen Systemzuständen führen können.

Ereignisablauf am Beispiel des Ausfalls der Korrekturdaten bei einer kinematischen DGPS-Messung



Auszug der graphischen Symbole zur Darstellung von Ereignisabläufen gemäß DIN 25419

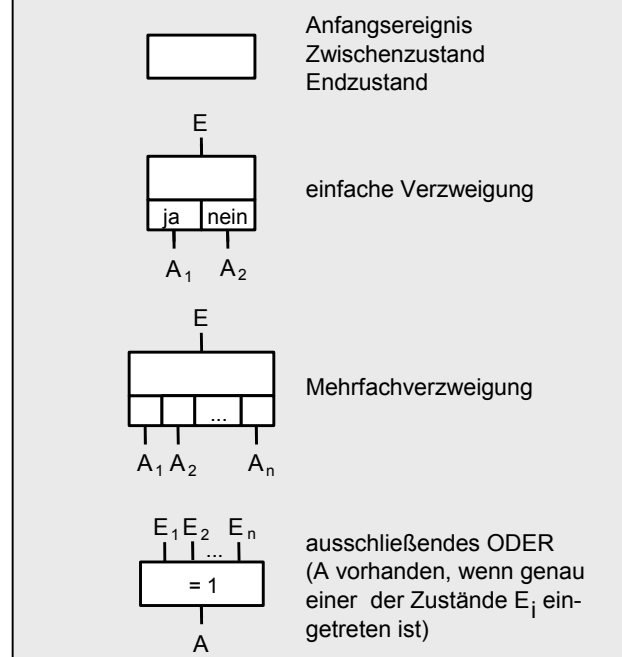


Abbildung 4-5: Beispiel eines Ereignisablaufdiagramms

**Ausfalleffektanalyse (DIN 25448):** Die Ausfalleffektanalyse, die auch als Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse (FMEA) bezeichnet wird, bildet ein stark formalisiertes Verfahren. In einer tabellarischen Aufstellung werden zu jeder Baueinheit die Ausfallarten und deren Auswirkungen auf das System festgestellt und bewertet. Es handelt sich hierbei um eine rein textliche Beschreibung, die insbesondere das Auffinden von Schwachstellen im System unterstützt. In KUHLMANN (1995) wird die Ausfalleffektanalyse als qualitatives Prognoseverfahren bezeichnet. Entscheidend ist hierbei, dass alle möglichen Ausfallarten einer Einheit festgestellt werden. Der Erfolg der Methode ist damit maßgeblich von der Erfahrung und der Bewertung des Bearbeiters abhängig (BERTSCHE & LECHNER 1999). Ausfallkombinationen sind mit diesem Verfahren nicht behandelbar. Für die Ereignisablaufanalyse oder die Fehlerbaumanalyse, die ein Betrachten von Ausfallkombinationen gestatten, liefert die Ausfalleffektanalyse nützliche Vorabinformationen über Ausfallarten und Ausfalleffekte.

**Fehlerbaumanalyse (DIN 25424):** Bei der Fehlerbaumanalyse (FTA) handelt es sich um ein Verfahren, das eine systematische Identifizierung aller möglichen Kombinationen von Fehlern, die zu einem unerwünschten Ereignis führen, gestattet. In einem Fehlerbaum werden dazu die logische Verknüpfung der Komponenten und Teilsystemausfälle graphisch dargestellt (DIN 25424-1: 1981). Im Unterschied zur Ereignisablaufanalyse wird hier ein Systemausfall als unerwünschtes Ereignis (TOP-Ereignis) vorgegeben und nach den Ursachen gesucht, die zu diesem Ereignis führen. Die Fehlerbaumanalyse eignet sich sowohl für einfache als auch für komplexe Systeme (KUHLMANN 1995). Zeitliche Abhängigkeiten können berücksichtigt werden. Ebenso können Abhängigkeiten

zwischen den Ausfällen bestehen. Dies muss jedoch in der Aufstellung des Fehlerbaums entsprechend berücksichtigt werden. Eine Auswertung von Fehlerbäumen kann entweder analytisch mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung (DIN 25424-2: 1990) oder simulatorisch mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation (VDI 4008-6: 1985) erfolgen. Letztere wird bevorzugt für die Auswertung komplexer Systeme eingesetzt. Um eine vollständige qualitative Analyse durchzuführen empfiehlt WU (1992) eine parallele Ausführung der FMEA und FTA.

**Monte-Carlo-Simulation (VDI 4008-6):** Ebenso wie die Fehlerbaumanalyse wird die Monte-Carlo-Simulation den deduktiven Analyseverfahren zugeordnet. Es handelt sich hierbei um eine Simulationsmethode, mit der die Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit von Systemen ermittelt werden kann und die insbesondere bei komplexen Systemen zum Einsatz kommt, die mit anderen Methoden nicht mehr behandelt werden können. Um die Monte-Carlo-Simulation anwenden zu können, müssen die Zufallsgrößen der Systemelemente mit den zugehörigen Verteilungen (z.B. Exponential- oder Weibullverteilung) bekannt sein.

**Zustandsänderungsmodell (VDI 4008-3) und Zustandsflussgraphen (VDI 4008-5):** Das Zustandsänderungsmodell basiert auf der Theorie der stochastischen Prozesse. Mit dem Verfahren wird das Änderungsverhalten der Betrachtungseinheit, d.h. ein System bzw. eine Systemkomponente, betrachtet. Ein System wird dabei durch eine endliche Zahl von Zuständen  $z_i$  beschrieben. Alle Zustände werden in der Zustandsmenge

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\} \quad (4-3)$$

zusammengefasst. Die Übergänge, die sich zwischen den Zuständen des Systems vollziehen können, werden durch Wahrscheinlichkeitskenngrößen beschrieben. Dabei kann sich das System zu jedem Zeitpunkt in genau einem Zustand  $z_i$  befinden. Die zeitliche Betrachtung kann dabei diskret oder kontinuierlich erfolgen. Sind die Übergangswahrscheinlichkeiten unabhängig von früheren Zuständen, so spricht man bei einer diskreten zeitlichen Betrachtung von einer Markoff-Kette und bei einer kontinuierlichen zeitlichen Betrachtung von einem Markoff-Prozess. Die graphische Darstellung erfolgt mittels eines Zustandsdiagramms (Abbildung 4-6), das sich an der Methodik des Zustandsflussgraphen orientiert (VDI 4008-5: 1986).

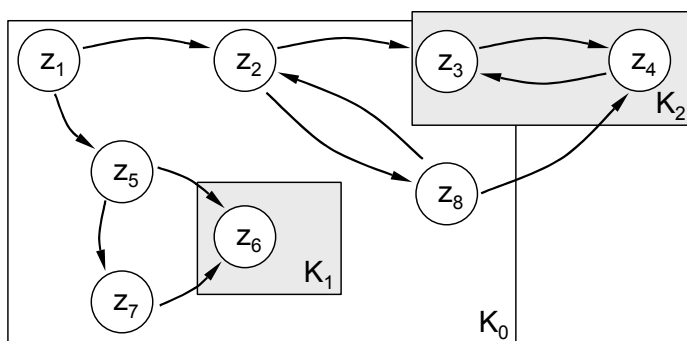


Abbildung 4-6: Zustandsdiagramm mit drei Zustandsklassen  $K_0$  bis  $K_2$

**Erneuerungsprozess (VDI 4008-8):** Die Methode basiert auf der Theorie des stochastischen Punktprozesses, der zufällige diskrete Ereignisse in einem Kontinuum beschreibt (O'CONNOR 1990). Hierbei wird davon ausgegangen, dass eine Komponente so lange wie möglich betrieben wird und bei einem Ausfall durch eine neue statistisch identische Komponente in einer vernachlässigbaren Zeit ersetzt wird (SCHNEEWEISS 1992). Mit Hilfe der Erneuerungstheorie werden überwiegend einzelne technische Komponenten beschrieben.

Neben den hier beschriebenen Verfahren existiert noch eine Vielzahl weiterer Methoden und Verfahren zur Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse, die teilweise auf diese Methoden aufbauen, versuchen diese zu kombinieren oder auf völlig anderen Theorien basieren.

## 4.5 Zuverlässigkeits- und Sicherheitskonzepte von IT-Systemen

Im Bereich der Informationstechnik zeichnet sich in den letzten Jahren eine stetige Zunahme der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbetrachtungen ab. Die Informationstechnik (IT) als das Fachgebiet, das sich mit der Speicherung, Verarbeitung und Übertragung von Daten und Informationen befasst (OPPLIGER 1997), wird dabei von zwei grundlegenden Tendenzen beeinflusst:

- Über der stetigen Zunahme der Aufgaben, die von Computern gelöst werden, wächst die Abhängigkeit von IT-Systemen.
- Mit dem Übergang von *host-dominierten Großsystemen* zu vernetzten und verteilten *Client-Server-Systemen* findet derzeit ein durchgreifender Wandel in der IT-Landschaft statt.

Durch den verstärkten Einsatz und der damit verbundenen wachsenden Abhängigkeit von IT-Systemen müssen Maßnahmen ergriffen werden, die eine hohe Verfügbarkeit der informationsverarbeitenden Systeme gewährleisten. Die Notwendigkeit kann aus einer in den USA durchgeführten Untersuchung abgeleitet werden (s. SCHAMBERGER 1992). Demnach wären Unternehmen in der Versicherungsbranche bei einem Totalausfall der IT-Systeme nach 6 Tagen und Banken nach 2 Tagen zur Geschäftsaufgabe gezwungen. Neben der Verfügbarkeit ist die Sicherheit von IT-Systemen zu betrachten. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass mit der zunehmenden Verteilung und Vernetzung der IT-Systeme es nicht mehr ausreichend ist, die Sicherheit der einzelnen Verarbeitungssysteme zu gewährleisten. Vielmehr muss die Sicherheit aller beteiligten Verarbeitungs- und Übertragungssysteme aufeinander abgestimmt werden (WOJCICKI 1991). In diesem Zusammenhang ist auch zu bedenken, dass mit der Überführung der analogen Daten in digitale Datenbestände eine Vielzahl von vertraulichen Daten in den IT-Systemen vorliegen, bei denen die Zugriffsrechte im Sinne des Datenschutzes gewährleistet sein müssen. Dabei stellen insbesondere die im Internet angebotenen Dienste wie Online-Banking und Internet-Shopping besondere Anforderungen an eine sichere Übertragung von vertraulichen Daten.

Im Bereich der Informationstechnik kommt der Informationssicherheit folglich eine zentrale Bedeutung zu. Nach der vom BSI<sup>1</sup> geprägten Begriffsbildung ist ein IT-System dann als sicheres System zu bezeichnen, wenn die aus dem Mangel an Verfügbarkeit sowie der Verletzung von Integrität und

---

<sup>1</sup> Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik

Vertraulichkeit hervorgehenden Risiken auf ein für die Institution tragbares Maß reduziert sind (vgl. VOBBEIN 1995). Ein sicheres IT-System ist demnach gekennzeichnet durch eine geringe Ausfallrate von Systemkomponenten, welche die Funktionalität des IT-Systems derartig stören, dass die

- **Verfügbarkeit**,
- **Integrität** und
- **Vertraulichkeit**

der enthaltenen Daten und Informationen wesentlich beeinträchtigt ist (PELESKA 1992). Die Ausfallsicherheit ist durch den Einsatz von zuverlässiger Hard- und Software zu gewährleisten. Verschiedene Methoden zur Erzeugung von zuverlässiger Hard- und Software sind in Tabelle 4-2 zusammengestellt.

Tabelle 4-2: *Methoden zur Erzeugung von zuverlässiger Hard- und Software (nach PELESKA 1992)*

<b>Hardware</b>	<b>Software</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fehlervermeidung durch besondere Produktionsqualität</li> <li>– Fehlervermeidung durch Korrekturmechanismen</li> <li>– Fehlertolerierung durch Ausnutzung von Hardware-Redundanz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– „erschöpfendes“ Testen</li> <li>– Software-Diversitäten</li> <li>– Software-Entwicklung mit Hilfe formaler Methoden</li> </ul>

Gemäß den in BSI (1999) formulierten IT-Sicherheitskriterien werden die drei korrespondierenden Grundbedrohungen für IT-Systeme gesehen:

- die unbefugte Beeinträchtigung der Funktionalität (Verlust der **Verfügbarkeit**)
- das unbefugte Verändern von Daten und Informationen (Verlust der **Integrität**)
- den unbefugten Informationsgewinn (Verlust der **Vertraulichkeit**).

Um die Sicherheit zu wahren dürfen Eingriffe ins System nur dann erfolgen, wenn die ausführende Person dazu berechtigt ist. Abhängig davon, ob ein Eingriff beabsichtigt oder unbeabsichtigt erfolgt, wird hierbei zwischen „safety“ und „security“ unterschieden.

- Sicherheit im Sinne von „**safety**“ bezieht sich auf die Ablauf- und Ausfallsicherheit eines Systems. Dazu sind Maßnahmen zu ergreifen, die einen Datenverlust durch unbeabsichtigte Eingriffe infolge einer Fehlbedienung durch den Benutzer oder einer Katastrophe (Datenverlust durch höhere Gewalt) verhindern.
- Sicherheit im Sinne von „**security**“ bezieht sich auf den Schutz eines Systems vor beabsichtigten Angriffen. Hierunter fallen insbesondere Maßnahmen, die einen Datenmissbrauch durch unbefugte Personen abwenden.

Aufgrund der zentralen Bedeutung von Vertraulichkeit, Verfügbarkeit und Integrität für die IT-Sicherheit soll zum Abschluss dieses Unterkapitels eine vertiefende Betrachtung der Bedeutung und Verwendung dieser Begriffe erfolgen.

Unter der **Vertraulichkeit** wird der Schutz vor einem unberechtigten Zugriff auf Daten und Informationen verstanden (s. u.a. HEINRICH 1996). Dieses Merkmal richtet sich dabei weniger an die Qualität

einer einzelnen Information, sondern beschreibt vielmehr die angewandten Mechanismen und Konzepte eines IT-Systems, um einem unberechtigten Zugriff auf die enthaltenen Daten und Informationen entgegenzuwirken. Da eine Verletzung der Vertraulichkeit kaum korrigierbar ist, sind vor allem präventive Maßnahmen zur Erhaltung der Vertraulichkeit notwendig (PETZEL 1996).

Die **Verfügbarkeit** bildet das Merkmal, das die Zuverlässigkeit des IT-Systems beschreibt. Nach HEINRICH (1996) ist die Verfügbarkeit gewahrt, wenn sich das System in einem Zustand befindet, in dem keine Beeinträchtigung der Funktionalität vorliegt. Bezogen auf die im System enthaltenen Informationen setzt dies voraus, dass dem Benutzer die geforderten Informationen zur Verfügung stehen. Nach PETZEL (1996) sind neben dem Wissen über die Existenz der Information Angaben zum Ort, dem Zeitpunkt und der Zeitdauer der Verfügbarkeit der Information notwendig.

Mit der **Integrität** wird die Makellosigkeit der Information beschrieben. Im Bereich des Informationsmanagements wird darunter der Schutz vor beabsichtigten Störungen verstanden. Zur Wahrung der Integrität müssen Präventivmaßnahmen im IT-System angewandt werden, die insbesondere eine korrekte Verarbeitung und Übertragung der Informationen gewährleisten (s. u.a. HEINRICH 1996, PETZEL 1996). Analog zur Vertraulichkeit und Verfügbarkeit ist die Integrität weniger als ein Merkmal für eine einzelne Information, sondern vielmehr als eine Eigenschaft zu sehen, die sich auf das informationsverarbeitende System im Gesamten bezieht. Auf Daten und Informationen bezogen ist die Integrität gekennzeichnet durch die **Unverfälschtheit**, die **Vollständigkeit** und die **Korrektheit** der Daten und Informationen. Weitere Qualitätsmerkmale, die direkt der Information zuzuordnen sind, bilden die Originalität, die Verbindlichkeit und die Authentizität.

## 4.6 Qualitätsmodelle für Geodaten

Im Gegensatz zu den angewandten Qualitätskonzepten und den dazugehörigen Qualitätsbegriffen bei den IT-Systemen (vgl. Kap 4.5), die primär die Gestaltung des Informationssystems betreffen und darin Anforderungen an die Methoden zur Speicherung, Verarbeitung und Übertragung von Informationen stellen, sind im Bereich der Geodaten und Geoinformationssysteme in letzter Zeit verschiedene Qualitätsmodelle aufgestellt worden, die eine Beschreibung der Qualität der im Geodatenbestand enthaltenen Daten verfolgen. Die von nationalen und internationalen Organisationen (CEN<sup>1</sup>, ICA<sup>2</sup>, NDCDCS<sup>3</sup>, ACSM<sup>4</sup>, ISO<sup>5</sup>) und Autoren (u.a. Arronoff, Burrough, Caspary, Joos, Stanek) publizierten Qualitätsmodelle haben vornehmlich das Ziel, den Datenproduzenten und den Nutzer bei der Festlegung und Beschreibung der Qualität von Geodaten zu unterstützen. Die durch die Organisationen und Autoren verwendete Terminologie ist jedoch nicht eindeutig (CASPARY & JOOS 1998) und die charakteristischen Qualitätsmerkmale überschneiden sich teilweise.

---

<sup>1</sup> Comité Européen de Normalisation

<sup>2</sup> International Cartographic Association

<sup>3</sup> National Committee on Digital Cartographic Data Standards

<sup>4</sup> American Congress of Surveying and Mapping

<sup>5</sup> International Standards Organisation

Eine der ersten kompletten Abhandlungen zur Qualität von raumbezogenen Daten wurde 1988 als Teil des Antrags für einen Standard zur Übertragung von raumbezogenen Daten (SDTS<sup>1</sup>) veröffentlicht. Dieser Vorschlag wurde später durch das amerikanische Institut für Standardisierung und Technologie (NIST<sup>2</sup>) als der Federal Information Processing Standard FIPS 173 angenommen (GUPTILL & MORRISON 1995). Für den europäischen Raum wurde im April 1999 vom Technischen Komitee CEN/TC 287 „Geoinformation“ die DIN ENV 12656 (1999) verabschiedet. Diese europäische Vornorm beinhaltet schwerpunktmäßig die Beschreibung der Qualität von Geoinformationen.

Das in FIPS 173 (s. GUPTILL & MORRISON 1995) vorgestellte Qualitätsmodell unterscheidet die Qualitätsmerkmale:

- **Herkunft**
- **logische Konsistenz**
- **Positionsgenauigkeit**
- **Vollständigkeit**
- **Attributierungsgenauigkeit**

Neben diesen fünf Qualitätsmerkmalen wurden durch das ICA zwei weitere formuliert:

- **semantische Genauigkeit**
- **zeitliche Information**

CASPARY (1993) führt neben den fünf Qualitätsmerkmalen der FIPS 173 die

- **Aktualität**

als ein weiteres Qualitätsmerkmal auf und bezeichnet diese sechs Merkmale als das Minimum der anzusprechenden Qualitätsmerkmale, wobei die Aktualität auch als Ergänzung zu jedem anderen Merkmal hinzugenommen werden kann. Auf die Bedeutung der Aktualität für die Bewertung der Qualität von Geodaten wird u.a. bereits in MÖHLENBRINK (1989) hingewiesen.

Innerhalb des Qualitätsmodells in der DIN ENV 12656 (1999) sind die Qualitätselemente Herkunft, Verwendung, Homogenität und Qualitätsparameter definiert. In der Norm wird darauf verwiesen, dass mindestens eines dieser Qualitätselemente für die Qualitätsbeschreibung gegeben sein muss. Bei einer Qualitätsbeschreibung über die Qualitätsparameter können u.a. folgende Parameter verwendet werden:

- **Positionsgenauigkeit**
- **Vollständigkeit**
- **semantische Genauigkeit**
- **logische Konsistenz**
- **zeitliche Genauigkeit**

In diesem Kontext sind die Begriffe Qualitätsparameter und Qualitätsmerkmal gleichzusetzen.

Eine etwas andere Aufstellung von Qualitätsmerkmalen findet sich in dem von Joos und Caspary formulierten und in Abbildung 4-7 dargestellten Qualitätsmodell (CASPARY & JOOS 1996, JOOS 1996, JOOS 2000). Darin werden die vier Qualitätsmerkmale

- **Vollständigkeit**
- **Konsistenz**
- **Richtigkeit**
- **Genauigkeit**

<sup>1</sup> Spatial Data Transfer Standard

<sup>2</sup> National Institute of Standards and Technologie

definiert. Hinweise zur **Aktualität** (Fortführungsstatus) und **Verfügbarkeit** (Übergabemodalitäten) sind in den Metadaten enthalten.

Alle genannten Qualitätsmerkmale stehen in einem engen Zusammenhang zu der in der Geoinformatik typischen Modellierung der realen Welt. Aus diesem Grund sollen vor einer detaillierten Betrachtung der genutzten Qualitätsmerkmale die dabei angewandten Modellierungsschritte dargestellt werden.

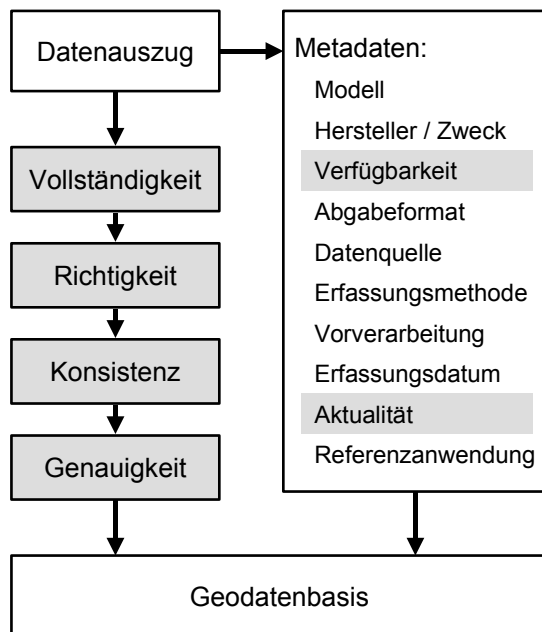


Abbildung 4-7: Qualitätsmodell nach CASPARY & JOOS (1996)

### Modellierung der realen Welt

Die Modellierung der realen Welt ist Voraussetzung einer rechnergestützten Repräsentation von Phänomenen der realen Welt in Form von Daten. In Abbildung 4-8 sind die dabei angewandten Modellierungsschritte im Einzelnen aufgeführt (s. u.a BARTELME 1995, BILL 1999).

In der *konzeptionellen Modellierung*, die in DIN ENV 12656 (1999) auch als konzeptuelle Modellierung bezeichnet wird, erfolgt die Festlegung, welche Objekte der realen Welt für eine Erfassung relevant sind. Der dazu notwendige Abstraktionsvorgang liefert im Ergebnis ein abstraktes Abbild der realen Welt und ist in erster Linie abhängig von der fachspezifischen Sicht der zugrunde gelegten Anwendung.

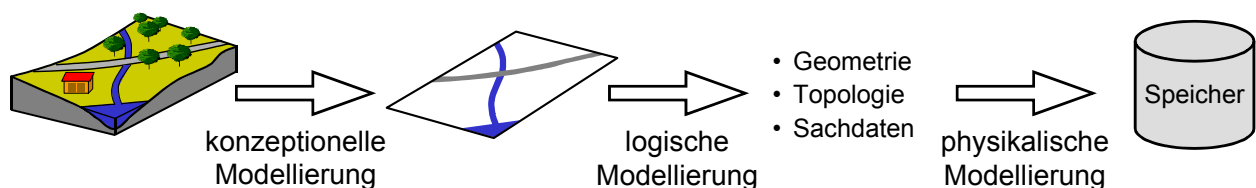


Abbildung 4-8: Modellierungsschritte in einem Geoinformationssystem (nach JOOS 2000)



Die *logische Modellierung* umfasst die Festlegung über welche geometrischen Grundprimitive und topologischen Verknüpfungen die Objekte repräsentiert werden und in welcher Form die Sachdaten und Relationen in Beziehung zu den Objekten stehen. Hier erfolgt z.B. die Festlegung über welche Arten von Linienelementen (Gerade, Kreis, Klothoide, Spline usw.) das Objekt „Straße“ aufgebaut wird, oder welche Objekte Bestandteil eines komplexen Objekts sind und wie deren logische Verknüpfungen aussehen. Ein Beispiel hierfür ist in dem Standard für digitale Straßenkarten zu finden (ISO/TR 14825: 2000). Die logische Modellierung sollte dabei möglichst unabhängig von dem später genutzten Informationssystem sein. Mit der Orientierung an einem hierarchischen, relationalen oder objektrelationalen Ansatz ist eine gewisse Festlegung auf ein bestimmtes Datenbankschema oder Geoinformationssystem jedoch teilweise unumgänglich.

Der letzte Modellierungsschritt umfasst die *physikalische Modellierung*. Hier erfolgt die Zuordnung der genutzten Speichermedien und Speicherplätze für die Daten. Die physikalische Modellierung ist maßgeblich verantwortlich für das Zugriffsverhalten und somit für die Performance des Geoinformationssystems.

### Qualitätsmerkmale für Geodaten

Im weiteren Verlauf wird auf die qualitätsbeschreibenden Merkmale der verschiedenen vorhandenen Qualitätsmodelle zu Geodatenbeständen etwas detaillierter eingegangen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass innerhalb der DIN ENV 12656 (1999) die Qualitätsmerkmale als Qualitätsparameter bezeichnet werden. In Abbildung 4-9 sind die unterschiedlichen Qualitätsmerkmale bzw. -parameter der genannten Qualitätsmodelle für Geodaten zusammenfassend dargestellt.

Qualitätsmerkmale in FIPS/ICA	Qualitätsparameter in DIN ENV 12656	Qualitätsmerkmale in Joos & Caspary
Positionsgenauigkeit Attributierungsgenauigkeit semantische Genauigkeit	Positionsgenauigkeit semantische Genauigkeit	Genauigkeit
logische Konsistenz	logische Konsistenz	Konsistenz
Vollständigkeit	Vollständigkeit	Vollständigkeit
zeitliche Information	zeitliche Genauigkeit	Aktualität Erfassungsdatum <sup>2</sup>
Herkunft	Herkunft <sup>1</sup>	Hersteller/Zweck Datenquelle <sup>2</sup>
		Richtigkeit

<sup>1</sup> bildet im Qualitätsmodell ein Qualitätselement und keinen Qualitätsparameter

<sup>2</sup> bilden keine Qualitätsmerkmale, sondern stellen weitere Informationen zur Datenqualität dar, die in den Metadaten enthalten sind

Abbildung 4-9: Gegenüberstellung der verwendeten Qualitätsmerkmale bzw. -parameter in verschiedenen Qualitätsmodellen für Geodaten

**Herkunft:** Mit der **Herkunft** werden die verwendeten Erfassungs- und Fortführungsquellen, Informationen über Kontrollen und Korrekturen sowie die angewandten Transformationen beschrieben (GUPTILL & MORRISON 1995). Dies muss für alle Bearbeitungsschritte vom Quellmaterial bis zur endgültigen Information erfolgen. Die Datenherkunft liefert durch die Darstellung des Herstellungsprozesses eine sehr allgemeine Beschreibung der Qualität (WILKE 1995), die jedoch für die Entscheidung, ob ein Datenbestand grundsätzlich für eine Anwendung geeignet ist, sehr hilfreich sein kann. CLARKE & CLARK (1995) definieren die Herkunft als die Historie des Datensatzes und verbinden damit die Möglichkeit der Nachvollziehbarkeit des gesamten Lebenszyklus des Datensatzes. In den beiden anderen Qualitätsmodellen wird die Herkunft nicht explizit als Qualitätsmerkmal angeführt.

**Genauigkeit:** Die **Positionsgenauigkeit** ist definiert als der Zusammenhang zwischen beobachtetem und wahren Wert (GUPTILL & MORRISON 1995). Die **semantische Genauigkeit** beschreibt die Qualität, mit der die Objekte mit dem gewählten Modell übereinstimmen. Sie betrachtet dabei weniger die geometrische Repräsentation des Objekts als vielmehr die Angemessenheit der Bedeutung (GUPTILL & MORRISON 1995). Zudem ist zu berücksichtigen, dass sich nach der Auslegung der FIPS 173 die semantische Genauigkeit ausschließlich auf Objekte bezieht. Innerhalb der DIN ENV 12656 (1999) ist die semantische Genauigkeit hingegen auf Objekte und Attribute anwendbar. Bei dem Qualitätsmodell von JOOS und CASPARY wird unter der **Genauigkeit** sowohl die Positionsgenauigkeit als auch die Attributierungsgenauigkeit verstanden (vgl. JOOS 2000). Die Zielvorgabe für die Genauigkeit ist erreicht, wenn die Standardabweichung als Maß der äußeren Genauigkeit aller quantitativen Werte unter dem vorgegebenen Maximalwert liegt.

**Konsistenz:** Die **logische Konsistenz** ist nach FIPS 173 ein Primärqualitätsmerkmal, das Aufschluss über die strukturelle Integrität eines gegebenen Datensatzes gibt. In KAINZ (1995) wird die logische Konsistenz als Qualitätsmerkmal gesehen, das sich auf die logischen Regeln der Datenstruktur und Attributierungsrichtlinien für die Geodaten bezieht und somit die Kompatibilität der Daten zu anderen Daten im Datenbestand beschreibt. Nach JOOS (2000) ist die **Konsistenz** erreicht, wenn alle Objekte der Geodatenbasis den Regeln des Daten- und Informationsmodells entsprechen. Innerhalb der DIN ENV 12656 (1999) wird ebenso auf die spezifikationsstreu Darstellung der Geodaten verwiesen und darin die **geometrische, topologische** und **semantische Konsistenz** sowie die **Konsistenz des Formats** und die Gültigkeit bzw. der Gültigkeitsbereich des Attributwerts unterschieden.

**Vollständigkeit:** Ebenso wie die logische Konsistenz bildet die **Vollständigkeit** laut der FIPS 173 ein Primärqualitätsmerkmal (GUPTILL & MORRISON 1995). Sie beschreibt den Grad der Übereinstimmung zwischen den enthaltenen Geodaten und der realen Welt bzw. dem abstrakten Modell der realen Welt in Bezug auf das Vorhandensein des Objekts, den Relationen zwischen den Objekten und der tatsächlichen Bedeutung des Objekts. Für JOOS (2000) ist die Vollständigkeit dann erreicht, wenn jedem abstrakten Objekt genau ein digitales Objekt mit allen dazugehörigen Attributen zugeordnet ist.

**Zeitabhängige Merkmale:** Mit der **zeitlichen Information** werden die zeitabhängigen Eigenschaften der Daten beschrieben. Innerhalb der FIPS 173 (s. GUPTILL & MORRISON 1995) werden drei Typen von zeitlichen Eigenschaften unterschieden:

- Zeitpunkt, wann eine Änderung tatsächlich eingetreten ist
- Zeitpunkt, wann das Ereignis der Änderung beobachtet wurde
- Zeitpunkt, wann die Änderung in den Datenbestand aufgenommen wurde.

Der in der DIN ENV 12656 (1999) enthaltene Qualitätsparameter **zeitliche Genauigkeit** enthält ebenso den zeitlichen Aspekt der Geodaten und wird durch die letzte Fortführung, den Fortführungsturnus, die zeitliche Gültigkeit etc. beschrieben.

Über die zeitliche Information sind Hinweise zur Aktualität gegeben. JOOS (2000) sieht die Aktualität nicht als ein Qualitätsmerkmal, da Geodaten per se nicht aktuell sind. Sie können immer nur die Aktualität von der Herkunft der Daten erreichen und sind somit von den Metadaten ableitbar. Ebenso verhält es sich mit der Verfügbarkeit, die sich aus den Übergabemodalitäten der Geodaten ergibt. Die Angaben zur Aktualität und Verfügbarkeit sind neben weiteren allgemeinen Informationen zum Datenbestand in den Metadaten aufzuführen (vgl. Abbildung 4-7).

**Richtigkeit:** Die **Richtigkeit** gibt an, dass jede Objektklasse eines Objekts der Datenbasis genau der abstrakten Objektklasse entspricht, zu der das abstrakte Objekt gehört (JOOS 2000). In den beiden anderen behandelten Qualitätsmodellen ist kein analoges Qualitätsmerkmal dazu enthalten (vgl. Abbildung 4-9).

Die Betrachtungen in diesem Kapitel zeigen, dass in den verschiedenen Fachbereichen eine Vielzahl von Qualitätskonzepten existiert. Des Weiteren ist festzuhalten, dass die genutzten Qualitätsbegriffe sowie die schwerpunktmäßig betrachteten Qualitätsmerkmale sehr stark variieren und dabei stets eine Anpassung auf die konkret vorliegende Problemstellung aufweisen. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass keines der betrachteten Qualitätskonzepte mit seinen Qualitätsmerkmalen geeignet ist für eine einheitliche Beschreibung und Bewertung der Qualität der Informationen in Fahrerassistenzsystemen. Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel ein entsprechendes Qualitätskonzept für Informationen aufgestellt.

## **5 Ein Konzept zur Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität informationsverarbeitender Systeme**

Aus den in Kapitel 4 erläuterten Gründen wird zur Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität in Fahrerassistenzsystemen ein eigenes Qualitätskonzept für Informationen entwickelt. Den Schwerpunkt dieses Kapitels – sowie der ganzen Arbeit – bildet die Aufstellung dieses Qualitätskonzepts. Vor einer ausführlichen Erläuterung des darin enthaltenen Qualitätsmodells (Kapitel 5.3) und Analyseverfahrens (Kapitel 5.4) wird in Kapitel 5.1 eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse und Folgerungen aus den Kapiteln 3 und 4 gegeben und damit in die Thematik eingeführt.

### **5.1 Problemstellung**

Die Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugtechnik und Verkehrstelematik zeigen einen verstärkten Einsatz von Fahrerassistenzsystemen, die neben einem gesteigerten Komfort und einer einfacheren Handhabung des Kraftfahrzeugs insbesondere auf eine Verbesserung der Verkehrssicherheit abzielen (Kapitel 3.4). Um den wachsenden Ansprüchen zukünftiger Fahrerassistenzsysteme gerecht zu werden, ist eine Erweiterung der Funktionalität notwendig. Dies ist verbunden mit einer zunehmenden Komplexität und einem erhöhten Informationsbedarf der Systeme. So ist bei den meisten Systemen eine umfassende Umfeld- und Situationserkennung notwendig, die nur durch eine Vielzahl von Informationen erreicht werden kann. Andererseits sind in den heutigen Fahrzeugen bereits verschiedene Systeme vorhanden, die Informationen zum Fahrzeugzustand und der Fahrzeugumgebung liefern. Unter der berechtigten Annahme, dass in Zukunft verstärkt die an Bord befindlichen Systeme als Informations- und Datenquellen für neue Fahrerassistenzsysteme genutzt werden, muss von einer zunehmenden Vernetzung der Systeme ausgegangen werden. Außer diesen im Fahrzeug befindlichen Informationsquellen sind die Informationslieferanten, die in der Infrastruktur angesiedelt sind (z.B. Telematikdienste, Hersteller digitaler Straßenkarten), zu berücksichtigen.

In WILTSCHKO (2001) ist eine systematische Einteilung der möglichen Informations- und Datenquellen für Fahrerassistenzsysteme gegeben. Hiernach werden Fahrzeugsensoren, Fahrzeugsysteme, Informationsdienste und Informationssysteme unterschieden (s. Abbildung 5-1). In engem Zusammenhang zu der Datenherkunft können Daten und Informationen wie folgt gegliedert werden:

- Daten und Informationen, die unmittelbar aus Sensoren gewonnen werden, wobei die Sensoren sowohl im Fahrzeug (z.B. GPS, Kreisel, Radar) als auch in der Infrastruktur (z.B. Induktionsschleife) platziert sein können
- Daten und Informationen, die von anderen im Fahrzeug befindlichen Systemen (z.B. Navigationssystem) oder von einem infrastrukturgestützten System (z.B. Stauwarner) eingehen
- Daten und Informationen, die aus umfangreichen (Geo-)Datenbeständen (z.B. digitale Straßenkarte) entnommen werden.

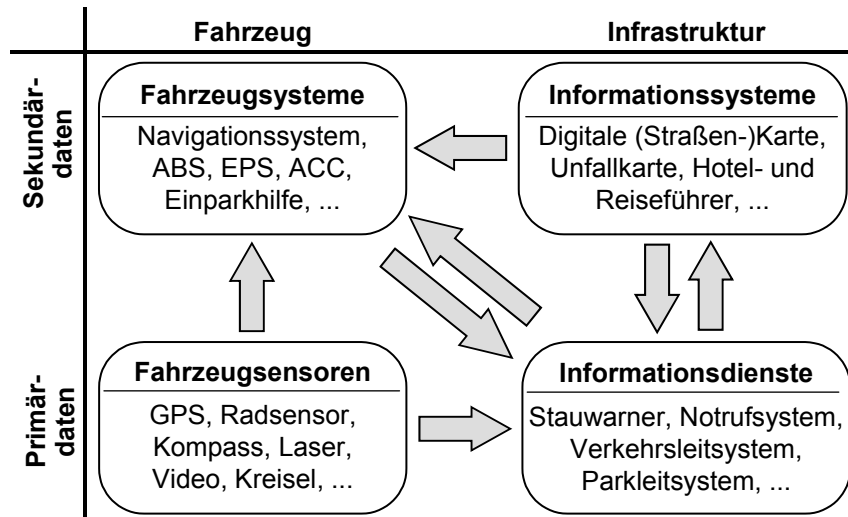


Abbildung 5-1: Informations- und Datenquellen für Fahrerassistenzsysteme

Bei der Beschreibung der Informationsqualität von Fahrerassistenzsystemen ergibt sich die Problematik, dass die genutzten und erfassten Daten und Informationen in ihrer Herkunft und ihrem Typ sehr stark variieren und damit eine einheitliche und geschlossene Qualitätsbetrachtung erschweren. Andererseits werden die Fahrerassistenzsysteme in zunehmendem Maße einen direkten bzw. indirekten Einfluss auf den Fahrprozess haben. Dem damit verbundenen Gefährdungspotenzial, das von einem derartigen System ausgeht, muss durch entsprechende Sicherheitsmaßnahmen begegnet werden (vgl. Kapitel 4.5), da nur ein Fahrerassistenzsystem, das die gestellten Sicherheitsanforderungen erfüllt, betrieben werden kann bzw. darf. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die Sicherheitsanforderungen auf die eingehenden, verarbeiteten und ausgehenden Daten und Informationen übertragen: Es sind Daten und Informationen notwendig, die über die gesamte Verwendungsdauer eine Qualität aufweisen, die einen gefahrlosen Betrieb des Fahrerassistenzsystems gewährleisten. Grundvoraussetzung hierfür ist neben einer Fehlervermeidung insbesondere die Fehlererkennung und Fehlerbeherrschung. Auf diesen Aspekt wird in Kapitel 5.5 ausführlich eingegangen.

Eine Betrachtung der verschiedenen in Kapitel 4 behandelten Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmodelle für sicherheitsrelevante Systeme zeigt, dass keines dieser Modelle eine einheitliche und geschlossene Qualitätsbetrachtung aller in einem Fahrerassistenzsystem auftretenden Daten und Informationen gestattet, weshalb im Folgenden ein Qualitätskonzept zur Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität innerhalb eines Fahrerassistenzsystems aufgestellt wird. Dieses Qualitätskonzept für Informationen soll dabei folgenden Anforderungen genügen:

- Das Qualitätskonzept muss auf alle möglichen auftretbaren Typen von Eingangsdaten anwendbar sein. Die zu formulierenden Qualitätsmerkmale müssen deshalb für alle Daten- und Informationstypen gleichermaßen geeignet sein.
- Die Beschreibung der Informationsqualität darf sich nicht nur auf die Eingangsdaten beschränken. Es müssen sämtliche im Informationsverarbeitungsprozess auftretenden Informationen mit diesen Qualitätsmerkmalen beschrieben werden.

- Das Qualitätskonzept muss bereits in der Entwurfsphase eines Systems anwendbar sein. Über eine objektive Beschreibung der Informationsqualität soll insbesondere eine Vergleichbarkeit von Systementwürfen hinsichtlich der Informationsqualität gewährleistet sein.
- Das Qualitätskonzept soll sich weitgehend an vorhandenen Qualitäts- und Zuverlässigkeitskonzepten verwandter Fachbereiche und -disziplinen orientieren und dadurch die interdisziplinäre Anwendbarkeit sichern.

Im Rahmen dieser Arbeit wird hierfür ein **Qualitätskonzept für Informationen** aufgestellt, das sich in die zwei Teile **Qualitätsmodell** und **Analyseverfahren** gliedert (vgl. Abbildung 5-2). Das in Kapitel 5.3 formulierte Qualitätsmodell dient als Grundlage der Qualitätsbetrachtung und beinhaltet entsprechende **Qualitätsmerkmale** (Kapitel 5.3.1) und **Qualitätsparameter** (Kapitel 5.3.2) zur Beschreibung und Bewertung der Qualität von Daten und Informationen.

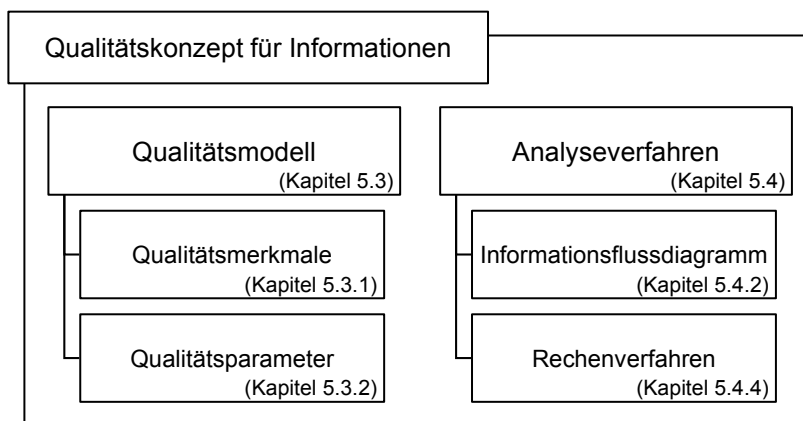


Abbildung 5-2: Struktur des Qualitätskonzepts für Informationen

Der zweite Teil des Qualitätskonzepts besteht aus einem **Analyseverfahren** (s. Kapitel 5.4), das auf dem in Kapitel 5.3 aufgestellten Qualitätsmodell basiert und eine Bewertung der Informationsqualität innerhalb von informationsverarbeitenden Systemen und Prozessen gestattet. Neben dem **Informationsflussdiagramm** (Kapitel 5.4.2) als graphische Darstellung des Informationsflusses innerhalb informationsverarbeitenden Systemen besteht das Analyseverfahren aus einem **Rechenverfahren** (Kapitel 5.4.4) zur Auswertung des Informationsflussdiagramms.

## 5.2 Daten und Informationen

Vor der Aufstellung des Qualitätsmodells soll in einer kurzen Betrachtung auf die beiden Begriffe „Daten“ und „Informationen“ eingegangen werden. Bei dem Versuch einer korrekten und konsequenten begrifflichen Trennung von Daten und Informationen zeigt sich, dass verschiedene Definitionen vorliegen, die eine eindeutige Abgrenzung ermöglichen. So wird in der Informatik oftmals eine auf WITTMANN (1959) zurückgehende Definition angewandt, die **Information** als „zweckbezogenes Wissen“ bezeichnet, das man beim Handeln im Hinblick auf gesetzte Ziele benötigt (vgl. u.a. HEINRICH 1996, FANK 1996, BILL 1999). **Daten** werden in diesem Kontext als

Beschreibung bestimmter Sachverhalte oder Phänomene gesehen. Dabei wird gefordert, dass die Daten eine Objektivität und Neutralität aufweisen, die dem Bestreben einer vielseitigen Verwendung der erfassten Daten nachkommt. Nach PETZEL (1996) sind Daten auf den Entstehungszusammenhang und Informationen auf ihren Verwendungszweck zu beziehen. Informationen sind danach als verarbeitete Daten zu sehen, die zur Problemlösung herangezogen werden (Abbildung 5-3). In der DIN EN ISO 9000 (2000) wird die Information kurzum definiert als „Daten mit Bedeutung“. Dieser Definition liegt die Sichtweise zugrunde, dass Daten die alphanumerische und Signale die physikalische Repräsentation von Informationen darstellen (vgl. u.a. OBERLIESEN 1982 und PETZEL 1996). Information bildet demnach ein Abstraktum, das in Form von Daten dargestellt wird (ECKERT 2001).

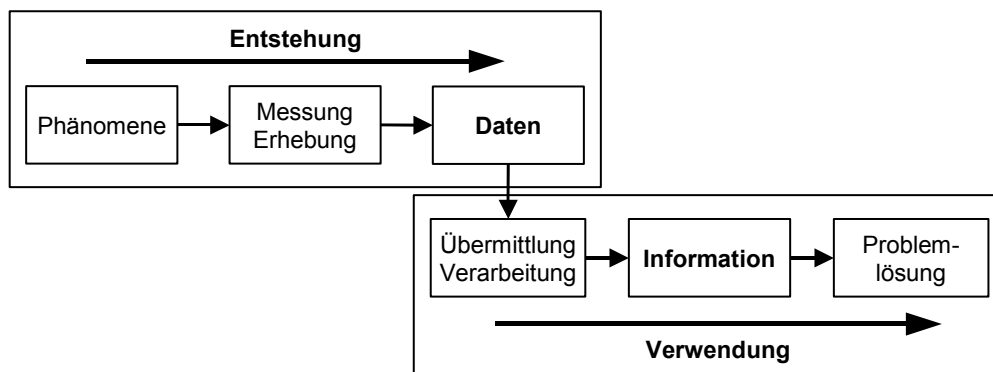


Abbildung 5-3: *Daten und Informationen (nach PETZEL 1996)*

Beim Aufbau eines (Geo-)Datenbestands für eine konkrete Anwendung bildet in aller Regel der Informationsbedarf und damit die Information zur Beschreibung der vorliegenden Problemstellung den Ausgangspunkt der Betrachtung. Über den Informationsbedarf ergeben sich die Anforderungen hinsichtlich Struktur und Inhalt der Informationen. Zur Befriedigung des Informationsbedarfs werden Daten benötigt. Diese können durch Messung oder Übernahme von Daten aus anderen Datenbeständen gewonnen werden. Die Daten müssen dabei eine Struktur aufweisen, dass sich das zu behandelnde Phänomen der Anwendung durch das gewählte Modell der realen Welt hinreichend beschreiben lässt. Die dafür notwendigen Modellierungsschritte sind in Kapitel 4.6 auf S. 68 dargestellt.

Die scheinbar klare Abgrenzung der beiden Begriffe erweist sich in der Praxis jedoch als schwer umsetzbar. Dies zeigt sich bereits daran, dass die Begriffe sehr häufig synonym verwendet und zur gegenseitigen Erklärung herangezogen werden. Die Schwierigkeit einer eindeutigen Unterscheidung liegt begründet in der Abhängigkeit der gewählten Einordnung in den Verarbeitungsprozess. So stellen bei einem Flottenmanagementsystem die aus GPS-Signalen ermittelten Koordinaten eine Information dar, da sie dem Zweck dienen der Zentrale die aktuelle Position des Fahrzeugs mitzuteilen. Bei einem Navigationssystem hingegen liefert der GPS-Empfänger Daten, die neben anderen Daten in den Verarbeitungsprozess zur Bestimmung der Fahrzeugposition einfließen (vgl. SCHLOTT 1997). Wird beim Flottenmanagementsystem die Fahrzeugposition zur Tourenplanung genutzt, so ist auch in diesem Fall die Fahrzeugposition den Daten zuzuordnen.

Aufgrund der angedeuteten Problematik werden im Rahmen dieser Arbeit die Begriffe Daten und Informationen synonym verwendet. Entscheidend für das im Folgenden zu behandelnde Qualitätskonzept für Informationen ist, dass das aufgestellte Qualitätsmodell mit den enthaltenen Qualitätsmerkmalen und -parametern und das Analyseverfahren auf Daten und Informationen gleichermaßen angewandt werden kann.

### 5.3 Qualitätsmodell für Informationen

Der erste Schritt in der Aufstellung eines Konzepts zur Beschreibung der Informationsqualität von informationsverarbeitenden Systemen liegt in der Festlegung eines geeigneten Qualitätsmodells. Ausgangspunkt hierfür bilden die grundlegenden Normen zur Qualität und Zuverlässigkeit (s. Kapitel 4.1). Im Rahmen dieser Arbeit sind hierbei insbesondere die beiden europäischen Normen DIN EN ISO 8402 (1995) und DIN EN ISO 9000 (2000) zu nennen. Nach diesen Normen ist die Qualität definiert „als die Gesamtheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen“ bzw. „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“. Beide Definitionen bieten aufgrund der sehr allgemein gehaltenen Formulierung zwar ein breites Anwendungsspektrum, leiden dadurch jedoch unter einer geringen Aussagekraft. Um nun in der Praxis die Qualität einer Einheit betrachten zu können, ist eine geeignete Anpassung auf die jeweilige Anwendung vorzunehmen. Dabei sind generell folgende – anwendungsunabhängig wirkende - Kernaussagen der oben aufgeführten Normen zu beachten:

- Die Qualität kann sich immer nur auf eine bestimmte Einheit beziehen. Diese wird vielfach auch als Betrachtungseinheit bezeichnet.
- Die Qualität ist durch eine begrenzte Anzahl von Merkmalen zu beschreiben.
- Die Betrachtung der Qualität kann immer nur unter vorgegebenen Anwendungsbedingungen erfolgen.

Übertragen auf ein **Qualitätsmodell für Informationen** bedeutet dies, dass die innerhalb von informationsverarbeitenden Systemen auftretenden Daten und **Informationen** die zu betrachtende Einheit bilden. Die Qualität der betrachteten Information wird durch einen festgelegten Satz von **Qualitätsmerkmalen** beschrieben. Entscheidend für die praktische Anwendung ist hierbei, dass grundsätzlich derselbe Satz von Qualitätsmerkmalen zur Qualitätsbeschreibung einer Information herangezogen wird. Nur so ist eine objektive Qualitätsbeschreibung möglich.

Über die **Qualitätsparameter**, die innerhalb der DIN 40041(1990) auch als Einzelforderung bezeichnet werden, erfolgt eine Konkretisierung der Qualitätsmerkmale. Dabei können mehrere Qualitätsparameter für ein Qualitätsmerkmal herangezogen werden. Daneben werden die Qualitätsparameter genutzt, um über sie die Forderungen an die Qualität der Information zu formulieren. Hierzu können sowohl quantitative als auch qualitative Forderungen gestellt werden. Welche Forderungen im Einzelnen an die Qualität der betrachteten Information gestellt werden ist dabei stets abhängig von der vorgegebenen Anwendungsbedingung. Die **Qualitätsforderung** ergibt sich aus der Summe der Qualitätsparameter und richtet sich an die Qualität der betrachteten Information. Der Zusammenhang der Qualitätsbegriffe ist in Abbildung 5-4 dargestellt.



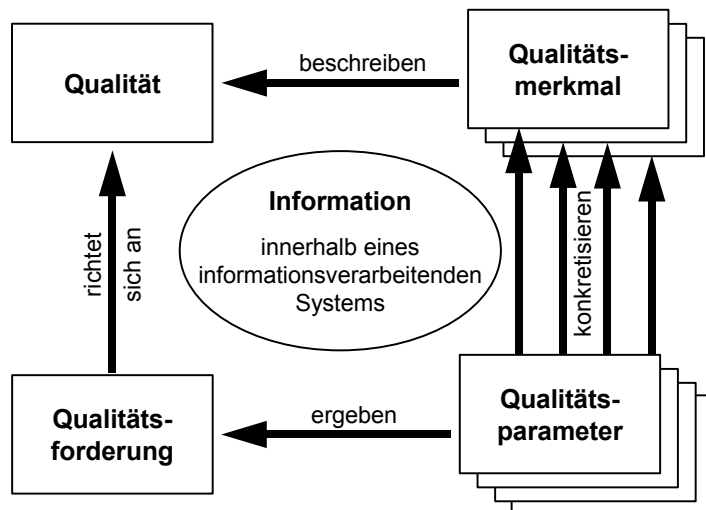


Abbildung 5-4: Qualitätsmodell für Informationen

Mit dem festgesetzten Qualitätsmodell für Informationen ist der Rahmen für eine Qualitätsbetrachtung von Daten und Informationen innerhalb informationsverarbeitender Systeme und Prozesse gegeben. Im weiteren Verlauf ist nun der Frage nachzugehen, welche Qualitätsmerkmale zur Beschreibung der Qualität von Informationen notwendig sind.

### 5.3.1 Qualitätsmerkmale

Im Folgenden sollen die zur Beschreibung der Qualität von Daten und Informationen notwendigen Qualitätsmerkmale aufgestellt und definiert werden. Wie oben bereits erwähnt ist dabei zu berücksichtigen, dass stets dieselben Qualitätsmerkmale genutzt werden, d.h. es muss ein Satz von Qualitätsmerkmalen gefunden werden, der auf alle möglichen auftretbaren Daten und Informationen in einem informationsverarbeitenden System gleichermaßen angewandt werden kann.

Um die Qualität von Daten und Informationen innerhalb eines Systems beschreiben zu können ist es zwingend notwendig, das zeitliche Verhalten zu berücksichtigen. Gemäß den einschlägigen Normen (Kapitel 4.1) lässt sich dies unter der Zuverlässigkeit, als den Teil der Qualität, der den Zeitaspekt behandelt, zusammenfassen. Die Zuverlässigkeitsmerkmale repräsentieren dabei genau die Untermenge der Qualitätsmerkmale, die das zeitliche Verhalten der Information als qualitätsbildende Eigenschaft berücksichtigen (vgl. DIN 55350-11: 1995). Für das Qualitätsmodell für Informationen werden dazu die beiden **Zuverlässigkeitsmerkmale**

- **Verfügbarkeit**
- **Aktualität**

festgesetzt. Als zweite Untermenge von Qualitätsmerkmalen werden die Merkmale zusammengefasst, die die Verwendbarkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit der Information beschreiben. Dabei richten sich diese Merkmale insbesondere an die Verarbeitung und Speicherung der Daten im Informationssystem. Folgende **Integritätsmerkmale** werden dabei unterschieden:

- **Vollständigkeit**
- **Konsistenz**
- **Korrektheit**

Unter Berücksichtigung, dass Daten und Informationen immer in irgendeiner Form durch Messung oder Interpretation entstehen bzw. aus derartig gewonnenen Daten abgeleitet werden und der Tatsache, dass eine Messung oder Interpretation nur mit einer begrenzten Auflösung erfolgen kann, sind Qualitätsmerkmale, die dieses Phänomen berücksichtigen essentiell für ein Qualitätsmodell für Informationen. Abhängig davon, ob es sich um eine kontinuierlich oder diskret darstellbare Information handelt, werden die beiden **Genauigkeitsmerkmale**

- **metrische Genauigkeit**
- **semantische Genauigkeit**

unterschieden.

Aufgrund der Abhängigkeit von der Art der Informationsdarstellung können die beiden Genauigkeitsmerkmale nicht parallel angewandt werden. Dies bedeutet, dass das in dieser Arbeit aufgestellte Qualitätsmodell für Informationen die Qualität durch einen Satz von sechs Qualitätsmerkmalen beschreibt. Dabei sind die beiden folgenden Sätze von Qualitätsmerkmalen zu unterscheiden:

- **Satz der Qualitätsmerkmale für kontinuierlich darstellbare Informationen:**

<b>Verfügbarkeit</b>	<b>Vollständigkeit</b>	<b>Konsistenz</b>	<b>Korrektheit</b>	<b>Aktualität</b>	<b>metrische Genauigkeit</b>
----------------------	------------------------	-------------------	--------------------	-------------------	------------------------------

- **Satz der Qualitätsmerkmale für diskret darstellbare Informationen:**

<b>Verfügbarkeit</b>	<b>Vollständigkeit</b>	<b>Konsistenz</b>	<b>Korrektheit</b>	<b>Aktualität</b>	<b>semantische Genauigkeit</b>
----------------------	------------------------	-------------------	--------------------	-------------------	--------------------------------

In Tabelle 5-1 sind die Definitionen der sieben Qualitätsmerkmale aufgeführt. Um keine Einschränkung auf bestimmte Daten und Informationen vorzunehmen – auf die Vielfalt der möglichen Eingangsdaten wurde bereits zu Beginn dieses Kapitels eingegangen – sind die genutzten Formulierungen bewusst sehr allgemein gehalten. Die ausführliche Darstellung der Bedeutung und praktischen Anwendung der einzelnen Qualitätsmerkmale bilden den Schwerpunkt der folgenden Unterkapitel.

Tabelle 5-1: *Definition der Qualitätsmerkmale für Informationen*

<b>Verfügbarkeit</b>	gibt das Ausmaß des Vorhandenseins der Information zu einem definierten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort an
<b>Aktualität</b>	gibt das Ausmaß der Übereinstimmung der Information mit der sich zeitlich ändernden konzeptionellen Realität an
<b>Vollständigkeit</b>	gibt das Ausmaß des Vorhandenseins sämtlicher zur Beschreibung der konzeptionellen Realität erforderlichen Informationen an
<b>Konsistenz</b>	gibt das Ausmaß der Übereinstimmung der Information mit dem Informationsmodell an
<b>Korrektheit</b>	gibt das Ausmaß der Übereinstimmung der Information mit der konzeptionellen Realität bei vorausgesetzter Aktualität an
<b>metrische Genauigkeit</b>	gibt den Zusammenhang zwischen dem gemessenen und dem wahren bzw. plausibelsten Wert an
<b>semantische Genauigkeit</b>	gibt den Diskretisierungsgrad der Objekt- und Sachdaten an

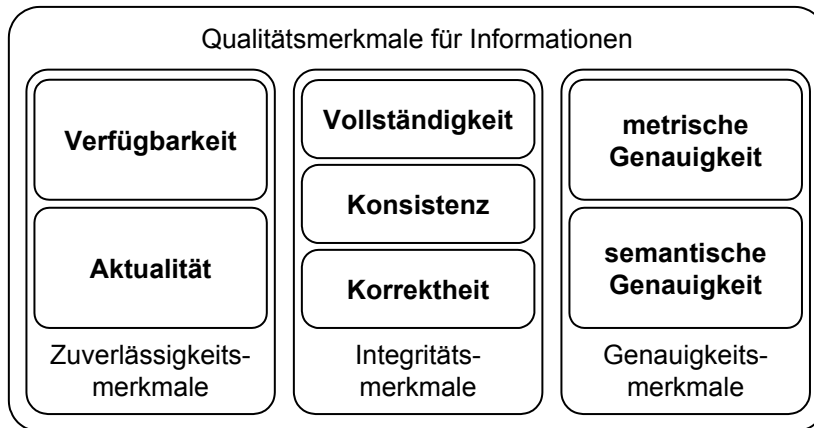


Abbildung 5-5: Qualitätsmerkmale für Informationen

Die primär wirkende Einflussnahme der einzelnen Qualitätsmerkmale ist in Abbildung 5-6 übersichtsweise dargestellt. Auf eine Erläuterung soll an dieser Stelle verzichtet werden. Diese findet sich bei der detaillierten Vorstellung der Qualitätsmerkmale. Es soll hier nur auf die dargestellten Elemente der möglichen Einflussnahme eingegangen werden.

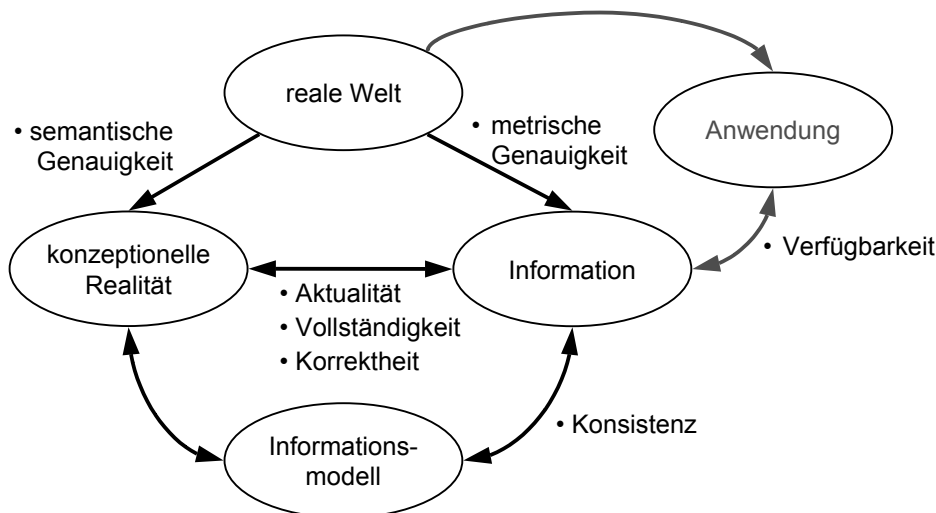


Abbildung 5-6: Einflussnahme der Qualitätsmerkmale

Im linken Teil der Abbildung 5-6 finden sich analog dazu die aus dem Bereich Geoinformatik bekannten Modellierungsschritte (vgl. Abbildung 4-8). Wie bereits in Kapitel 4.6 dargestellt, basiert die Unterscheidung zwischen „reale Welt“ und „konzeptionelle Realität“ auf dem Umstand, dass in einem (Geo-)Informationssystem ein abstraktes Modell Voraussetzung für die digitale Darstellung der Phänomene der realen Welt ist. Die konzeptionelle Realität ist das Ergebnis des Abstraktionsvorgangs zur Festlegung welche der in der realen Welt auftretenden Objekte in welcher Form Eingang in den Datenbestand finden. Das Informationsmodell als Ergebnis der logischen Modellierung gibt Aufschluss über welche Datenstruktur die konzeptionelle Realität erfasst und gespeichert wird. Verschiedentlich wird das Informationsmodell auch als Datenmodell bezeichnet. Die dargestellte Gliederung der Modellierung der realen Welt in einem Informationssystem hat folgende Auswirkung auf die Information: Die Information beschreibt in den Grenzen der konzeptionellen Realität

Phänomene der realen Welt und hält diese, gemäß der im Informationsmodell spezifizierten Form, vor. Wichtig hierbei ist die Erkenntnis, dass die Information in Beziehung zur realen Welt, zur konzeptionellen Realität und zum Informationsmodell steht. Darüber hinaus steht die Information in Beziehung zu der Anwendung, für die die Qualitätsbetrachtung erfolgt.

### 5.3.1.1 Zuverlässigkeitsmerkmale

#### Verfügbarkeit

Definition: Die *Verfügbarkeit* gibt das Ausmaß des Vorhandenseins der Information zu einem definierten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort an.

Die Verfügbarkeit beschreibt ebenso wie die Vollständigkeit die Existenz der Information. Der Unterschied besteht darin, dass bei der Verfügbarkeit als Zuverlässigkeitsmerkmal der zeitliche Aspekt im Vordergrund steht. Gemäß der Definition ist es nicht notwendig, dass die Information permanent zur Verfügung steht. Dies wäre in der Realität auch gar nicht möglich. Zur Wahrung der Verfügbarkeit ist es ausreichend, dass die Information zum geforderten Zeitpunkt vorliegt. So ist bei einem Navigationssystem die Verfügbarkeit des Fahrhinweises erfüllt, wenn dieser rechtzeitig vor dem Erreichen des Knotenpunkts, an dem eine Fahrtrichtungsänderung vorgenommen werden soll, vorliegt und an den Fahrer ausgegeben wird.

Neben der Zeit ist auch der Ort von entscheidender Bedeutung für die Verfügbarkeit. Es ist nicht allein ausreichend, dass die Information existiert, sie muss auch am geforderten Ort vorliegen. Wenn im Fall einer Offboard-Navigation, bei der die Routenberechnung nicht im Fahrzeug, sondern in einer Zentrale erfolgt, der notwendige Fahrhinweis in der Zentrale zwar vorliegt, aufgrund eines Kommunikationsfehlers jedoch nicht in das Fahrzeug als den geforderten Ort übertragen werden kann, ist die Verfügbarkeit verletzt.

Dabei steht das Qualitätsmerkmal Verfügbarkeit in einem sehr engen Zusammenhang zur technischen Verfügbarkeit. So ist bei einem Ausfall eines Sensors, einer Kommunikationseinrichtung oder eines Verarbeitungsmoduls grundsätzlich davon auszugehen, dass damit auch die von dieser technischen Komponente zu liefernde Information nicht zur Verfügung steht.

#### Aktualität

Definition: Die *Aktualität* gibt das Ausmaß der Übereinstimmung der Information mit der sich zeitlich ändernden konzeptionellen Realität an.

Das Zuverlässigkeitsmerkmal Aktualität drückt wie das Integritätsmerkmal Korrektheit das Freisein von Fehlern in der Information aus mit dem Unterschied, dass bei der Korrektheit der Fehler bereits in der Informationsentstehung auftritt und bei der Aktualität der Fehler sich erst im Laufe der Zeit durch Änderung der konzeptionellen Realität einstellt.

Die Aktualität betrifft insbesondere Daten und Informationen, die in Datenbanken gehalten werden. Untersuchungen der Hersteller von digitalen Straßenkarten ergaben, dass pro Kalenderjahr bis zu zehn Prozent der Straßensegmente eine Änderung erfahren (SCHLOTT 1997). Aus diesem Grund ist eine zyklische Fortführung derartiger Datenbestände unerlässlich. Trotz allem wird immer ein Teil der Daten aufgrund zeitlich bedingter Änderungen fehlerhaft sein. Wichtig ist in diesem Zusam-

menhang, dass nicht die Übereinstimmung mit der realen Welt, sondern die Übereinstimmung mit der konzeptionellen Realität ausschlaggebend für die Aktualität ist. So haben nur die Phänomene der realen Welt einen Einfluss auf die Aktualität, die auch Bestandteil des abstrakten Abbilds der realen Welt sind.

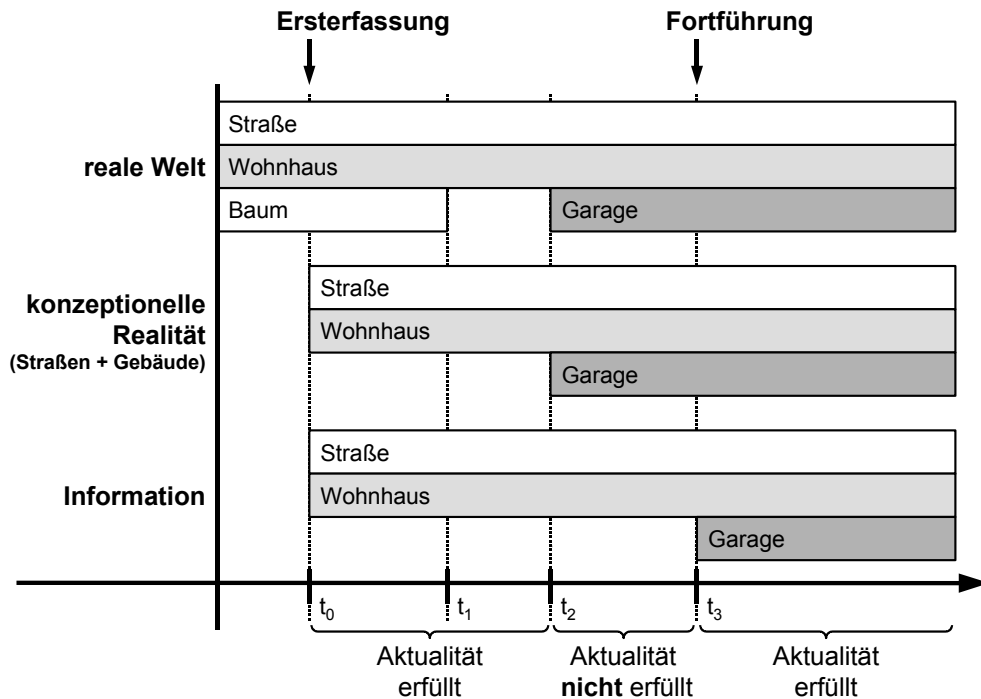


Abbildung 5-7: Beispiel für die Aktualität von Informationen in einem Geoinformationssystem

Dies zeigt sich für das in Abbildung 5-7 dargestellte Objekt „Baum“. Da die konzeptionelle Realität keine Bäume enthält, hat der Wegfall des Objekts „Baum“ zum Zeitpunkt  $t_1$  keine Auswirkung auf die Aktualität. Die „Garage“, die zum Zeitpunkt  $t_2$  in der realen Welt errichtet wird, bildet dagegen ein relevantes Objekt in der konzeptionellen Realität. Somit ist ab dem Zeitpunkt  $t_2$  die Aktualität nicht erfüllt. Diese Aktualitätsverletzung besteht bis zum Zeitpunkt  $t_3$ , an dem im Rahmen der Fortführung des Datenbestands die Garage erfasst wird.

Bei den messtechnisch gewonnenen und prozessierten Informationen ist die Aktualität eng gekoppelt an die Abtastrate bzw. Echtzeitfähigkeit des Sensors bzw. des Sensorsystems. Dies soll ebenso an einem Beispiel verdeutlicht werden. Unter der Annahme, dass sich ein Fahrzeug mit 30 m/s bewegt und für die Positionsbestimmung eine Ortungskomponente eingesetzt wird, die aufgrund der internen Verarbeitungszeit die Position mit einer Zeitverzögerung von 0,5 Sekunden liefert, ergibt sich aufgrund des Alterungsprozesses eine Abweichung von 15 Metern. Die Frage, ob aufgrund dieser Verzögerung bereits ein Fehler vorliegt, d.h. die Aktualität verletzt ist, kann damit noch nicht abschließend beantwortet werden. Entscheidend hierfür ist die für die Anwendung zugrunde gelegte Genauigkeitsforderung. Wenn im Rahmen eines Flottenmanagementsystems eine Genauigkeit der Fahrzeugposition von 100 Metern notwendig ist, würde sich durch die zeitliche Veränderung noch kein Fehler in der Information ergeben. Die Aktualität wäre in diesem Fall gewahrt. Wäre im Rahmen einer anderen Anwendung eine Genauigkeit von 5 Metern gefordert, würde die Abweichung von 15 Metern zu einem Fehler in der Position aufgrund einer Verletzung der Aktualität führen.

### 5.3.1.2 Integritätsmerkmale

#### Vollständigkeit

Definition: Die *Vollständigkeit* gibt das Ausmaß des Vorhandenseins sämtlicher zur Beschreibung der konzeptionellen Realität erforderlichen Informationen an.

Als eines der Integritätsmerkmale dient die Vollständigkeit der Beschreibung der Verwendbarkeit der Informationen. Ebenso wie bei der Aktualität ist bei der Vollständigkeit eine Übereinstimmung mit der konzeptionellen Realität notwendig. Die Vollständigkeit ist genau dann gewahrt, wenn alle zur Beschreibung des abstrakten Modells der realen Welt notwendigen Daten vorhanden sind. Im Hinblick auf (Geo-)Datenbestände ist die Vollständigkeit erfüllt, wenn alle Objekte der konzeptuellen Realität mit den zugehörigen Attributen und Relationen im Datenbestand enthalten sind. Die Vollständigkeit greift ebenso bei Datensätzen, die von einem Sensor- oder Fahrzeugsystem bereitstellen sind. Wenn z.B. bei einer FCD<sup>1</sup>-Anwendung gefordert wird, dass von den Fahrzeugen eine Identifikationsnummer, die aktuelle Position und die Geschwindigkeit als Datensatz übertragen wird, bei der Zentrale aber nur die Identifikationsnummer und Position empfangen wird, ist, aufgrund der fehlenden Geschwindigkeit, der Datensatz unvollständig. Im Gegensatz zu allen anderen Qualitätsmerkmalen kann die Vollständigkeit immer nur auf eine Gruppe von Daten oder Informationen angewandt werden.

Zwischen der Vollständigkeit und Verfügbarkeit besteht ein enger Zusammenhang, da beide Qualitätsmerkmale die Existenz der Information beschreiben. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die Vollständigkeit allein die Existenz der Informationen bezüglich der konzeptionellen Realität betrachtet. Die Verfügbarkeit fordert im Rahmen der Anwendung das Vorhandensein der Information an einem konkreten Ort zu einer bestimmten Zeit (vgl. hierzu Abbildung 5-6). Für das in diesem Kapitel zu betrachtende Qualitätsmodell für Informationen ist es – auch im Hinblick der Berücksichtigung existierender Qualitätsmodelle und -konzepte anderer Fachbereiche – notwendig, die Verfügbarkeit und Vollständigkeit zu unterscheiden. In dem in Kapitel 5.4 behandelten Analyseverfahren werden die beiden Qualitätsmerkmale zusammengefasst.

#### Konsistenz

Definition: Die *Konsistenz* gibt das Ausmaß der Übereinstimmung der Information mit dem Informationsmodell an.

Im Gegensatz zu den beiden anderen Integritätsmerkmalen, die den Zusammenhang zwischen der Information und der konzeptionellen Realität betrachten, bezieht sich die Konsistenz auf das zur Speicherung der Information zugrunde gelegte Informationsmodell (s. Abbildung 5-6). Zur Wahrung der Konsistenz ist somit einzig und allein notwendig, dass die Information entsprechend der im Informationsmodell spezifizierten Form vorliegt. Diese umfasst die im Datenbestand enthaltenen Objekte, Attribute und Relationen sowie deren Verknüpfung oder den Wertebereich und die Einheit der Attribute. Die Konsistenz ist Voraussetzung für einen widerspruchsfreien Datenbestand. Beson-

---

<sup>1</sup> Floating Car Data

dere Bedeutung erlangt die Konsistenz, wenn zwischen verteilten Systemen ein Informationsaustausch stattfindet. Eine Konsistenzwahrung wird durch die Einführung und Nutzung von Standards vereinfacht. Im Bereich der Verkehrstelematik haben sich verschiedene Standards bzw. Quasistandards, wie GDF<sup>1</sup>, RDS/TMC<sup>2</sup>, GSM<sup>3</sup> oder GATS<sup>4</sup>, durchgesetzt oder befinden sich im Aufbau (vgl. SCHNEIDER 1996).

### **Korrektheit**

Definition: Die *Korrektheit* gibt das Ausmaß der Übereinstimmung der Information mit der konzeptionellen Realität bei vorausgesetzter Aktualität an.

Die Korrektheit bezieht sich wie die Aktualität wiederum auf die Übereinstimmung der Information mit der konzeptionellen Realität. Es sollen damit insbesondere die groben und systematischen Fehler, die vorzugsweise bei der Informationserfassung und -entstehung auftreten, als qualitätsbildende Eigenschaft berücksichtigt werden. Beispiele hierfür sind: eine systematisch zu lange Wegstrecke aufgrund eines unkalibrierten Radsensors, ein unkorrekter Verlauf einer Straße in einer digitalen Karte durch eine fehlerhafte Digitalisierung oder eine unkorrekte Klassifikation einer Straße durch die Vergabe des falschen Attributwerts (z.B. Kreisstraße anstatt Bundesstraße).

Die in der Definition getroffene Einschränkung, dass bei der Beurteilung der Übereinstimmung mit der konzeptionellen Realität die Aktualität der Information vorausgesetzt wird, ist notwendig, um klar abzugrenzen, dass der Fehler bei der Erfassung entstanden ist und sich nicht erst im Laufe der Zeit durch die Datenalterung eingestellt hat.

Die Entscheidung, ob eine grobe bzw. systematische Abweichung als eine Verletzung der Korrektheit eingestuft wird ist wie bei dem Qualitätsmerkmal Aktualität abhängig von der geforderten Genauigkeit, die durch die beiden folgenden Genauigkeitsmerkmale beschrieben wird.

#### **5.3.1.3 Genauigkeitsmerkmale**

##### **Metrische Genauigkeit**

Definition: Die *metrische Genauigkeit* gibt den Zusammenhang zwischen dem gemessenen und dem wahren bzw. plausibelsten Wert an.

Im Gegensatz zu allen bisher besprochenen Qualitätsmerkmalen kann die metrische Genauigkeit nur auf kontinuierlich darstellbare Daten und Informationen angewandt werden. Die metrische Genauigkeit bezieht sich in der Regel auf Daten, die auf irgendeine Weise gemessen oder aus gemessenen Daten über einen definierten funktionalen Zusammenhang berechnet werden und deren Wert kontinuierlich vorgehalten wird. Beispiele hierfür sind die gemessenen Koordinatenwerte bei einer Positionsbestimmung ( $Y = 3.541.123,26$  m,  $X = 5.400.596,48$  m) oder die mit einem Kompass

---

<sup>1</sup> Geographical Data Format

<sup>2</sup> Radio Data System/Traffic Message Channel

<sup>3</sup> Global System for Mobile Communications

<sup>4</sup> Global Automotive Telematics Standard

ermittelte Richtung ( $\varphi = 296^\circ 36' 52''$ ). Über die Anforderung an die metrische Genauigkeit lassen sich oftmals die Anforderungen an die Sensorik direkt ableiten. Wird beispielsweise eine Genauigkeit von 1 dm gefordert, scheidet eine absolute Positionsbestimmung über GPS aus.

**Zusammenhang zwischen der metrischen Genauigkeit und der Korrektheit bzw. Aktualität:**

Wie bereits erwähnt ist für die Festlegung einer Verletzung der Korrektheit bzw. Aktualität die zugrunde gelegte Genauigkeit der Information ausschlaggebend. Auf diesen Zusammenhang soll im Folgenden eingegangen werden. Über die gegebene Standardabweichung  $\sigma$  als einen möglichen Qualitätsparameter für das Qualitätsmerkmal metrische Genauigkeit kann die Toleranz  $T$  mit

$$T = 2 \cdot k \cdot \sigma \quad (5-1)$$

bestimmt werden. Der Faktor  $k$  bildet hierbei das Quantil der zugrunde gelegten Sicherheitswahrscheinlichkeit  $P$ , wie sie sich aus der Standardnormalverteilung  $N(0,1)$  ergibt. Ausgehend von einer symmetrischen Verteilung erhält man die maximale Abweichung

$$d_{\max} = \frac{T}{2} \quad (5-2)$$

Tabelle 5-2: Maximale zulässige Abweichungen zur Einhaltung der Korrektheit bzw. Aktualität in Abhängigkeit der Genauigkeit und der Sicherheitswahrscheinlichkeit  $S$

$S$	$k$	maximale Abweichung $d_{\max}$ [m]			
		$\sigma = 1$ m	$\sigma = 2$ m	$\sigma = 5$ m	$\sigma = 10$ m
68,3%	1,00	1,0	2,0	5,0	10,0
90,0%	1,64	1,6	3,3	8,2	16,4
95,0%	1,96	2,0	3,9	9,8	19,6
95,5%	2,00	2,0	4,0	10,0	20,0
98,0%	2,33	2,3	4,7	11,7	23,3
99,0%	2,58	2,6	5,2	12,9	25,8
99,7%	3,00	3,0	6,0	15,0	30,0

Die Korrektheit bzw. Aktualität ist genau dann verletzt, wenn  $d > d_{\max}$  bzw.

$$d > k \cdot \sigma \quad (5-3)$$

Dies soll anhand des in Abbildung 5-8 dargestellten Beispiels verdeutlicht werden. Zur quantitativen Angabe der metrischen Genauigkeit wird hierzu die Punktgenauigkeit  $\sigma_P$  als Genauigkeitsparameter genutzt. In dem angegebenen Beispiel liegt eine Abweichung  $d = 4,5$  m zwischen der wahren und der gemessenen Position vor. Wird im ersten Fall davon ausgegangen, dass die Messmethode eine Punktgenauigkeit  $\sigma_{P,1} = 2$  m liefert ergibt sich mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% ein Toleranzbereich von 7,8 m und damit eine maximale Abweichung  $d_{\max,1} = 3,9$  m. Die tatsächliche Abweichung von 4,5 m ist demnach nicht auf die Messunsicherheit, sondern auf einen groben Messfehler zurückzuführen. Die Korrektheit ist demnach verletzt. Im zweiten dargestellten Fall weist die Messmethode eine Genauigkeit von  $\sigma_{P,2} = 5$  m auf. Die sich daraus ergebende maximal zulässige Abweichung  $d_{\max,2} = 9,8$  m ist größer als die tatsächliche Abweichung. Die Abweichung ist damit nicht auf einen groben Messfehler zurückzuführen, sondern allein in der Messunsicherheit begründet. Die gemessene Position ist somit korrekt.



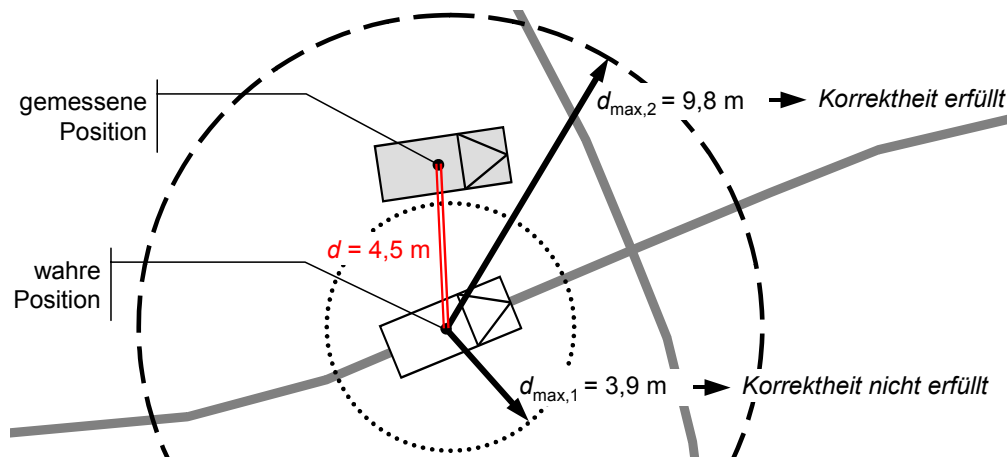


Abbildung 5-8: Beispiel des Zusammenhangs zwischen Genauigkeit und Korrektheit

### Semantische Genauigkeit

Definition: Die *semantische Genauigkeit* gibt den Diskretisierungsgrad der Objekt- und Sachdaten an.

Für die semantische Genauigkeit gilt die Einschränkung, dass sie nur auf diskret darstellbare Daten und Informationen angewendet werden kann. Im Gegensatz zur metrischen Genauigkeit ist bei der semantischen Genauigkeit weniger die Mess- bzw. Interpretationsgenauigkeit als vielmehr der gewählte Abstraktionsgrad bei der Modellierung der realen Welt ausschlaggebend für die erreichbare Genauigkeit. Die semantische Genauigkeit dient primär der qualitativen Beschreibung des Detailliertheitsgrades der Erfassung der thematischen Informationen (Objekte, Attribute, Relationen). In aller Regel kann dies aus dem zugrunde liegenden Informationsmodell, als logisches Modell der konzeptionellen Realität, entnommen werden.

#### 5.3.1.4 Hierarchische Gliederung der Qualitätsmerkmale

Neben der Einteilung der Qualitätsmerkmale in Zuverlässigkeits-, Integritäts- und Genauigkeitsmerkmale ist eine hierarchische Gliederung der Qualitätsmerkmale gegeben, welche die Bedeutung der Merkmale in der Qualitätsbetrachtung widerspiegelt (Abbildung 5-9). Es lassen sich dabei

- **Primärqualitätsmerkmale**
- **Sekundärqualitätsmerkmale**
- **Tertiärqualitätsmerkmale**

unterscheiden. Die Berücksichtigung der gegebenen hierarchischen Ordnung erleichtert und vereinfacht die Anwendung der Qualitätsmerkmale bei der Beschreibung der Informationsqualität, da sie eine methodisch sinnvolle Reihenfolge vorgibt. So ist es hinfällig sich über die Korrektheit der Information Gedanken zu machen, wenn die Information nicht verfügbar ist. Ebenso tritt die Genauigkeit in den Hintergrund, wenn durch einen groben Messfehler die Korrektheit der Information verletzt ist. Derartige Überlegungen führen zu der folgenden hierarchischen Anordnung der Qualitätsmerkmale.

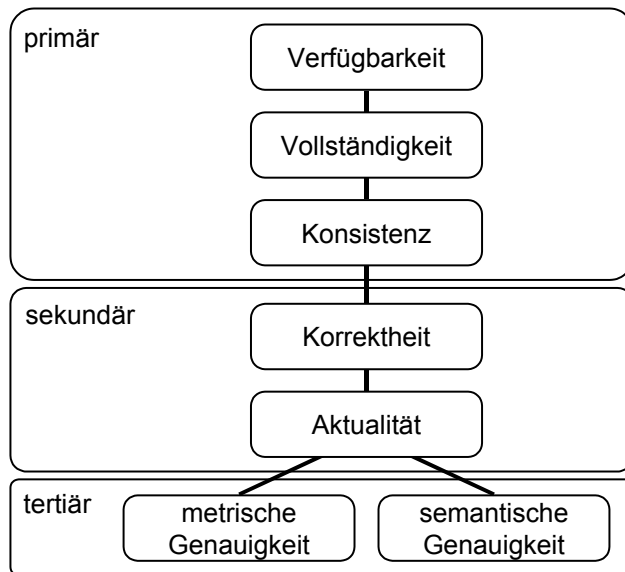


Abbildung 5-9: Hierarchische Gliederung der Qualitätsmerkmale

Die höchste Priorität genießt die Verfügbarkeit, gefolgt von der Vollständigkeit. Beide Qualitätsmerkmale betreffen maßgeblich die Existenz der Information. Ein weiteres Primärqualitätsmerkmal bildet die Konsistenz. Auch hier besteht bei einer Konsistenzverletzung die Gefahr eines Informationsverlustes.

Die Korrektheit und die Aktualität repräsentieren die Sekundärqualitätsmerkmale. Dabei steht die Korrektheit über der Aktualität. Diese Rangfolge ergibt sich aus der Überlegung heraus, dass zum Zeitpunkt der Datenentstehung die Aktualität automatisch gewahrt ist. Eine Information, die bei ihrer Entstehung die Korrektheit nicht erfüllt, wird dies auch über ihren gesamten Lebenszyklus nicht erfüllen. Die Frage der Aktualität stellt sich somit nur bei Daten und Informationen, die zum Entstehungszeitpunkt die Korrektheitsforderungen erfüllt haben.

In der Gruppe der Tertiärqualitätsmerkmale sind die beiden Genauigkeitsmerkmale metrische und semantische Genauigkeit enthalten. Da beide Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit, ob die Information kontinuierlich oder diskret vorgehalten wird, stets getrennt auftreten, ist eine innere Hierarchie nicht auszumachen.

### 5.3.2 Qualitätsparameter

Gemäß dem aufgestellten Qualitätsmodell für Informationen erfolgt über die Qualitätsparameter eine Konkretisierung der Qualitätsmerkmale. Dabei können mehrere Qualitätsparameter für ein Qualitätsmerkmal herangezogen werden. Des Weiteren dienen die Qualitätsparameter zur Formulierung der Anforderungen an die Qualität der Information. Dazu sind entsprechende Qualitätsparameterwerte festzusetzen. An dieser Stelle soll ein kurzer Überblick zu den Qualitätsparametern gegeben werden. Die Aufstellung der verwendbaren Qualitätsparameter erhebt dabei keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit. Grundsätzlich gilt für die Qualitätsparameter eine starke Abhängigkeit zu der Herkunft der behandelten Informationen. So greifen für Daten- und Informationen, die durch einen Sensor erzeugt werden, völlig andere Qualitätsparameter als für Daten, die aus einem

Datenbestand entnommen werden. Im Hinblick auf das Analyseverfahren werden hier verstärkt probabilistische Qualitätsparameter behandelt.

**Verfügbarkeit:** Aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen der technischen Verfügbarkeit der informationsliefernden Komponenten (Sensoren, Rechereinheiten, Kommunikationsmedien usw.) und der Verfügbarkeit der Information lässt sich eine Vielzahl der vorhandenen Qualitätsparameter für die technische Verfügbarkeit (bzw. Zuverlässigkeit) übernehmen. Hierunter fallen u.a. die *Ausfallrate*  $\lambda$ , die *Anzahl der Ausfälle pro Zeit*, die *mittlere Betriebsdauer* (MTTF), die *mittlere Systemdauer bis zum ersten Ausfall* (MTTFF), die *mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen* (MTBF) oder die *Zuverlässigkeitsfunktion*

$$R(t) = \frac{n_{ZV}(t)}{N} \quad (5-4)$$

als Quotienten aus der Anzahl  $n_{ZV}(t)$  der ausgefallenen Einheit zur Zeit  $t$  und der Gesamtzahl  $N$  der im System enthaltenen Einheiten. Weitere Qualitätsparameter zur Konkretisierung der Verfügbarkeit finden sich im Bereich der Geodaten: *Nutzungsrechte*, *Zugriffsmöglichkeiten*, *Verarbeitungsfähigkeit*. Die Zugriffsmöglichkeit beschreibt den technischen Zugriff auf den Speicherplatz der Daten. Abhängig von der Struktur des Speichermediums variieren dabei die Suchzeiten und Zugriffszeiten.

**Vollständigkeit:** Für einen einzelnen Datensatz ist die Vollständigkeit nur durch einen booleschen Parameter zu konkretisieren (erfüllt oder nicht erfüllt). Bei großen Datenbeständen lassen sich Prüfverfahren anwenden, die im Ergebnis zu einer Vollständigkeitsrate oder einem von JOOS (2000) definierten Vollständigkeitsmaß  $VM$  führen:

$$VM = 1 - \frac{n_{IV}}{N} \quad (5-5)$$

Hierbei gibt  $N$  die Anzahl der Einheiten in der konzeptionellen Realität und  $n_{IV}$  die Anzahl der fehlenden Einheiten im Datenbestand an. Für den Zugriff auf eine einzelne Information entspricht das Vollständigkeitsmaß der Wahrscheinlichkeit für die Verfügbarkeit der Information. Umgekehrt kann aus der Verfügbarkeit der Eingangsdaten die Vollständigkeit des Datensatzes abgeleitet werden.

**Konsistenz:** Wie die Vollständigkeit kann die Erfüllung der Konsistenzkriterien nur durch einen booleschen Wert angegeben werden. Über entsprechende Prüfverfahren kann auf die Rate der Daten im Datenbestand geschlossen werden, welche die Forderungen an die Konsistenz erfüllen. JOOS (2000) schlägt hierzu das *Konsistenzmaß*  $KM$  vor:

$$KM = 1 - \frac{n_{IK}}{N} \quad (5-6)$$

mit  $n_{IK}$  als die Anzahl der Objekte, die die Konsistenzforderungen nicht erfüllen. Die Überprüfung der Konsistenz besitzt die Besonderheit, dass hierfür keine Referenzdaten notwendig sind.

**Korrektheit:** Zur eindeutigen Festlegung, ob ein grober Fehler vorliegt, lassen sich verschiedene *statistische Tests* heranziehen. Der bestehende Zusammenhang zu der metrischen Genauigkeit wurde bereits bei den Erläuterungen zum Qualitätsmerkmal metrische Genauigkeit dargestellt. In

der Ausgleichsrechnung werden u.a. *Redundanzanteile* als Kenngröße für die Aufdeckbarkeit grober Fehler genutzt. Es handelt sich hierbei um ein Maß, das abhängig von der Konfiguration und der Überbestimmung, die Kontrollierbarkeit einer Beobachtung angibt (PELZER 1985). Bei großen Datenbeständen werden Prüfverfahren angewendet, die im Ergebnis z.B. ein *Richtigkeitsmaß*  $RM$  (s. JOOS 2000) liefern. Hierbei gilt:

$$RM = 1 - \frac{n_{IR}}{N} \quad (5-7)$$

mit  $n_{IR}$  als die Anzahl der unkorrekten Einheiten und  $N$  als die Anzahl der Einheiten im Datenbestand. Übertragen auf die Verwendung einer einzelnen Information gibt das Richtigkeitsmaß die Wahrscheinlichkeit für die Entnahme einer korrekten Information aus dem Datenbestand an.

**Aktualität:** Für den Bereich der Geodaten liegen verschiedene Qualitätsparameter zur Konkretisierung der Aktualität vor: *Erfassungszeitpunkt*, *Veränderungsrate*, *Fortführungsrate*, *Vergleich Fortführungsrate zu Veränderungsrate* usw. (u.a. BILL 1999, GUPTILL & MORRISON 1995, JOOS 2000). Zur eindeutigen Festlegung einer Verletzung der Aktualität lassen sich analog zur Korrektheit entsprechende statistische Tests heranziehen. Hinsichtlich der Bewertung von prozessierten Daten lassen sich aus der *Verarbeitungszeit* für die Sensor- oder Rechereinheit oder der *Übertragungszeit* des Kommunikationsmediums Qualitätsparameter für die Aktualität ableiten.

**Metrische Genauigkeit:** Für alle kontinuierlich darstellbaren Informationen bietet sich insbesondere die *Standardabweichung* oder *Varianz* als Qualitätsparameter für die metrische Genauigkeit an. Für geometrische Objekte, wie Punkte, Linien und Flächen lassen sich verschiedene daraus ableitbare Qualitätsparameter wie *Konfidenzellipse*, *Epsilon-Band*, *Fehlerband* oder die *Wahrscheinlichkeit der Objektzugehörigkeit eines Punktes* (u.a. GLEMSER 2000) heranziehen. Für Sensoren können anhand der technischen Daten aus der Messgenauigkeit oder des Auflösungsvermögens Qualitätsparameterwerte für die Standardabweichung abgeleitet werden.

**Semantische Genauigkeit:** Aufgrund der starken Abhängigkeit zum Datenmodell ist für die semantische Genauigkeit einer Information kein Qualitätsparameter definierbar. Über die semantische Genauigkeit lassen sich Forderungen an den Diskretisierungsgrad der Sachdaten formulieren. Die angegebenen Forderungen sind im Vorfeld genau zu prüfen. Werden diese nicht erfüllt, ist der Datenbestand für die Applikation untauglich und somit nicht verwendbar.

## Prüfverfahren

Wie oben bereits mehrfach angedeutet sind für die Bestimmung der Qualitätsparameterwerte geeignete Prüfverfahren anzuwenden. Dies gilt insbesondere für die Beurteilung von Daten, die in umfangreichen Datenbeständen gespeichert werden. Nach DGQ 11-04 (1995) ist die Qualitätsprüfung definiert als „Feststellen, inwieweit eine Einheit die Qualitätsforderung erfüllt“. Dazu ist eine Menge von Daten auf den Erfüllungsgrad der Einzelforderungen zu prüfen. Dies geschieht mittels Prüfdaten, welche die Randbedingungen (Trends, Verläufe) und Ergebnisse (Messwerte, statistische Kennwerte) der Qualitätsprüfung angeben (REINHART et al. 1996). Diese sind teilweise schon Qualitätsparameterwerte oder werden zu diesen verarbeitet (Berechnung, Umformung, Kombinationen). Für die Qualitätsprüfung lassen sich verschiedene Prüfarten anwenden. In

DIN 55350-17 (1988) werden die **vollständige Prüfung**, die **100%-Prüfung** und die **Stichprobenprüfung** unterschieden, wobei die Verfahren hinsichtlich des Prüfaufwands und der Genauigkeit der Qualitätsprüfung variieren.

### 5.3.3 Zusammenfassung

Mit dem definierten Qualitätsmodell für Informationen und den darin enthaltenen Qualitätsmerkmalen und -parametern ist eine einheitliche Beschreibung aller in informationsverarbeitenden Systemen auftretenden Daten und Informationen gewährleistet. So lassen sich messtechnisch gewonnene Daten, innerhalb anderer Systeme prozessierte Daten und Daten, die in digitalen Datenbeständen vorgehalten werden, immer mit demselben Satz von Qualitätsmerkmalen beschreiben. Mit dem definierten Satz von Qualitätsmerkmalen ist eine einheitliche und objektive Beschreibung der Daten- und Informationsqualität über die gesamte Informationskette, d.h. ausgehend von den erfassten und übernommenen Daten über die verarbeiteten Daten bis hin zu der vom System ausgegebenen Information, gegeben.

Bei den Qualitätsparametern, über die eine Konkretisierung der Qualitätsmerkmale erfolgt und die zur Formulierung der Qualitätsforderung genutzt werden, ist kein festgelegter Satz von Parametern spezifiziert. Das Qualitätsmodell sieht hierfür vor, dass ein jeweils für den vorliegenden Daten- oder Informationstyp geeigneter Qualitätsparameter heranzuziehen ist.

Im Gegensatz zum Qualitätsmodell, das zur Beschreibung und Bewertung der Qualität einzelner Daten und Informationen dient, ermöglicht das im folgenden Unterkapitel festgelegte Analyseverfahren die Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität innerhalb des informationsverarbeitenden Prozesses der Informationskette des Systems. Das Qualitätsmodell mit seinen Qualitätsmerkmalen bildet hierfür den anzuwendenden Qualitätsrahmen.

## 5.4 Verfahren zur Analyse der Informationsqualität

Der zweite Teil des Qualitätskonzepts umfasst das Analyseverfahren zur Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität. Das dazu erarbeitete Analyseverfahren orientiert sich an den standardisierten Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse (vgl. Kapitel 4.4) und berücksichtigt das in Kapitel 5.3 formulierte Qualitätsmodell für Informationen. Ziel ist es eine Methodik bereitzustellen, die eine Analyse der Qualität von Informationen innerhalb informationsverarbeitender Systeme gestattet.

Um mit einem Analyseverfahren die Informationsqualität innerhalb informationsverarbeitender Systeme behandeln zu können, sind genaue Kenntnisse über den Systemaufbau und das Systemverhalten notwendig. Der Schwerpunkt muss dabei in einer übersichtlichen Darstellung der logischen Zusammenhänge der Informationen und der informationsverarbeitenden und -liefernden Systemkomponenten sowie der quantitativen Betrachtung der Qualität der Informationen im System liegen.

Um den geforderten engen Bezug zu den standardisierten Analyseverfahren zu halten, wurden die Verfahren hinsichtlich der Analysemethoden und -möglichkeiten untersucht. Dabei zeigen sich die Zuverlässigkeitsanalyseverfahren auf der Basis der Booleschen Modellbildung als besonders

geeignet für eine Übertragung auf Analyseverfahren zur Informationsqualität. Die booleschen Zuverlässigkeitsanalyseverfahren gestatten

- die graphische Darstellung von Systemabläufen und
- die analytische Auswertung mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung

und ermöglichen damit in Abhängigkeit des Systemdesigns und der Zuverlässigkeit der Systemkomponenten

- die Beurteilung der Funktionsfähigkeit eines Systems,
- den Vergleich von Alternativentwürfen eines Systems und
- die Ermittlung von Schwachstellen und Überdimensionierungen im System.

Des Weiteren sind die Verfahren für die Analyse von einfachen und komplexen Systemen gleichermaßen geeignet und können bereits in der Studien- und Definitionsphase eines Systems eingesetzt werden (VDI 4008-1: 1998).

Die dargestellten Eigenschaften und Vorteile der booleschen Zuverlässigkeitsanalyseverfahren motivieren die Herleitung eines Analyseverfahrens auf der Grundlage der Booleschen Modellbildung zur Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität innerhalb informationsverarbeitender Systeme. Aufgrund der zentralen Bedeutung der Booleschen Modellbildung wird der Vorstellung des Analyseverfahrens zur Informationsqualität eine Einführung in die mathematischen Grundlagen der Booleschen Modellbildung vorangestellt.

#### 5.4.1 Mathematische Grundlagen der Booleschen Modellbildung

Als mathematische Grundlage der Booleschen Modellbildung dienen die Schaltalgebra und die Boolesche Algebra, nach denen der Zustand der Komponenten durch eine binäre Zustandsvariable  $X_i$  dargestellt wird. Im Sinne der Positiv-Logik gilt dabei:

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{Komponente ist funktionsfähig} \\ 0 & \text{Komponente ist ausgefallen} \end{cases} \quad (5-8)$$

Zur Verknüpfung der Komponenten dienen Operationen. Es werden hierbei die folgenden Operationen unterschieden:

- Konjunktion (UND,  $\wedge$ )
- Disjunktion (inklusive ODER,  $\vee$ )
- Negation (NICHT,  $\bar{\phantom{x}}$ )

Die Auswertung der Operationen erfolgt dabei nicht nach den algebraischen Rechenoperationen, sondern gemäß der in Tabelle 5-3 dargestellten Wahrheitstafel. Abhängig von den Zuständen der Systemkomponenten und deren logische Verknüpfung kann damit auf den Zustand des Systems geschlossen werden. Dazu wird die Systemfunktion  $\varphi(\mathbf{X})$  herangezogen, die als zweiwertige Funktion des Zustandsvektors  $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  in Abhängigkeit des Zustands der Systemkomponenten die Funktionsfähigkeit des Systems angibt. Hierbei gilt:

$$\varphi(X_1, X_2, \dots, X_n) = \begin{cases} 1 & \text{falls das System funktionsfähig ist} \\ 0 & \text{falls das System ausgefallen ist} \end{cases} \quad (5-9)$$

Für die praktische Anwendung empfiehlt es sich, die Verknüpfung der Zustandsvariablen durch geeignete Rechenoperationen zu ersetzen. Unter Verwendung der reellen algebraischen Schreibweise gelten für die Operationen die folgenden Rechenregeln:

$$\bullet \text{ UND: } X_1 \wedge X_2 = x_1 \cdot x_2 = x_1 x_2 \quad (5-10)$$

$$\bullet \text{ ODER: } X_1 \vee X_2 = x_1 + x_2 - x_1 \cdot x_2 = x_1 + x_2 - x_1 x_2 \quad (5-11)$$

$$\bullet \text{ NICHT: } \bar{X}_1 = 1 - x_1 \quad (5-12)$$

In Abbildung 5-10 ist ein Beispiel der Darstellung der logischen Verknüpfung von Systemkomponenten in Form eines Logikdiagramms gegeben. Die dazugehörige Systemfunktion lautet:

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{X}) &= (X_1 \vee X_2) \wedge X_3 \\ &= (x_1 + x_2 - x_1 x_2) x_3 = x_1 x_3 + x_2 x_3 - x_1 x_2 x_3 \end{aligned} \quad (5-13)$$

Demnach befindet sich das System in einem funktionsfähigen Zustand, wenn die Komponente  $K_1$  oder  $K_2$  und gleichzeitig die Komponente  $K_3$  funktionsfähig sind.

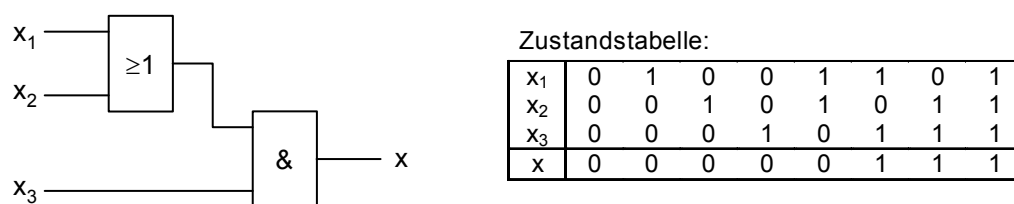


Abbildung 5-10: Logikdiagramm mit den dazugehörigen Systemzuständen

Der Übergang zu der Wahrscheinlichkeit ergibt sich dadurch, dass die boolesche Größe  $X_i$  als diskrete zweiwertige Zufallsvariable mit der Eintrittswahrscheinlichkeit der Funktionsfähigkeit  $P\{X_i = 1\}$  und  $P\{X_i = 0\}$  als die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls der Komponente  $K_i$  aufgefasst wird (VAHL 1998). Der Erwartungswert  $E\{X_i\}$  für die Funktionsfähigkeit der Komponente  $K_i$  berechnet sich wie folgt:

$$E\{X_i\} = 0 \cdot P\{X_i = 0\} + 1 \cdot P\{X_i = 1\} \quad (5-14)$$

Setzt man in den obigen Formeln

$$x_i = p(x_i) \quad \text{und} \quad \varphi(\mathbf{x}) = p(\mathbf{x}) \quad (5-15)$$

so kann in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit der Funktionsfähigkeit der Komponenten die Wahrscheinlichkeit eines funktionsfähigen Systemzustands berechnet werden. Wenn in dem obigen Beispiel davon ausgegangen wird, dass die Komponenten  $K_1$  und  $K_2$  mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p(x_1) = p(x_2) = 0,99$  und die Komponente  $K_3$  mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p(x_3) = 0,999$  funktionsfähig sind, ergibt sich für das System die Wahrscheinlichkeit eines funktionsfähigen Zustands zu:

$$p(\mathbf{x}) = (p(x_1) + p(x_2) - p(x_1) \cdot p(x_2)) \cdot p(x_3) \approx 0,9989 \quad (5-16)$$

Eine Zusammenstellung der Axiome und Rechenregeln der Booleschen Algebra findet sich in Anhang B.

Tabelle 5-3: *Wahrheitstafel*

Variable		Disjunktion	Konjunktion	Negation
$x_1$	$x_2$	$x_1 \vee x_2$	$x_1 \wedge x_2$	$\bar{x}_2$
0	0	0	0	1
0	1	1	0	0
1	0	1	0	
1	1	1	1	

#### 5.4.2 Das Informationsflussdiagramm

In Anlehnung an das Ereignisablaufdiagramm (DIN 25419: 1985) und den Fehlerbaum (DIN 25424-1: 1981) wird ein graphisches Verfahren zur Darstellung des Informationsflusses innerhalb von informationsverarbeitenden Systemen entwickelt. Das Verfahren ermöglicht die Darstellung der logischen Zusammenhänge der Informationen und gestattet den Einfluss technischer Systemkomponenten auf die Informationsqualität zu berücksichtigen. Es bildet die Grundlage des Verfahrens zur Analyse der Informationsqualität und wird im weiteren Verlauf als **Informationsflussdiagramm** bezeichnet.

Im Unterschied zu der Ereignisablaufanalyse, bei der von einem bestimmten Anfangsereignis ausgegangen und auf die daraus resultierenden Endzustände geschlossen wird (induktive Analyse), und der Fehlerbaumanalyse, bei der nach möglichen Ursachen gesucht wird, die zu einem unerwünschten Endzustand führen (deduktive Analyse), liegt der Schwerpunkt des hier vorgestellten Analyseverfahrens auf einer vollständigen Abbildung des Informationsflusses mit allen dazugehörigen Informationen und Systemkomponenten mit einem Einfluss auf die Informationsqualität.

Die zwei wichtigsten Objekte im Informationsflussdiagramm sind

- die **Information** und
- die **Applikation**.

Die Applikation ist ein Objekt, in das Informationen eingehen und Informationen ausgegeben werden (Abbildung 5-11). Was innerhalb der Applikation im Detail passiert, ist dabei von untergeordnetem Interesse. Bei der Modellierung des Informationsflusses ist nur festzulegen, welcher logische Zusammenhang zwischen den Informationen besteht. Im Sinne der Booleschen Algebra sind hierbei im Wesentlichen die Konjunktion und Disjunktion zu unterscheiden.



Abbildung 5-11: *Die Applikation mit Eingangs- und Ausgangsinformation als Grundelement des Informationsflussdiagramms*



Das Informationsflussdiagramm ergibt sich aus der sequentiellen Anordnung von Applikationen, wobei die Ausgangsinformation einer Applikation die Eingangsinformation der nachfolgenden Applikation darstellt (Abbildung 5-14).

Für das Informationsflussdiagramm werden die folgenden drei **Verknüpfungen** festgesetzt:

- **UND-Verknüpfung**
- **ODER-Verknüpfung**
- **mvn-Verknüpfung**

Die **UND-Verknüpfung** steht für den logischen Durchschnitt. Übertragen auf den Informationsfluss wird diese Verknüpfungsform für Applikationen angewendet, bei denen alle Eingangsinformationen zur Erzeugung der Ausgangsinformation benötigt werden. In Abbildung 5-12 ist eine solche UND-Verknüpfung dargestellt. Die Applikation berechnet die Fläche  $F$  eines Rechtecks aus den Seitenlängen  $a$  und  $b$ . Die Fläche  $F$  kann nur dann berechnet werden, wenn beide Eingangsinformationen funktionsfähig sind.

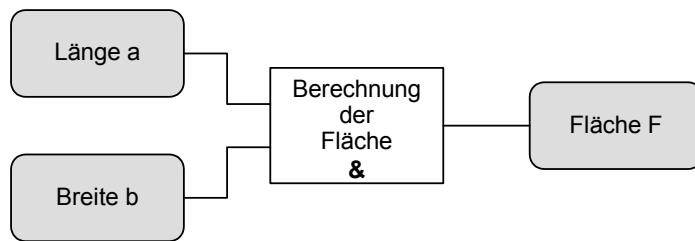


Abbildung 5-12: Informationsflussdiagramm für die Flächenberechnung

Die **ODER-** und die **mvn-Verknüpfung** werden zur Modellierung von Redundanzen genutzt. Sie finden Anwendung, wenn zur Erzeugung einer funktionsfähigen Ausgangsinformation nur eine funktionsfähige Eingangsinformation bzw.  $n$  funktionsfähige Eingangsinformationen notwendig sind. Dies gilt beispielsweise für ein System, bei dem zur Messung einer Strecke drei gleichartige Sensoren implementiert sind. Das dazugehörige Informationsflussdiagramm ist in Abbildung 5-13 dargestellt.

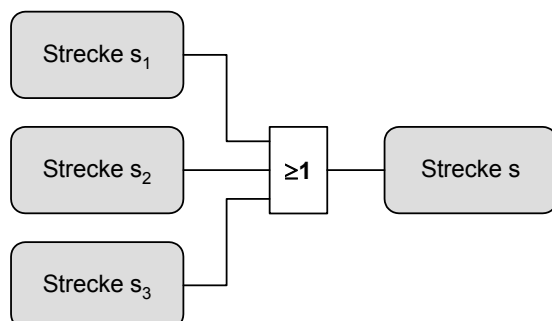
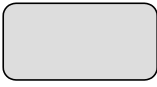




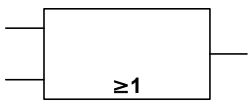
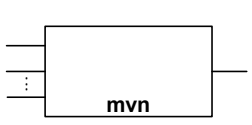

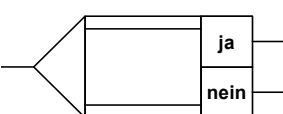
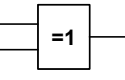
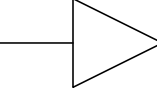
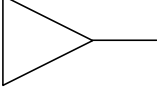
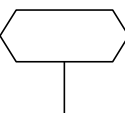


Abbildung 5-13: ODER-Verknüpfung zur Modellierung redundanter Informationen in einem Informationsflussdiagramm

Tabelle 5-4: Graphische Symbole im Informationsflussdiagramm

Nr.	Symbol	Bedeutung	Bemerkung
1		Information	Information und Datenobjekt, die als Eingangsinformation, Zwischenergebnis oder Ergebnisinformation im Informationsfluss auftreten
		Systemkomponente	Darstellung technischer Komponenten (z.B. Sensoren als Datenlieferant) als Eingangs- bzw. Einflussgröße
		Kommentar	Darstellung von Kommentaren
2		Wirkungslinie	Wirkungslinie zum Verbinden von Informationen und Systemkomponenten mit Applikationen
3		UND-Verknüpfung	Applikation, bei der die Eingangsinformationen mit UND verknüpft sind Die Verknüpfung kann beliebig viele Eingänge haben
		ODER-Verknüpfung	Applikation, bei der die Eingangsinformationen mit ODER verknüpft sind Die Verknüpfung kann beliebig viele Eingänge haben
		mvn-Verknüpfung	Applikation, bei der von $n$ Eingängen $m$ funktionsfähige Eingänge gefordert sind Es handelt sich hierbei um ein einfaches mvn-System (Majoritätsredundanz)
4		einfache Verzweigung	Applikation, die eine Anforderung an die Eingangsinformation richtet und in Abhängigkeit „erfüllt“ oder „nicht erfüllt“ zu 2 möglichen disjunkten Systemzuständen führt
		einfache Kontrolle	Symbol ist notwendig, um den Informationsfluss zu verzweigen Liegen zwei oder mehr Eingänge vor, so sind diese mit UND verknüpft
5		exklusive ODER-Verknüpfung	Zur Verknüpfung disjunkter Zustände Symbol wird nur im Anschluss an einfache Verzweigungen und einfache Kontrollen genutzt
6		Übertrag-Ausgang	Zur Unterbrechung und Fortsetzung des Informationsflusses an einer anderer Stelle
		Übertrag-Eingang	
7		Übergangssymbol	Zur Darstellung des Einflusses anderer Qualitätsmerkmale auf die Qualität Symbol tritt in Verbindung mit einer Applikation (Symbol 3 und 4) auf

Neben den Verknüpfungen bildet die **Verzweigung** eine wichtige Applikation zur Modellierung des Informationsflusses von informationsverarbeitenden Systemen. Für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Analyseverfahren werden dazu

- die **einfache Verzweigung** und
- die **einfache Kontrolle**

unterschieden. Beiden gemeinsam ist die Verzweigung des Informationsflusses in Abhängigkeit eines bestimmten Kriteriums, wobei im Rahmen der Qualitätsbetrachtung bevorzugt die Qualität der Eingangsinformation und eher selten der Wert der Information als Kriterium herangezogen wird. Über die einfache Kontrolle besteht darüber hinaus die Möglichkeit Informationen, die das Kriterium nicht erfüllen, aus dem Informationsfluss zu eliminieren.

Am Beispiel eines DGPS-Empfängers, als ein System zur Bestimmung der Position mittels differentiellem GPS, soll die Aufstellung eines Informationsflussdiagramms veranschaulicht werden (Abbildung 5-14). Bei diesem Messverfahren werden an einer ortsfesten Referenzstation, deren Position exakt gegeben ist, die durch Fehler im Atmosphärenmodell und in den Satellitenpositionen auftretende Abweichung zwischen der tatsächlichen und der mit Hilfe von GPS ermittelten Position bestimmt und als Korrekturdaten an den mobilen Empfänger gesendet. Mit den vom DGPS-Empfänger empfangenen GPS-Signalen (1) und Korrekturdaten (2) wird die DGPS-Position (9) berechnet. Das Verfahren führt im Wesentlichen zu einer Steigerung der Positionsgenauigkeit von ca. 10 m für GPS auf ca. 1 m für DGPS.

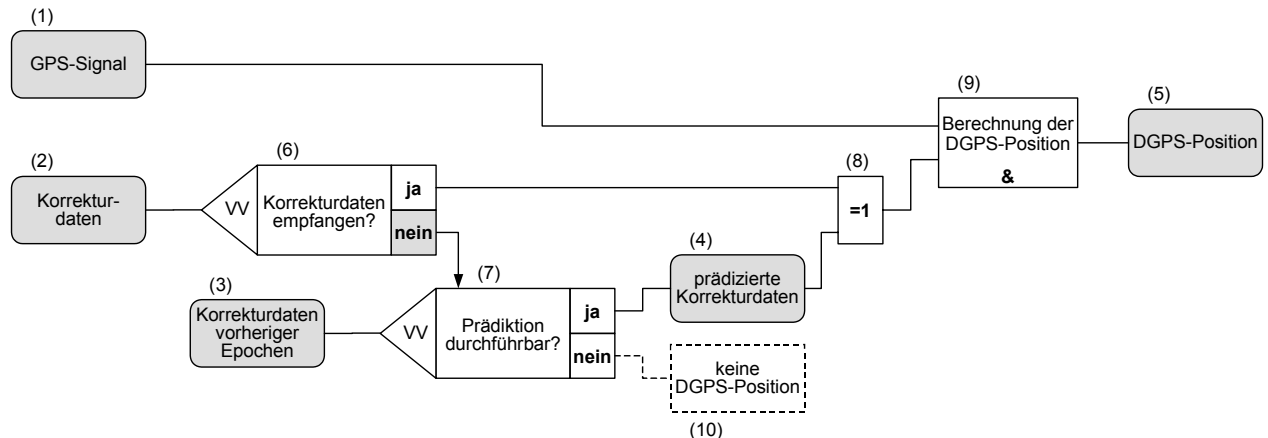


Abbildung 5-14: Informationsflussdiagramm für die Bestimmung einer DGPS-Position

Hinsichtlich der Korrekturdaten ist das System so modelliert, dass in den Fällen, in denen keine Korrekturdaten (2) vorliegen, aus den Korrekturdaten der vorherigen Epochen (3) Korrekturdaten prädiziert werden. Dieser Systemaufbau wird im Informationsflussdiagramm durch zwei einfache Verzweigungen abgebildet. Bei der ersten Verzweigung (6) ergeben sich, abhängig von der Verfügbarkeit der Korrekturdaten, folgende zwei Systemzustände: Sind Korrekturdaten (2) verfügbar werden mit diesen in (9) die DGPS-Position (5) berechnet; sind keine Korrekturdaten verfügbar, dann prädiziert das System in (7) die Korrekturdaten (4) über die Korrekturdaten der vorherigen Epochen (3). Der in (6) durchlaufene Nein-Zweig initiiert damit einen alternativen Informationsfluss. Aufgrund der Abhängigkeit von der Verfügbarkeit der Korrekturdaten der vorherigen

Epochen (3), wird über die zweite Verzweigung (7) berücksichtigt, ob eine Prädiktion überhaupt durchführbar ist. Ist dies der Fall, dann werden die Korrekturdaten prädiziert und mit diesen in (9) die DGPS-Position (5) berechnet. Zur Verknüpfung der disjunkten Systemzustände dient die exklusive ODER-Verknüpfung (8). Ist keine Prädiktion durchführbar, so kann keine DGPS-Position berechnet werden, und der Informationsfluss endet an dieser Stelle. Dies wird über das Kommentarsymbol (10) im Nein-Zweig von (7) angemerkt.

Abschließend soll noch auf zwei wichtige Eigenschaften des Informationsflussdiagramms hingewiesen werden, die eine übersichtliche und effektive Anwendung des Analyseverfahrens unterstützen. Als erstes sind hierzu die Symbole unter Nr. 6 in Tabelle 5-4 zu erwähnen. Diese Symbole gestatten es, den Informationsfluss komplexer Systeme auf mehrere Diagramme zu verteilen. Der Übertrag-Ausgang zeigt an, dass in einem Folgediagramm der Informationsfluss an der Stelle mit dem korrespondierenden Übertrag-Eingang fortgesetzt wird.

Die zweite nützliche Eigenschaft ist die Möglichkeit einer modularen Strukturierung des Systems. Es ist somit nicht notwendig, das gesamte System in einem Informationsflussdiagramm zu behandeln. Der modulare Aufbau gestattet es, Systemkomponenten in einem eigenen Informationsflussdiagramm zu behandeln und bei der Analyse des gesamten Systems diese dann als Eingangsinformationen oder Systemkomponenten in das Informationsflussdiagramm einzubinden. Aus dem modularen Aufbau ergeben sich neben einer übersichtlicheren Darstellung die weiteren Vorteile:

- Systemkomponenten, die bereits im Rahmen einer anderen Analyse behandelt wurden, können übernommen werden.
- Häufig benötigte Systemkomponenten können in Form einer Systemkomponentenbank vorgehalten werden.
- Die Modellierung des Informationsflusses kann auf einen für die Anwendung zweckmäßigen Abstraktionsgrad beschränkt werden.

Die Möglichkeit der modularen Strukturierung des Informationsflusses kann dabei ebenso im rechnerischen Teil des Analyseverfahrens (Kapitel 5.4.4) genutzt werden.

### 5.4.3 Abhängigkeiten zwischen den Qualitätsmerkmalen im Informationsfluss

Gemäß dem in Kapitel 5.3 aufgestellten Qualitätsmodell ist die Qualität einer Information durch den dort festgesetzten Satz von sechs Qualitätsmerkmalen zu beschreiben, wobei für alle auftretenden Informationen generell derselbe Satz von Qualitätsmerkmalen anzuwenden ist. Diesem Grundsatz folgend sind somit sämtliche innerhalb des Systems auftretenden Informationen ebenso mit diesem festgelegten Satz von Qualitätsmerkmalen zu behandeln wie die in das System eingehenden und die vom System ausgehenden Informationen.

Im Gegensatz zu den standardisierten Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse, bei der als einziges Merkmal die Zuverlässigkeit auftritt, müssen bei dem Analyseverfahren zur Informationsqualität prinzipiell für sämtliche Informationen im Informationsflussdiagramm jeweils alle sechs Qualitätsmerkmale behandelt werden. Eine direkte Übertragbarkeit der in der Zuverlässigkeitsanalyse angewandten Rechenverfahren ist somit nicht gegeben. Ebenso scheidet, aufgrund bestehender

Abhängigkeiten zwischen den Qualitätsmerkmalen, eine streng separierte Auswertung der einzelnen Qualitätsmerkmale aus. Für eine vollständige und korrekte Analyse der Informationsqualität ist es unerlässlich, die innerhalb des Informationsflusses bestehenden Abhängigkeiten zwischen den Qualitätsmerkmalen zu berücksichtigen.

Schwerpunkt der folgenden Betrachtungen ist die Zusammenstellung und Diskussion der bestehenden Abhängigkeit zwischen den Qualitätsmerkmalen, wobei hier insbesondere die an den Applikationen im Informationsflussdiagramm existierenden Übergänge zwischen den einzelnen Qualitätsmerkmalen der Eingangs- und Ausgangsinformationen behandelt werden. Dazu wird im Vorfeld eine Übersicht der grundsätzlich unterscheidbaren Applikationsformen gegeben. Im Ergebnis findet sich eine Aufstellung der in der Realität häufig auftretenden Übergänge zwischen den Qualitätsmerkmalen. Die Erkenntnisse haben maßgeblich Einfluss auf die in Kapitel 5.4.4 folgende Formulierung des Rechenverfahrens und dessen praktische Durchführung.

**Applikationsformen:** Neben der Information bildet die Applikation ein wesentliches Grundelement des Informationsflussdiagramms. Die Applikation verkörpert ein Objekt, in das Informationen eingehen und von dem Informationen ausgehen. Es lassen sich dabei die folgenden grundlegenden Applikationen unterscheiden:

- **Erfassung**
- **Verwendung**
- **Verzweigung**
- **Verarbeitung**
- **Übertragung**
- **Kontrolle**

Die **Kontrolle** und die **Verzweigung** repräsentieren Applikationen, bei denen der Informationsfluss in Abhängigkeit der Erfüllung eines Prüfkriteriums in alternative Informationszweige aufgespalten wird. Darüber hinaus beinhaltet die Kontrolle die Möglichkeit Informationen, die eine bestimmte Forderung an ein Qualitätsmerkmal nicht erfüllen, zu eliminieren und damit aus der weiteren Informationsprozessierung auszuschließen.

Alle Applikationen, bei denen etwas gemessen wird, werden der Applikation **Erfassung** zugeordnet. Die Erfassung tritt nie innerhalb, sondern nur am Beginn des Informationsflusses auf. Ebenso fließen in aller Regel keine Informationen ein. Im Rahmen des Analyseverfahrens wird die Erfassung genutzt, um Eigenschaften von Systemkomponenten, wie z.B. die Ausfallrate eines Sensors oder Abhängigkeit des Sensors von Umgebungseinflüssen, als qualitätsbildende Eingangsgrößen zu modellieren.

Die wichtigste Applikation bei der Modellierung des Informationsflusses bildet die **Verarbeitung**. Es handelt sich hierbei um eine Applikation, innerhalb der die eingehenden Informationen zu einer neuen Information verarbeitet werden. Hinsichtlich der bestehenden Abhängigkeiten zwischen den Qualitätsmerkmalen ist dieser Applikationsform eine besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Die beiden Applikationen **Verwendung** und **Übertragung** besitzen die Besonderheit, dass im Normalfall nur eine Information eingeht und die Eingangs- und Ausgangsinformation identisch ist. Die Übertragung wird zur Modellierung der Kommunikation von Informationen angewendet. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 5-15. Damit lassen sich die Auswirkungen des Kommunikationsmediums auf die Verfügbarkeit, Vollständigkeit, Konsistenz, Korrektheit und Aktualität der übertragenen Information berücksichtigen. Die Applikation Verwendung wird bevorzugt angewandt, um im Informationsfluss den Einfluss der Zeit auf die Aktualität der Information zu modellieren.

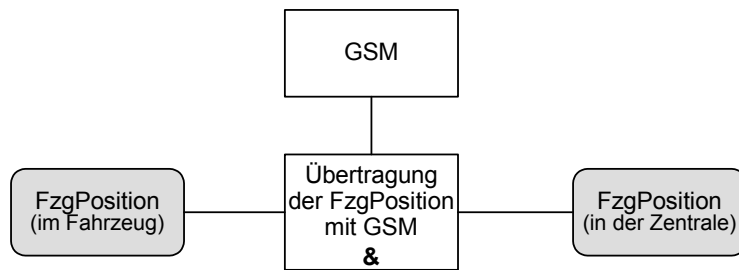


Abbildung 5-15: Applikationsform Übertragung am Beispiel der Übermittlung der Fahrzeugposition mittels GSM

Im Gegensatz zu der Kontrolle und der Verzweigung, bei denen das Symbol eindeutig Aufschluss über die vorliegende Applikationsform gibt, ist bei den anderen Applikationsformen keine graphische Unterscheidung gegeben. So werden in der Aufstellung des Informationsflussdiagramms für die vier Applikationsformen Erfassung, Verarbeitung, Verwendung und Übertragung immer die Symbole der Nummer 3 in Tabelle 5-4 genutzt. Eine Identifikation der Applikationsform muss sich aus dem Kontext und dem Beschriftungstext der Applikation ergeben.

**Abhängigkeiten zwischen den Qualitätsmerkmalen:** Ausgehend von den beschriebenen Applikationsformen soll die Verbindung der Qualitätsmerkmale zum Informationsflussdiagramm und besonders die daraus wirkenden Abhängigkeiten und resultierenden Übergänge zwischen den Qualitätsmerkmalen betrachtet werden. Aufgrund des sehr engen Zusammenhangs zwischen den beiden Qualitätsmerkmalen Verfügbarkeit und Vollständigkeit – beide Qualitätsmerkmale beschreiben die Existenz der Information (s. S. 82) – werden im Rahmen des Analyseverfahrens die beiden Qualitätsmerkmale Verfügbarkeit und Vollständigkeit zu dem Qualitätsmerkmal **Vollständige Verfügbarkeit** zusammengefasst. Die Vollständige Verfügbarkeit repräsentiert das wichtigste Merkmal innerhalb des Analyseverfahrens und hat dabei keinen direkten Einfluss auf ein anderes Qualitätsmerkmal. Bei jeder Applikationsform überträgt sich ein Fehler hinsichtlich der Vollständigen Verfügbarkeit in der Eingangsinformation auf die Vollständige Verfügbarkeit der Ausgangsinformation. Eine indirekte Einflussnahme auf andere Qualitätsmerkmale zeigt sich u.a., wenn aufgrund fehlender Redundanzen die Korrektheit einer Information nicht geprüft werden kann oder wenn eine Information zur Aktualisierung nicht zur Verfügung steht und damit die Gefahr einer Aktualitätsverletzung besteht. Derartige Phänomene lassen sich über eine entsprechende Modellierung des Informationsflusses unter Zuhilfenahme von Verzweigungen behandeln (vgl. Verzweigung (6) in Abbildung 5-14).

Bei den Applikationsformen Übertragung und Verwendung überträgt sich eine Verletzung der **Konsistenz** in der Eingangsinformation auf die Konsistenz der Ausgangsinformation. Für die Applikationsform Verarbeitung gilt dies nicht. Bei dieser Applikationsform führt eine inkonsistente Information dazu, dass die Information nicht verarbeitet und somit die Ausgangsinformation nicht bereitgestellt werden kann. Ebenso kann die Inkonsistenz als ein grober Fehler wirken (z.B. falsche Einheit) und dadurch in einer unkorrekten Ausgangsinformation resultieren. Bei der Analyse der Informationsqualität ist somit zu berücksichtigen, dass sich bei der Applikation Verarbeitung ein Konsistenzfehler in der Eingangsinformation auf die Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit der Ausgangsinformation überträgt. Eine Übertragung der Inkonsistenz der Eingangsinformation

auf die Konsistenz der Ausgangsinformation kann im Falle einer Verarbeitung der Informationen hingegen ausgeschlossen werden.

Das Qualitätsmerkmal **Korrektheit** wirkt bei jeder Applikationsform auf die Korrektheit. Eine Ausnahme bildet die Kontrolle. Da diese Applikationsform insbesondere dazu verwendet wird unkorrekte Informationen aus dem weiteren Informationsfluss zu eliminieren, hat die Korrektheit einen entscheidenden Einfluss auf die Vollständige Verfügbarkeit. Der Zusammenhang wird über die einfache Kontrolle im Informationsfluss modelliert und ist dadurch in der rechnerischen Auswertung explizit enthalten. Wird bei der Applikationsform Kontrolle die Konsistenz bzw. Aktualität als Kontrollkriterium genutzt, gilt dies analog.

Bei der **Aktualität** ist wie bei der Konsistenz die Applikationsform Verarbeitung von besonderer Bedeutung. Davon ausgehend, dass die Qualitätsbeurteilung der erzeugten Information unmittelbar nach dem Verarbeitungsprozess erfolgt, muss die ausgegebene Information stets als aktuell angesehen werden. Eine veraltete Eingangsinformation kann damit nicht zu einer Aktualitätsverletzung führen. Der Fehler aufgrund der Aktualitätsverletzung pflanzt sich vielmehr in Form einer Verletzung der Korrektheit in die Ausgangsinformation fort. Bei der Verarbeitung findet somit ein Übergang von der Aktualität zur Korrektheit statt.

Bei der **Genauigkeit** zeigt sich bei der Analyse der Informationsqualität keine direkte Einflussnahme auf die anderen Qualitätsmerkmale.

**Ergebnis:** Eine Übersicht der am häufigsten auftretenden und im Rahmen des rechnerischen Teils des Analyseverfahrens zu berücksichtigenden Übergänge zwischen den Qualitätsmerkmalen zeigt Abbildung 5-16. Als wesentliche Ergebnisse im Hinblick auf die analytische Bewertung der Informationsqualität sind folgende Punkte festzuhalten:

- Die Genauigkeit hat keinen Einfluss auf ein anderes Qualitätsmerkmal und wird durch kein anderes Qualitätsmerkmal direkt beeinflusst. Die Genauigkeit kann somit separat behandelt werden.
- Die Konsistenz und Aktualität beeinflussen bei Applikationen, innerhalb derer Informationen verarbeitet werden, die Vollständige Verfügbarkeit und die Korrektheit. Damit endet die Betrachtung der Konsistenz und Aktualität generell bei der Applikationsform Verarbeitung.
- Die Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit haben keinen direkten Einfluss auf andere Qualitätsmerkmale. Bei der Analyse ist jedoch zu beachten, dass die Konsistenz und die Aktualität einen erheblichen Einfluss auf diese beiden Merkmale haben. Ferner ist zu berücksichtigen, dass sich durch Verzweigungen und Kontrollen häufig Abhängigkeiten zwischen der Vollständigen Verfügbarkeit und der Korrektheit ergeben.

Insbesondere bei der Applikation Verknüpfung sind die weiteren im Einzelfall bestehenden Abhängigkeiten und Übergänge möglich, die in der Analyse des Systems identifiziert und in der Modellierung entsprechend berücksichtigt werden müssen.

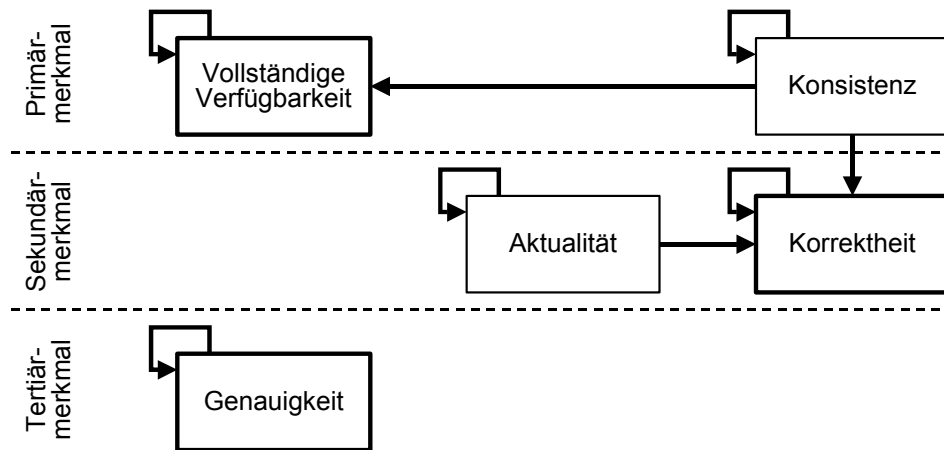


Abbildung 5-16: Auftretende Übergänge der Qualitätsmerkmale bei der Betrachtung der Informationsqualität im Informationsfluss

#### 5.4.4 Ein Rechenverfahren zur Bewertung der Informationsqualität

Das im Folgenden beschriebene Rechenverfahren dient der Auswertung von Informationsflussdiagrammen und führt im Ergebnis zu einer analytischen Bewertung der Informationsqualität über den gesamten Informationsfluss. Es handelt sich hierbei um ein probabilistisches Auswertungsverfahren. Als Rechengröße wird die Wahrscheinlichkeit für die Erfüllung der gestellten Forderung an das Qualitätsmerkmal genutzt und wird im weiteren Verlauf auch als Qualitätsgröße bezeichnet. Ziel des Rechenverfahrens ist die Berechnung der Qualität der von einem informationsverarbeitenden System erzeugten Information in Abhängigkeit der Qualität der eingehenden Daten und Informationen und der zugrunde gelegten Informationsverarbeitung.

Die rechnerische Auswertung erfolgt gemäß der Booleschen Algebra. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wird dabei eine weitgehend sequentielle Auswertung der einzelnen Qualitätsmerkmale angestrebt. Unter Einbeziehung der im vorherigen Kapitel behandelten Zusammenhänge und Übergänge zwischen den Qualitätsmerkmalen lässt sich die Auswertung des Informationsflussdiagramms in die folgenden sechs Schritte einteilen:

- 1. Auswertung der Konsistenz** an den Stellen im Informationsflussdiagramm, an denen Informationen von einer Systemkomponente in eine andere übergehen und bei denen aufgrund einer Informationsverarbeitung Auswirkungen auf die Vollständige Verfügbarkeit und die Korrektheit zu erwarten sind.
- 2. Auswertung der Aktualität** an den Stellen im Informationsflussdiagramm, an denen erfasste, berechnete oder genutzte Informationen eingehen, deren Entstehung eine gewisse Zeit zurückliegt und somit die Gefahr einer Verletzung der Aktualität besteht. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt bei Applikationen, bei denen die eingehenden Informationen zu neuen Informationen verarbeitet werden.
- 3. Auswertung der Vollständigen Verfügbarkeit** über das gesamte Informationsflussdiagramm unter Einbeziehung der Einflüsse der Konsistenz (aus Schritt 1) auf die Vollständige Verfügbarkeit.



4. **Auswertung der Korrektheit** über das gesamte Informationsflussdiagramm unter Einbeziehung der Einflüsse der Konsistenz und der Aktualität (aus Schritt 1 und 2) auf die Korrektheit.
5. **Auswertung der Genauigkeit** erfolgt mit den bekannten Methoden der Fehlerfortpflanzung und Ausgleichsrechnung. Die eingehenden und berechneten Standardabweichungen können in derselben Art und Weise wie die Wahrscheinlichkeitswerte zu den anderen Qualitätsmerkmalen im Informationsflussdiagramm protokolliert werden.
6. **Zusammenstellung der Ergebnisse in einem Qualitätstupel**, entsprechend dem in Kapitel 5.3.1 festgelegten Satz von Qualitätsmerkmalen. Dabei können im Bedarfsfall einzelne, für die Qualitätsbetrachtung unrelevante bzw. unbehandelte Qualitätsmerkmale ausgeklammert werden.

Von dem dargestellten Ablauf muss geringfügig abgewichen werden, wenn die Korrektheit oder die Genauigkeit Einfluss auf die Vollständige Verfügbarkeit haben. Dies gilt insbesondere bei der Verzweigungsform „einfache Kontrolle“. In diesen Fällen kann die Auswertung des Symbols hinsichtlich der Vollständigen Verfügbarkeit erst vorgenommen werden, wenn die Korrektheit bzw. Genauigkeit für die in die Verzweigung eingehenden Informationen berechnet bzw. gegeben sind.

### Beispiel

Der Ablauf der Auswertung eines Informationsflussdiagramms soll anhand eines Beispiels veranschaulicht werden. Das zu untersuchende System besteht dabei aus einer einzigen Applikation, die aus der eingehenden Länge  $a$  und Breite  $b$  die Fläche  $F$  des Rechtecks berechnet (Abbildung 5-12). Mit der vorliegenden UND-Verknüpfung berechnet sich nach (5-10) und (5-15) die Qualitätsgröße der Ausgangsinformation durch die Multiplikation der Qualitätsgrößen der Eingangsinformationen.

**1. Auswertung der Konsistenz:** Die Betrachtung der Konsistenz konzentriert sich im Wesentlichen auf die Stellen im Informationsfluss, an denen Informationen verarbeitet werden. Bei der einen im Informationsfluss auftretenden Applikation liegt eine solche Applikationsform vor. Um den Einfluss der Konsistenz zu betrachten, wird im Rahmen der Auswertung der Konsistenz eine „gedankliche“ Erweiterung des Informationsflusses vorgenommen (vgl. Abbildung 5-17). Die Darstellung bringt zum Ausdruck, dass eine Inkonsistenz erst mit der Übernahme der Information in das Subsystem zur Informationsverarbeitung auftritt. Unter der Annahme, dass die Konsistenz der Eingangsinformation in  $10^{-4}$  der Fälle nicht gewahrt ist, ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass eine konsistente Länge  $a$  in der Flächenberechnung verwendet wird zu

$$p(x_a, \text{IK}) = p(x_{a'}, \text{IK}) \cdot p(x_{\text{Appli}}, \text{IK}) = 1,0 \cdot 0,9999 = 0,9999 \quad (5-17)$$

Im weiteren Verlauf wird hierfür die verkürzte Schreibweise

$$p(x_a, \text{IK}) = 0,9_4 \quad (5-18)$$

angewendet, bei der die tiefergestellte Ziffer die Anzahl der Wiederholungen der vorangestellten Ziffer angibt. Für die Breite  $b$  ergibt sich die Qualitätsgröße  $p(x_b, \text{IK}) = 0,9_4$  analog.

**2. Auswertung der Aktualität:** Unter der Annahme, dass die beiden Größen  $a$  und  $b$  unmittelbar vor dem Verarbeitungsprozess zur Berechnung der Fläche ermittelt werden, kann auf eine Auswertung der Aktualität an dieser Stelle verzichtet werden.

**3. Auswertung der Vollständigen Verfügbarkeit:** Bei der Auswertung der Vollständigen Verfügbarkeit ist der Einfluss der Konsistenz zu berücksichtigen und wird durch die Ergänzung des Informationsflussdiagramms mit dem Übergangssymbol kenntlich gemacht (vgl. Abbildung 5-19). Die dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten werden von der in Schritt 1 durchgeführten Auswertung der Konsistenz übernommen. Die Wahrscheinlichkeit, eine vollständig verfügbare Ausgangsinformation zu erhalten, ergibt sich bei einer Vollständigen Verfügbarkeit der Eingangsinformationen von  $p(x_a, VV) = p(x_b, VV) = 0,9_3$  zu:

$$\begin{aligned} p(x_F, VV) &= (p(x_a, VV) \cdot p(x_a, IK)) \cdot (p(x_b, VV) \cdot p(x_b, IK)) \\ &= (0,9_3 \cdot 0,9_4) \cdot (0,9_3 \cdot 0,9_4) \approx 0,998 \end{aligned} \quad (5-19)$$

**4. Auswertung der Korrektheit:** Die Auswertung der Korrektheit erfolgt analog zur Auswertung der Vollständigen Verfügbarkeit. Hierbei ist ebenso der Einfluss der Konsistenz auf die Korrektheit zu berücksichtigen (Abbildung 5-20). Die Korrektheit der Fläche  $F$  errechnet sich über folgende Systemfunktion:

$$\begin{aligned} p(x_F, IR) &= (p(x_a, IR) \cdot p(x_a, IK)) \cdot (p(x_b, IR) \cdot p(x_b, IK)) \\ &= (0,99 \cdot 0,9_4) \cdot (0,99 \cdot 0,9_4) \approx 0,980 \end{aligned} \quad (5-20)$$

Dabei wird von einer Wahrscheinlichkeit der Erfüllung der Korrektheitsforderung der Eingangsinformationen von jeweils 99% ausgegangen.

**5. Auswertung der metrischen Genauigkeit:** Bei der metrischen Genauigkeit wird nicht die Wahrscheinlichkeit der Erfüllung der Forderung an die metrische Genauigkeit, sondern die Standardabweichung der Information als Qualitätsgröße genutzt. Gemäß dem Fehlerfortpflanzungsgesetz kann über den gegebenen funktionalen Zusammenhang

$$F(a, b) = a \cdot b \quad (5-21)$$

die Standardabweichung der Fläche  $s_F$  in Abhängigkeit der Standardabweichungen der Seitenlängen  $s_a$  und  $s_b$  berechnet werden:

$$s_F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial a}\right)^2 \cdot s_a^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial b}\right)^2 \cdot s_b^2} = \sqrt{b^2 \cdot s_a^2 + a^2 \cdot s_b^2} \quad (5-22)$$

Unter der Annahme einer mittleren Seitenlänge von ca. 100 Metern und einer Standardabweichung der Streckenmessung von  $s_a = s_b = 5$  cm ergibt sich die Standardabweichung der Fläche zu  $s_F = 0,7 \text{ m}^2$ . Auf eine tiefer gehende Betrachtung zur rechnerischen Auswertung der metrischen Genauigkeit wird an dieser Stelle verzichtet und auf die einschlägige Literatur zur Fehler- und Ausgleichsrechnung verwiesen (u.a. HÖPCKE 1980 und REISSMANN 1980). Die Ergebnisse der rechnerischen Auswertung zur metrischen Genauigkeit lassen sich in gleicher Weise zu den anderen Qualitätsmerkmalen im Informationsflussdiagramm angeben (vgl. Abbildung 5-18). Man erhält hierdurch eine konforme Darstellung der Qualitätsanalyse.

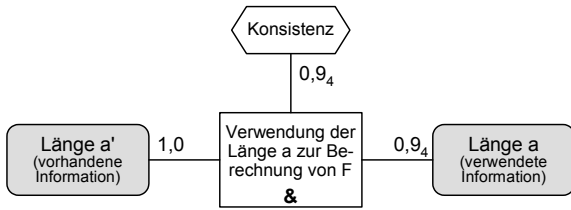


Abbildung 5-17: Auswertung der Konsistenz

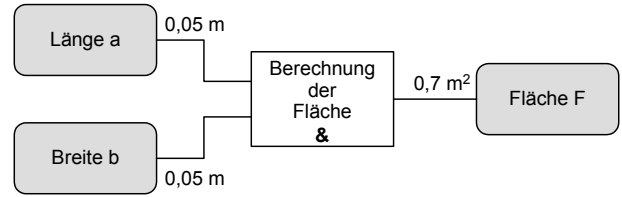


Abbildung 5-18: Auswertung der metrischen Genauigkeit

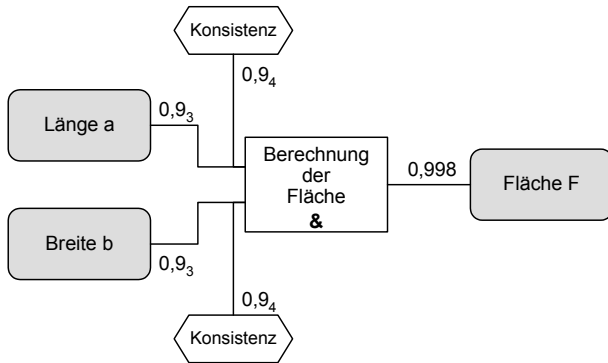


Abbildung 5-19: Auswertung der Vollständigen Verfügbarkeit

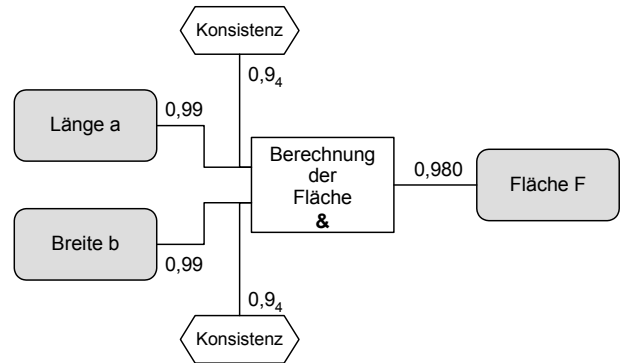


Abbildung 5-20: Auswertung der Korrektheit

**6. Ergebnis:** Die in den Auswerteschritten 3 bis 5 ermittelten Qualitätsgrößen zu der Vollständigen Verfügbarkeit, der Korrektheit und der metrischen Genauigkeit werden in dem Qualitätstupel  $Q_F$  zusammengestellt:

$$Q_F = (p(x_F, VV); p(x_F, IR); s_F) = (0,998; 0,980; 0,7 \text{ m}^2) \tag{5-23}$$

Auf eine Darstellung der Konsistenz und der Aktualität wird verzichtet. Durch die unmittelbar vor der Ausgabe der berechneten Fläche  $F$  erfolgende Informationserzeugung von  $a$  und  $b$  ist die Aktualität gegeben. Bei der Konsistenz wird davon ausgegangen, dass das System die berechnete Fläche entsprechend der im Informationsmodell spezifizierten Form ausgibt und somit die Konsistenz erfüllt ist. Das Qualitätstupel bildet das Ergebnis und den Abschluss der rechnerischen Auswertung des Informationsflussdiagramms.

**5.4.4.1 Zeichen und Symbole**

Vor der Betrachtung der einzelnen Verknüpfungs- und Verzweigungsformen und der Herleitung der Berechnungsvorschriften werden die darin verwendeten Zeichen und Symbole festgesetzt. Bei den Qualitätsgrößen, die die Wahrscheinlichkeit der Erfüllung der Forderung an ein Qualitätsmerkmal angeben, werden die folgenden Symbole unterschieden:

- $E^{QM(i)} \equiv p(E, QM(i))$       Wahrscheinlichkeit der Erfüllung der Forderung des behandelnden Qualitätsmerkmals  $QM(i)$  der Eingangsinformation  $E$
- $A^{QM(i)} \equiv p(A, QM(i))$       Wahrscheinlichkeit der Erfüllung der Forderung des behandelnden Qualitätsmerkmals  $QM(i)$  der Ausgangsinformation  $A$

$$Z_{\text{ja}}^{QM(i)} \equiv p(Z_{\text{ja}}, QM(i)) \quad \text{Wahrscheinlichkeit für die Fortsetzung des Informationsflusses im Ja-Zweig}$$

$$Z_{\text{nein}}^{QM(i)} \equiv p(Z_{\text{nein}}, QM(i)) \quad \text{Wahrscheinlichkeit für die Fortsetzung des Informationsflusses im Nein-Zweig}$$

Zur Bezeichnung des behandelten Qualitätsmerkmals  $QM(i)$  werden die nachstehenden Abkürzungen genutzt:

VV ... Vollständige Verfügbarkeit      IK.... Konsistenz      GM... metrische Genauigkeit  
 IR.....Korrektheit                      ZA... Aktualität

Die fünf Qualitätsmerkmale bilden in der angegebenen Reihenfolge die Qualitätsmerkmalmenge  $QM$ :

$$QM = \{QM(i) \mid 1 \leq i \leq 5\} = \{VV, IK, ZA, IR, GM\} \quad (5-24)$$

wobei die Reihenfolge der in Kapitel 5.3.1.4 getroffenen hierarchischen Gliederung der Qualitätsmerkmale entspricht. Infolge der auftretenden Übergänge bei der Betrachtung der Qualitätsmerkmale und in Abhängigkeit des Verzweigungskriteriums treten in den Rechenformeln oftmals die Qualitätsmerkmale gemischt auf. Zur Unterscheidung und als Hinweis auf deren Bedeutung werden die Qualitätsmerkmale im weiteren Verlauf nicht mehr mit  $i$  sondern mit den nachstehenden Zeichen indiziert:

$$q \dots \text{Index für das behandelte Qualitätsmerkmal} \quad (5-25)$$

$$p \dots \text{Index für das Qualitätsmerkmal, das als Verzweigungskriterium dient}$$

Voraussetzung für die Anwendung der Systemfunktion zur analytischen Beschreibung der Informationsqualität im Informationsfluss ist die stochastische Unabhängigkeit der Eingangsinformationen hinsichtlich ihrer Informationsqualität. Ist dies nicht gegeben, so dürfen die im weiteren Verlauf vorgestellten Formeln nicht oder nur in eingeschränkter Form angewendet werden.

#### 5.4.4.2 UND-Verknüpfung

Die UND-Verknüpfung bildet die am häufigsten auftretende Verknüpfungsform. Dabei werden alle Eingangsinformationen zur Generierung der Ausgangsinformation benötigt. In der reellen algebraischen Schreibweise ergibt sich die Wahrscheinlichkeit der Ausgangsinformation durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten der  $n$  Eingangsinformationen:

$$A^{QM(q)} = \prod_{i=1}^n E_i^{QM(q)} \quad \text{für } 1 \leq q \leq 4 \quad (5-26)$$

Im Gegensatz zu den meisten nachfolgenden Verknüpfungsformen gilt dieser Zusammenhang für alle Qualitätsmerkmale. Falls nicht anders angegeben, wird bei der Auswertung des Informationsflussdiagramms generell von einer UND-Verknüpfung und der damit verbundenen Multiplikation der eingehenden Wahrscheinlichkeiten ausgegangen. Dies betrifft insbesondere die Berücksichtigung der Übergänge zwischen den Qualitätsmerkmalen (vgl. u.a. Abbildung 5-19 und 5-20).

### 5.4.4.3 ODER-Verknüpfung

Im Bereich der Zuverlässigkeitsanalyse dient die ODER-Verknüpfung zur Beschreibung der technischen Verfügbarkeit einer heißen bzw. aktiven Redundanz. Übertragen auf die Analyse der Informationsqualität bedeutet diese Form der Redundanz, dass beim Ausfall einer Eingangsinformation auf die nächste Eingangsinformation zurückgegriffen wird. Der Ausfall ist dabei einzig und allein abhängig von der Vollständigen Verfügbarkeit der Eingangsinformation. Ein Vergleich, der die Information auf die Korrektheit oder Genauigkeit hin überprüft, ist in dieser Verknüpfungsform nicht enthalten. Für die Vollständige Verfügbarkeit ergibt sich die Systemfunktion damit in analoger Form zur Bestimmung der technischen Verfügbarkeit von Parallelsystemen zu

$$A^{VV} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - E_i^{VV}) \quad (5-27)$$

Für die übrigen Qualitätsmerkmale ergibt sich die Wahrscheinlichkeit der Ausgangsinformation als gewichtetes arithmetisches Mittel der Wahrscheinlichkeiten der  $n$  Eingangsinformationen, wobei die Gewichtung von der Vollständigen Verfügbarkeit abhängt. Allgemein gilt:

$$A^{QM(q)} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{E_i^{VV}}{\sum_{j=1}^n E_j^{VV}} \cdot E_i^{QM(q)} \right) \quad \text{für } 2 \leq q \leq 4 \quad (5-28)$$

Die Gewichtung der Wahrscheinlichkeit des behandelten Qualitätsmerkmals ist notwendig, da eine Information mit einer hohen Vollständigen Verfügbarkeit häufiger genutzt wird und somit deren Wahrscheinlichkeit für die Erfüllung der Korrektheitsforderung ein größeres Gewicht besitzt als eine Information mit einer geringen Vollständigen Verfügbarkeit.

### 5.4.4.4 mvn-Verknüpfung

Die mvn-Verknüpfung entspricht einem einfachen mvn-System bzw. einer Majoritätsredundanz, bei der das Ergebnis der Mehrheit  $m$  der  $n$  Systemeingänge auf den Ausgang übertragen wird (MEYNA 1994). Im Rahmen der Analyse der Informationsqualität wird von einer Überprüfung der Korrektheit unter folgenden Annahmen ausgegangen:

- Zwei oder mehr Informationen, die in den Grenzen der metrischen Genauigkeit denselben Wert haben, werden als korrekt angesehen. Dies verlangt eine derartige Streuung von fehlerhaften Informationen, dass unkorrekte Informationswerte nicht zu dicht benachbart liegen.
- Der Vergleich der Informationen bildet einen Verarbeitungsprozess. Deshalb sind die Einflüsse der Konsistenz und Aktualität in Form von Qualitätsübergängen in der Korrektheit und der Vollständigen Verfügbarkeit der Eingangsinformationen zu berücksichtigen (entsprechend den zu Beginn des Kapitels 5.4.4 beschriebenen Auswerteschritten 3 und 4). Die rechnerische Auswertung der mvn-Verknüpfung beschränkt sich somit auf die beiden Qualitätsmerkmale Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass mehr als eine funktionsfähige Information gefordert ist (d.h.  $m \geq 2$ ). Die 1vn-Verknüpfung wird separat in Kapitel 5.4.4.5 behandelt. Unter Berücksichtigung der obigen Annahme werden die nachstehenden Regeln für die mvn-Verknüpfung aufgestellt:

- (1) Sind  $m$  oder mehr Informationen vollständig verfügbar und haben in den Grenzen der metrischen Genauigkeit denselben Wert, so ist die Korrektheit zu 100% erfüllt.
- (2) Sind  $m$  oder mehr Informationen vollständig verfügbar und streuen die Werte derart, dass keine übereinstimmende Information gefunden werden kann (diese ist gleichbedeutend mit eine oder keine Information ist korrekt), so werden die verfügbaren Informationen eliminiert. Die Ausgangsinformation ist damit nicht vollständig verfügbar.

Gemäß der Regel (2) wird bei der mvn-Verknüpfung nur dann eine Ausgangsinformation erzeugt, wenn sich in der enthaltenen Kontrolle  $m$  oder mehr übereinstimmende Werte zeigen. Unter Berücksichtigung der Regel (1) bedeutet dies, dass bei einer vollständig verfügbaren Ausgangsinformation die Erfüllung der Korrektheitsforderung zu 100% erfüllt ist. Somit ergibt sich die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Ausgangsinformation zu

$$A^{\text{IR}} = 1 \quad (5-29)$$

Bei der Vollständigen Verfügbarkeit ist zu beachten, dass hierfür nicht nur  $m$  oder mehr Eingangsinformationen vollständig verfügbar sein müssen, sondern zusätzlich noch mindesten zwei der vollständig verfügbaren Informationen die Korrektheitsforderungen erfüllen. Die Wahrscheinlichkeit für eine vollständig verfügbare Ausgangsinformation bei genau  $k \in [m..n]$  vollständig verfügbaren Eingangsinformationen lässt sich über folgendes Produkt formulieren:

$$A_{k,n}^{\text{VV}} = p(E(k,n), \text{VV}) \cdot p(E(2vk), \text{IR}) = p_{k,n}^{\text{VV}} \cdot p_{2vk}^{\text{IR}} \quad (5-30)$$

Der erste Koeffizient gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass von den  $n$  Eingangsinformationen genau  $k$  vollständig verfügbar sind. Über den zweiten Koeffizient wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der das System in einem Zustand anzutreffen ist, bei dem mindestens zwei der vollständig verfügbaren Informationen korrekt sind. Unter der Voraussetzung, dass alle Eingangsinformationen dieselbe Wahrscheinlichkeit in der Erfüllung der Forderungen an die Vollständige Verfügbarkeit bzw. Korrektheit haben, d.h.

$$E^{\text{VV}} = E_i^{\text{VV}} \quad \text{und} \quad E^{\text{IR}} = E_i^{\text{IR}} \quad \forall i = 1..n \quad (5-31)$$

berechnen sich die Koeffizienten zu

$$p_{k,n}^{\text{VV}} = \binom{n}{k} \cdot (E^{\text{VV}})^k \cdot (1 - E^{\text{VV}})^{n-k} \quad \text{mit } k \in [m..n] \quad (5-32)$$

und

$$p_{2vk}^{\text{IR}} = \sum_{j=2}^k p_{2,vj}^{\text{IR}} = \sum_{j=2}^k \binom{k}{j} \cdot (E^{\text{IR}})^j \cdot (1 - E^{\text{IR}})^{k-j} \quad \text{mit } k \in [m..n] \quad (5-33)$$

wobei (5-32) die Dichte der binomialen Verteilung und (5-33) die Verteilungsfunktion der binomialen Verteilung repräsentiert. Die Formeln zur Berechnung der Koeffizienten im Falle unter-

schiedlicher Wahrscheinlichkeiten sind bis maximal fünf Eingangsinformationen in Anhang C aufgeführt.

Gleichung (5-30) gibt die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren Ausgangsinformation für den Systemzustand von genau  $k$  vollständig verfügbaren Eingangsinformationen an. Um nun die gesuchte Wahrscheinlichkeit von mindestens  $m$  vollständig verfügbaren Eingangsinformationen zu erhalten, sind die sich ergebenden Wahrscheinlichkeiten der  $n - m + 1$  disjunkten Systemzustände zu summieren. Im Ergebnis erhält man mit

$$A^{VV} = \sum_{k=m}^n p_{k,n}^{VV} \cdot p_{2vk}^{IR} \quad (5-34)$$

die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren Ausgangsinformation in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit der Erfüllung der Forderungen an die Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit der Eingangsinformationen. Aufgrund der bestehenden Abhängigkeit zwischen der Vollständigen Verfügbarkeit und der Korrektheit ist eine Auswertung erst möglich, wenn für beide Qualitätsmerkmale die Qualitätsgrößen der Eingangsinformationen vorliegen.

#### 5.4.4.5 1vn-Verknüpfung

Die 1vn-Verknüpfung entspricht im Wesentlichen einer mvn-Verknüpfung mit der Besonderheit, dass im Falle von nur einer verfügbaren Information kein Vergleich hinsichtlich der Korrektheit durchgeführt werden kann. In diesem Fall wird die Information mit der dazugehörigen Wahrscheinlichkeit für die Korrektheit auf den Ausgang übertragen.

Für die Vollständige Verfügbarkeit ist die Gleichung (5-34) somit um den Systemzustand von genau einer vollständig verfügbaren Information zu erweitern:

$$A^{VV} = p_{1,n}^{VV} + \sum_{k=2}^n p_{k,n}^{VV} \cdot p_{2vk}^{IR} \quad (5-35)$$

Die Erweiterung berücksichtigt, dass, aufgrund der fehlenden Kontrollmöglichkeit bei nur einer verfügbaren Information, eine fehlerhafte Information nicht eliminiert werden kann. Damit kann bei einer 1vn-Verknüpfung nicht mehr von einer hundertprozentigen Erfüllung der Korrektheit der Ausgangsinformation ausgegangen werden. Die Korrektheit der Ausgangsinformation ist genau dann nicht erfüllt, wenn nur eine Information vollständig verfügbar ist und diese Information die Korrektheitsforderung nicht erfüllt:

$$\bar{A}^{IR} = p(E(1,n), VV) \cdot \bar{p}(E(1v1), IR) = p(E(1,n), VV) \cdot (1 - p(E(1v1), IR)) \quad (5-36)$$

Unter Berücksichtigung der unter (5-31) getroffenen Vereinfachungen ergibt sich mit (5-32) und (5-33) die Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Ausgangsinformation bei der 1vn-Verknüpfung zu

$$\begin{aligned} A^{IR} &= 1 - \bar{A}^{IR} = 1 - p_{1,n}^{VV} \cdot (1 - p_{1v1}^{IR}) \\ &= 1 - p_{1,n}^{VV} \cdot (1 - E^{IR}) \end{aligned} \quad (5-37)$$

Der Unterschied zur ODER-Verknüpfung besteht darin, dass immer dann, wenn mehr als eine Information zur selben Zeit zur Verfügung steht, die sich daraus ergebende Redundanz zur Prüfung der Korrektheit genutzt wird.

#### 5.4.4.6 Einfache Verzweigung

Die Applikation *einfache Verzweigung* wird angewandt, um den Informationsfluss in Abhängigkeit der Erfüllung bzw. Nichterfüllung eines bestimmten Kriteriums zu verzweigen. Als Kriterien kommen der Informationswert und die Wahrscheinlichkeit der Vollständigen Verfügbarkeit der Eingangsinformation zum Einsatz. Bei allen anderen Qualitätsmerkmalen muss zur Prüfung der Forderung an das Qualitätsmerkmal ein Kontrollmechanismus eingesetzt werden. Die Verzweigungen in Abhängigkeit dieser Qualitätsmerkmale werden deshalb über eine eigene Applikation, die *einfache Kontrolle*, in Kapitel 5.4.4.7 behandelt.

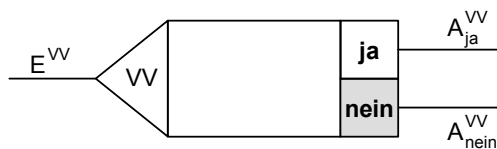


Abbildung 5-21: Einfache Verzweigung zur Aufteilung des Informationsflusses in Abhängigkeit der Vollständigen Verfügbarkeit der Eingangsinformation

Die folgende Herleitung der Formeln zur Auswertung der einfachen Verzweigung beschränkt sich auf die Verwendung der Vollständigen Verfügbarkeit als Verzweigungskriterium. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Nein-Zweig keinen Informationsfluss darstellt, was aufgrund der fehlenden Information auch gar nicht möglich ist, sondern die Wahrscheinlichkeit für den Systemzustand angibt, dass keine Eingangsinformation vorhanden ist. Um dies zu verdeutlichen wird im Informationsflussdiagramm beim Symbol für die einfache Verzweigung der Nein-Ausgang grau hinterlegt (Abbildung 5-21). Die Systemfunktionen zur Bewertung der Vollständigen Verfügbarkeit lauten im Ja-Zweig

$$A_{ja}^{VV} = E^{VV} \quad (5-38)$$

und im Nein-Zweig

$$A_{nein}^{VV} = 1 - E^{VV} \quad (5-39)$$

Aufgrund der Verzweigung in Abhängigkeit der Vollständigen Verfügbarkeit der Eingangsinformation treten bei der Betrachtung der übrigen Qualitätsmerkmale Abhängigkeiten zwischen diesen auf, die bei der Berechnung der Qualitätsgrößen zu berücksichtigen sind. Für die Korrektheit, die im weiteren Verlauf der Herleitung der Formeln als Vertreter für die übrigen Qualitätsmerkmale herangezogen wird, ergibt sich die Wahrscheinlichkeit im Ja-Zweig aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeit für den Systemzustand einer vollständig verfügbaren Eingangsinformation und der Wahrscheinlichkeit einer korrekten Eingangsinformation:

$$\begin{aligned} A_{ja}^{IR} &= p(E(VV)) \cdot p(E(IR)) \\ &= E^{VV} \cdot E^{IR} \end{aligned} \quad (5-40)$$

Der Nein-Zweig beschreibt die Wahrscheinlichkeit des Systemzustands, bei dem keine Information vorliegt. Die Wahrscheinlichkeit am Ausgang der Verzweigung ist dabei unabhängig von der Korrektheit, was aufgrund der Tatsache, dass für eine Information, die nicht vorhanden ist, keine



Aussage über deren Korrektheit getroffen werden kann, auch plausibel ist. Somit ergibt sich bei der rechnerischen Auswertung der Korrektheit mit

$$A_{\text{nein}}^{\text{IR}} = A_{\text{nein}}^{\text{VV}} = 1 - E^{\text{VV}} \quad (5-41)$$

dieselbe Wahrscheinlichkeit im Ausgang des Nein-Zweiges wie für die Vollständige Verfügbarkeit.

Bei den sich ergebenden Werten im Ausgang der einfachen Kontrolle ist zu beachten, dass hier neben Wahrscheinlichkeiten für die Erfüllung der Forderungen an die Qualitätsmerkmale auch Wahrscheinlichkeiten für Systemzustände auftreten. Aufgrund der Wichtigkeit der korrekten Interpretation der Ergebnisse wird deren Bedeutung nochmals zusammenfassend dargestellt:

- $A_{\text{ja}}^{\text{VV}}$  .... Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren Information<sup>1</sup>
- $A_{\text{nein}}^{\text{VV}}$  .... Wahrscheinlichkeit für den Systemzustand einer nicht vollständig verfügbaren Eingangsinformation
- $A_{\text{ja}}^{\text{IR}}$  ..... Wahrscheinlichkeit, dass sich das System im Zustand einer vollständig verfügbaren Eingangsinformation befindet und die Eingangsinformation die Korrektheitsforderung erfüllt
- $A_{\text{nein}}^{\text{IR}}$  .... Wahrscheinlichkeit des Systemzustands einer nicht vollständig verfügbaren Eingangsinformation

#### 5.4.4.7 Einfache Kontrolle

Die *einfache Kontrolle* wird zur Modellierung von Informationsverarbeitungsprozessen genutzt, bei denen Informationen auf die Erfüllung ihrer Qualitätsforderung geprüft werden. Als Verzweigungskriterium kommen dabei alle Qualitätsmerkmale mit Ausnahme der Vollständigen Verfügbarkeit in Frage. Die Vollständige Verfügbarkeit ist mit der oben vorgestellten *einfachen Verzweigung* zu behandeln.

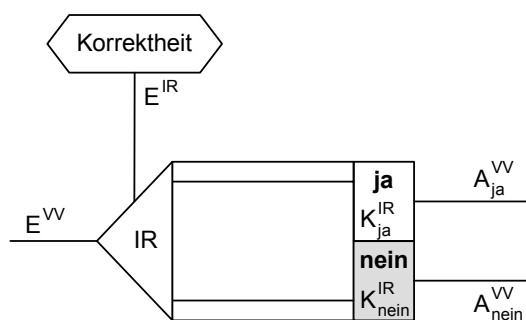


Abbildung 5-22: Bewertung der Vollständigen Verfügbarkeit bei der Applikation einer einfachen Kontrolle zur Prüfung der Korrektheit der Eingangsinformation

<sup>1</sup> Der Wert gibt ebenso die Wahrscheinlichkeit des Systemzustands einer vollständig verfügbaren Eingangsinformation an.

Davon ausgehend, dass Informationen, die die gestellte Qualitätsforderung nicht erfüllen als fehlerhafte Information aus dem weiteren Informationsverarbeitungsprozess ausgeschlossen werden, hat in diesem Fall ein in der Hierarchie tiefer stehendes Qualitätsmerkmal Einfluss auf die Vollständige Verfügbarkeit. Die Wahrscheinlichkeiten  $K_{ja}^{IR}$  und  $K_{nein}^{IR}$  in Abbildung 5-22 geben hierbei die Kontrollgüte an. Bei der Bewertung der Korrektheit, die wiederum als Vertreter der übrigen Qualitätsmerkmale herangezogen wird, bedeutet dies, dass ein Anteil von  $K_{ja}^{IR}$  der Informationen, die die Korrektheitsforderung nicht erfüllen als fehlerhafte Information identifiziert und eliminiert werden. Der Anteil von

$$K_{nein}^{IR} = 1 - K_{ja}^{IR} \quad (5-42)$$

der fehlerhaften Informationen wird in der Kontrolle nicht erkannt und bleibt somit als unkorrekte Information im Informationsfluss enthalten. Bei der einfachen Kontrolle wird von der Annahme ausgegangen, dass keine Information, die die Korrektheitsforderung erfüllt, aufgrund der durchgeführten Kontrolle fälschlicherweise aus dem Informationsfluss eliminiert wird.

Die Vollständige Verfügbarkeit der Ausgangsinformation ist somit nicht allein abhängig von der Vollständigen Verfügbarkeit der Eingangsinformation, sondern zusätzlich von der Korrektheit der Eingangsinformation und der Kontrollgüte der Applikation. Für die praktische Auswertung hat dies zur Konsequenz, dass die Berechnung erst durchgeführt werden kann, wenn die als Verzweigungskriterium genutzte Qualitätsgröße zur Korrektheit für die Eingangsinformation vorliegt. Die Ausgangsinformation ist vollständig verfügbar, wenn die Eingangsinformation vollständig verfügbar ist und die Information nicht aufgrund einer Verletzung der Korrektheit aus dem Informationsfluss ausgeklammert wird. Die Wahrscheinlichkeit

$$p_{elim}^{IR} = (1 - E^{IR}) \cdot K_{ja}^{IR} \quad (5-43)$$

gibt an, dass eine Information aufgrund der Verletzung der Korrektheit eliminiert wird, und berücksichtigt, dass nicht alle fehlerhaften Informationen, sondern nur der durch Kontrollgüte angegebene Anteil  $K_{ja}^{IR}$  der fehlerhaften Informationen eliminiert wird. Für die Vollständige Verfügbarkeit im Ja-Zweig gilt somit:

$$\begin{aligned} A_{ja}^{VV} &= E^{VV} \cdot (1 - p_{elim}^{IR}) = E^{VV} \cdot (1 - (1 - E^{IR}) \cdot K_{ja}^{IR}) = E^{VV} \cdot (1 - K_{ja}^{IR} + K_{ja}^{IR} \cdot E^{IR}) \\ &= E^{VV} \cdot (K_{ja}^{IR} \cdot E^{IR} + K_{nein}^{IR}) \end{aligned} \quad (5-44)$$

Der Nein-Zweig, der den Systemzustand angibt, in dem keine Information am Ausgang verfügbar ist, bildet das Komplementär zum Ja-Zweig und ergibt sich somit über die Negation von (5-44):

$$\begin{aligned} A_{nein}^{VV} &= 1 - A_{ja}^{VV} \\ &= 1 - E^{VV} \cdot (K_{ja}^{IR} \cdot E^{IR} + K_{nein}^{IR}) \end{aligned} \quad (5-45)$$

Die Wahrscheinlichkeit, am Ausgang der Applikation eine unkorrekte Information zu erhalten, ergibt sich aus dem Anteil der nicht als unkorrekt erkannten Informationen:

$$\bar{A}^{IR} = \bar{E}^{IR} \cdot K_{nein}^{IR} \quad (5-46)$$

Durch Negieren von (5-46) erhält man mit

$$A^{\text{IR}} = 1 - \bar{A}^{\text{IR}} = 1 - \left( (1 - E^{\text{IR}}) \cdot K_{\text{nein}}^{\text{IR}} \right) = K_{\text{nein}}^{\text{IR}} \cdot E^{\text{IR}} + K_{\text{ja}}^{\text{IR}} \quad (5-47)$$

die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Ausgangsinformation. Mit der notwendigen Berücksichtigung des Systemzustands einer vollständig verfügbaren Ausgangsinformation berechnet sich die Wahrscheinlichkeit für das Qualitätsmerkmal im Ja-Zweig demnach zu

$$A_{\text{ja}}^{\text{IR}} = A_{\text{ja}}^{\text{VV}} \cdot A^{\text{IR}} \quad (5-48)$$

Unter Beachtung der Idempotenz-Regel ((B-6) in Anhang B) und (5-42) erhält man durch Ausmultiplizieren von (5-48) die Formel zur Berechnung der Korrektheit der einfachen Kontrolle mit

$$\begin{aligned} A_{\text{ja}}^{\text{IR}} &= E^{\text{VV}} \cdot \left( K_{\text{ja}}^{\text{IR}} \cdot E^{\text{IR}} + K_{\text{nein}}^{\text{IR}} \right) \cdot \left( K_{\text{nein}}^{\text{IR}} \cdot E^{\text{IR}} + K_{\text{ja}}^{\text{IR}} \right) \\ &= E^{\text{VV}} \cdot \underbrace{\left( K_{\text{ja}}^{\text{IR}} \cdot K_{\text{nein}}^{\text{IR}} \cdot E^{\text{IR}} \cdot E^{\text{IR}} \right)}_{=0} + \underbrace{K_{\text{ja}}^{\text{IR}} \cdot K_{\text{ja}}^{\text{IR}} \cdot E^{\text{IR}}}_{=K_{\text{ja}}^{\text{IR}}} + \underbrace{K_{\text{nein}}^{\text{IR}} \cdot K_{\text{nein}}^{\text{IR}} \cdot E^{\text{IR}}}_{=K_{\text{nein}}^{\text{IR}}} + \underbrace{K_{\text{nein}}^{\text{IR}} \cdot K_{\text{ja}}^{\text{IR}}}_{=0} \\ &= E^{\text{VV}} \cdot E^{\text{IR}} \cdot \underbrace{\left( K_{\text{ja}}^{\text{IR}} + K_{\text{nein}}^{\text{IR}} \right)}_{=1} = E^{\text{VV}} \cdot E^{\text{IR}} \end{aligned} \quad (5-49)$$

die identische Berechnungsvorschrift wie bei der einfachen Verzweigung (vgl. (5-40)). Der Nein-Zweig als der Systemzustand, in dem keine Ausgangsinformation vorliegt, entspricht wiederum der errechneten Ausgangswahrscheinlichkeit der Vollständigen Verfügbarkeit und ergibt sich demnach zu

$$A_{\text{nein}}^{\text{IR}} = A_{\text{nein}}^{\text{VV}} = 1 - E^{\text{VV}} \cdot \left( K_{\text{ja}}^{\text{IR}} \cdot E^{\text{IR}} + K_{\text{nein}}^{\text{IR}} \right) \quad (5-50)$$

Ebenso wie bei der *einfachen Verzweigung* beschreibt bei der *einfachen Kontrolle* der Ja-Zweig die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren und korrekten Ausgangsinformation und der Nein-Zweig die Wahrscheinlichkeit des Systemzustands, bei dem die Ausgangsinformation nicht vollständig verfügbar ist.


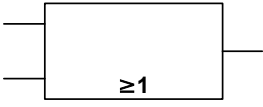


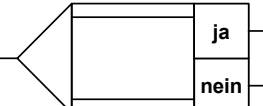
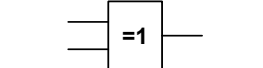
#### 5.4.4.8 Exklusive ODER-Verknüpfung

Die exklusive ODER-Verknüpfung dient der Zusammenführung von disjunkten Systemzuständen, wie sie sich infolge von einfachen Verzweigungen und Kontrollen ergeben. Nach den Regeln der Booleschen Algebra erhält man die Wahrscheinlichkeit einer exklusiven ODER-Verknüpfung durch Summation der  $n$  Eingangswahrscheinlichkeiten:

$$A^{\text{QM}(q)} = \sum_{i=1}^n E_i^{\text{QM}(q)} \quad \text{für } 1 \leq q \leq 4 \quad (5-51)$$

Für die exklusive ODER-Verknüpfung gilt für alle Qualitätsmerkmale dieselbe Berechnungsvorschrift. In Tabelle 5-5 sind die Rechenformeln zu den im Informationsflussdiagramm auftretenden Verknüpfungen und Verzweigungen zusammengestellt.

Tabelle 5-5: Rechenformel zur Auswertung des Informationsflussdiagramms

Graphisches Symbol	Formel
<p>UND-Verknüpfung</p> 	$A^{QM(q)} = \prod_{i=1}^n E_i^{QM(q)}$ <p>für <math>q \in [1..4]</math></p>
<p>ODER-Verknüpfung</p> 	$A^{QM(q)} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - E_i^{QM(q)})$ <p>für <math>q = 1</math></p> $A^{QM(q)} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i^{VV}}{\sum_{j=1}^n E_j^{VV}} \cdot E_i^{QM(q)}$ <p>für <math>q \in [2..4]</math></p>
<p>mvn-Verknüpfung</p> 	$A^{VV} = p_{1,n}^{VV} + \sum_{k=2}^n p_{k,n}^{VV} \cdot p_{2vk}^{IR}$ $A^{IR} = 1 - p_{1,n}^{VV} \cdot (1 - E^{VV})$ <p>für <math>m = 1</math></p> $A^{VV} = \sum_{k=m}^n p_{k,n}^{VV} \cdot p_{2vk}^{IR}$ $A^{IR} = 1$ <p>für <math>m \geq 2</math></p> <p>mit <math>\left\{ \begin{array}{l} p_{k,n}^{VV} = \binom{n}{k} \cdot (E^{VV})^k \cdot (1 - E^{VV})^{n-k} \\ p_{2vk}^{IR} = \sum_{j=2}^k \binom{k}{j} \cdot (E^{IR})^j \cdot (1 - E^{IR})^{k-j} \end{array} \right.</math> <p>für <math>\left\{ \begin{array}{l} E^{VV} = E_i^{VV} \\ E^{IR} = E_i^{IR} \end{array} \right. \quad \forall i = 1..n</math></p> </p>
<p>einfache Verzweigung</p> 	$A_{ja}^{VV} = E^{VV}$ $A_{nein}^{VV} = 1 - E^{VV}$ $A_{ja}^{QM(q)} = E^{VV} \cdot E^{QM(q)}$ $A_{nein}^{QM(q)} = A_{nein}^{VV} = 1 - E^{VV}$ <p>für <math>q \in [2..4]</math></p>
<p>einfache Kontrolle</p> 	$A_{ja}^{VV} = E^{VV} \cdot (K_{ja}^{QM(p)} \cdot E^{QM(p)} + K_{nein}^{QM(p)})$ $A_{nein}^{VV} = 1 - E^{VV} \cdot (K_{ja}^{QM(p)} \cdot E^{QM(p)} + K_{nein}^{QM(p)})$ <p>für <math>p \in [2..4]</math></p> $A_{ja}^{QM(p)} = E^{VV} \cdot E^{QM(p)}$ $A_{nein}^{QM(q)} = 1 - E^{VV} \cdot (K_{ja}^{QM(p)} \cdot E^{QM(p)} + K_{nein}^{QM(p)})$ <p>für <math>p, q \in [2..4]</math> und <math>p = q</math></p> $A_{ja}^{QM(p)} = A_{ja}^{VV} \cdot E^{QM(p)}$ $A_{nein}^{QM(q)} = 1 - E^{VV} \cdot (K_{ja}^{QM(p)} \cdot E^{QM(p)} + K_{nein}^{QM(p)})$ <p>für <math>p, q \in [2..4]</math> und <math>p \neq q</math></p>
<p>exklusive/ausschließende ODER-Verknüpfung</p> 	$A^{QM(q)} = \sum_{i=1}^n E_i^{QM(q)}$ <p>für <math>q \in [1..4]</math></p>

### 5.4.5 Beispiele

Anhand von drei Beispielen soll die praktische Vorgehensweise bei der rechnerischen Auswertung von Informationsflussdiagrammen verdeutlicht werden. Die Ausführungen dienen ferner als Beispiele für die in Kapitel 5.4.4 aufgestellten Formeln zur Auswertung der graphischen Symbole des Informationsflussdiagramms.

#### Beispiel 1 - DGPS-Messung

Als erstes Beispiel wird das bereits bei der Erläuterung der graphischen Symbole genutzte System zur Messung von DGPS-Positionen herangezogen (Abbildung 5-14). Hierbei werden schwerpunktmäßig die Applikation einfache Verzweigung und die exklusive Oder-Verknüpfung erläutert. Da der Informationsfluss der DGPS-Messung bereits in Kapitel 5.4.2 aufgestellt wurde, kann an dieser Stelle direkt mit der Erläuterung der rechnerischen Auswertung des Informationsflussdiagramms begonnen werden kann.

Für die Eingangsinformationen *GPS-Signal*, *Korrekturdaten* und *Korrekturdaten vorheriger Epochen* sind für die Vollständige Verfügbarkeit und die Korrektheit die folgenden Wahrscheinlichkeiten gegeben:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{\text{GPS}} &= (E_{\text{GPS}}^{\text{VV}} ; E_{\text{GPS}}^{\text{IR}}) = (0,95 ; 0,95) \\ \mathbf{Q}_{\text{KD}} &= (E_{\text{KD}}^{\text{VV}} ; E_{\text{KD}}^{\text{IR}}) = (0,90 ; 0,98) \\ \mathbf{Q}_{\text{KD}_{\text{alt}}} &= (E_{\text{KD}_{\text{alt}}}^{\text{VV}} ; E_{\text{KD}_{\text{alt}}}^{\text{IR}}) = (0,80 ; 0,98) \end{aligned} \quad (5-52)$$

**1. Auswertung der Konsistenz:** Ausgehend von einem geschlossenen System ist eine Konsistenzverletzung äußerst unwahrscheinlich und wird deshalb nicht weiter behandelt.

**2. Auswertung der Aktualität:** Aufgrund der Tatsache, dass zur Prädiktion der Korrekturdaten Informationen genutzt werden, deren Entstehung schon eine gewisse Zeit zurückliegt, ist eine Betrachtung der Aktualität notwendig. Im Rahmen des Beispiels wird von einem funktionalen Zusammenhang in der Beschreibung der Aktualität in Abhängigkeit der Zeit  $t$  und der Veränderungsrate  $a$  von

$$f_{\text{ZA}}(a, t) = (1 - a)^t \quad (5-53)$$

ausgegangen.

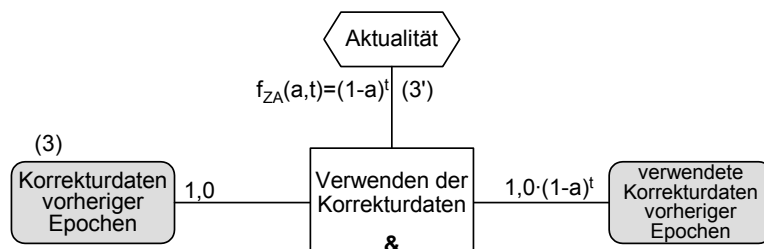


Abbildung 5-23: Analyse der Aktualität bei Verwendung der Korrekturdaten vorheriger Epochen im Beispiel DGPS-Messung

Die Aktualität der Korrekturdaten vorheriger Epochen, die in die Prädiktion einfließen, berechnen sich demnach zu

$$A_{\text{KD}_{\text{verw}}}^{\text{ZA}} = E_{\text{KD}}^{\text{ZA}} \cdot f_{\text{ZA}}(a, t) = 1,0 \cdot (1-a)^t = (1-a)^t \quad (5-54)$$

Das Gleichsetzen der Aktualität  $E_{\text{KD}}^{\text{ZA}}$  der Korrekturdaten vorheriger Epochen (3) mit 1,0 liegt begründet in der Tatsache, dass Daten zum Zeitpunkt ihrer Entstehung generell die Aktualitätsforderungen erfüllen.

**3. Auswertung der Vollständigen Verfügbarkeit:** Mit der gegebenen Vollständigen Verfügbarkeit der Korrekturdaten von 90% teilt sich der Informationsfluss in der ersten Verzweigung (6) auf in

$$A_{\text{KD},\text{ja}}^{\text{VV}} = E_{\text{KD}}^{\text{VV}} = 0,90 \quad \text{und} \quad A_{\text{KD},\text{nein}}^{\text{VV}} = 1 - E_{\text{KD}}^{\text{VV}} = 0,10 \quad (5-55)$$

wobei  $A_{\text{KD},\text{ja}}^{\text{VV}}$  die Wahrscheinlichkeit für vollständig verfügbare Korrekturdaten und  $A_{\text{KD},\text{nein}}^{\text{VV}}$  die Wahrscheinlichkeit für den Systemzustand von nicht vollständig verfügbaren Korrekturdaten angibt. Um anzuzeigen, dass der Nein-Zweig keine Wahrscheinlichkeit für die Erfüllung eines Qualitätsmerkmals, sondern einen Systemzustand repräsentiert, wird der Wert in Klammern gesetzt. In der zweiten Verzweigung (7) erfolgt wiederum eine Verzweigung in Abhängigkeit der Vollständigen Verfügbarkeit. Die Wahrscheinlichkeit prädierte Korrekturdaten zu erhalten ist abhängig von der Vollständigen Verfügbarkeit der Korrekturdaten vorheriger Epochen und ergibt sich unter Berücksichtigung des Systemzustands nicht vollständig verfügbarer Korrekturdaten zu

$$A_{\text{KD}_{\text{alt}},\text{ja}}^{\text{VV}} = A_{\text{KD},\text{nein}}^{\text{VV}} \cdot E_{\text{KD}_{\text{alt}}}^{\text{VV}} = 0,08 \quad (5-56)$$

Der Nein-Zweig, der sich zu

$$A_{\text{KD}_{\text{alt}},\text{nein}}^{\text{VV}} = A_{\text{KD},\text{nein}}^{\text{VV}} \cdot (1 - E_{\text{KD}_{\text{alt}}}^{\text{VV}}) = 0,02 \quad (5-57)$$

berechnet, gibt die Wahrscheinlichkeit des Systemzustands an, dass weder Korrekturdaten empfangen werden noch Korrekturdaten vorheriger Epochen vorliegen, die eine Prädiktion der Korrekturdaten gestatten. (5-56) und (5-57) weichen von den in Kapitel 5.4.4.6 aufgestellten Berechnungsvorschriften (5-38) und (5-39) dahingehend ab, dass über die Multiplikation mit  $A_{\text{KD},\text{nein}}^{\text{VV}}$  die Wahrscheinlichkeit des Eintretens des Systemzustands, bei dem keine Korrekturdaten empfangen werden, berücksichtigt ist.

Die erhaltenen Werte in den Ausgängen der Ja-Zweige beider Verknüpfungen gehen als Eingangsgrößen in die anschließende exklusive ODER-Verknüpfung ein. Mit

$$E_{\text{KD},\text{ja}}^{\text{VV}} = A_{\text{KD},\text{ja}}^{\text{VV}} \quad \text{und} \quad E_{\text{KD}_{\text{alt}},\text{ja}}^{\text{VV}} = A_{\text{KD}_{\text{alt}},\text{ja}}^{\text{VV}} \quad (5-58)$$

erhält man nach (5-51) die Wahrscheinlichkeit der Vollständigen Verfügbarkeit der zur Berechnung der DGPS-Position notwendigen Korrekturdaten

$$A_{\text{KD}_{\text{ber}}}^{\text{VV}} = \sum_{i=1}^2 E_i^{\text{VV}} = E_{\text{KD},\text{ja}}^{\text{VV}} + E_{\text{KD}_{\text{alt}},\text{ja}}^{\text{VV}} = E_{\text{KD}}^{\text{VV}} + (1 - E_{\text{KD}}^{\text{VV}}) \cdot E_{\text{KD}_{\text{alt}}}^{\text{VV}} = 0,98 \quad (5-59)$$

wobei diese sowohl direkt oder durch Prädiktion entstanden sein können. In der abschließenden UND-Verknüpfung erfolgt die Berechnung der DGPS-Position unter Nutzung des GPS-Signals und der Korrekturdaten. Nach (5-26) ergibt sich mit  $E_{\text{KD}_{\text{ber}}}^{\text{VV}} = A_{\text{KD}_{\text{ber}}}^{\text{VV}}$  die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren DGPS-Position zu

$$A_{\text{DGPS}}^{\text{VV}} = \prod_{i=1}^2 E_i^{\text{VV}} = E_{\text{GPS}}^{\text{VV}} \cdot E_{\text{KD}_{\text{ber}}}^{\text{VV}} = 0,95 \cdot 0,98 = 0,931 \quad (5-60)$$

wobei auch hier wieder der Ausgang  $A_{\text{KD}_{\text{ber}}}^{\text{VV}}$  der exklusiven ODER-Verknüpfung (8) als Eingang  $E_{\text{KD}_{\text{ber}}}^{\text{VV}}$  der UND-Verknüpfung (9) dient.

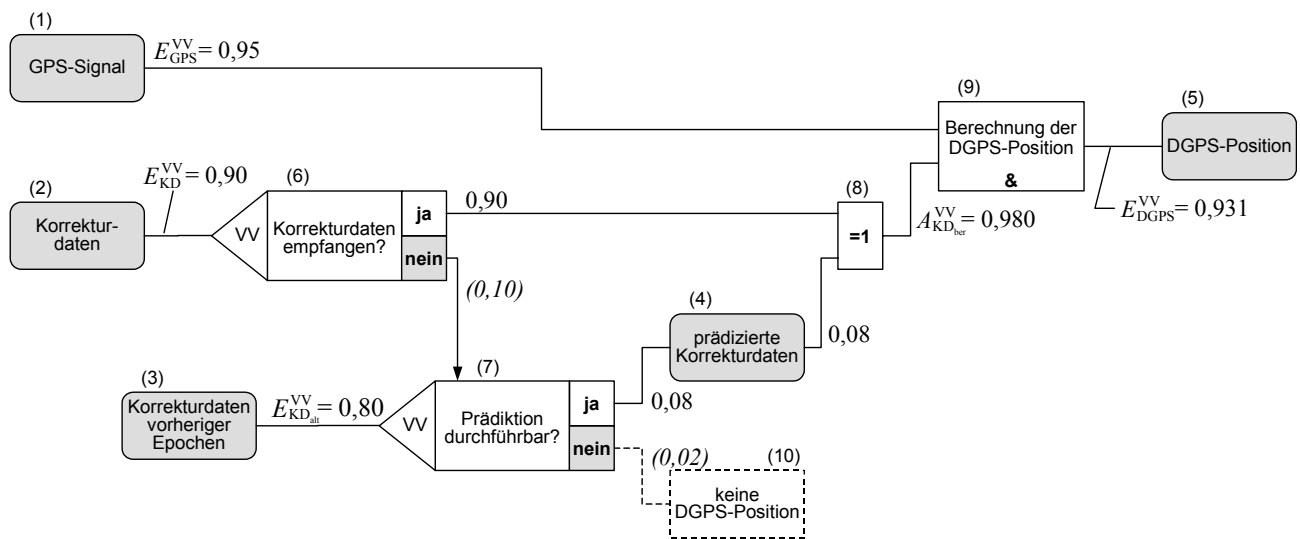


Abbildung 5-24: Analyse der Vollständigen Verfügbarkeit am Beispiel DGPS-Messung

**4. Auswertung der Korrektheit:** Bezüglich der Verzweigung des Informationsflusses ist zu beachten, dass Verzweigungen aufgrund der Vollständigen Verfügbarkeit, bei denen der Nein-Zweig nicht zu einem alternativen Informationszweig führt, bei der Betrachtung der übrigen Qualitätsmerkmale nicht mehr als einfache Verzweigung, sondern als UND-Verknüpfungen zu behandeln sind (Applikation (7) in Abbildung 5-25). Liegt dagegen wie bei Verzweigung (6) ein alternativer Informationszweig vor, so bleibt die einfache Verzweigung bestehen und die Wahrscheinlichkeit korrekte Korrekturdaten zu empfangen berechnet sich nach (5-40) zu

$$A_{\text{KD}_{\text{ja}}}^{\text{IR}} = E_{\text{KD}}^{\text{VV}} \cdot E_{\text{KD}}^{\text{IR}} = 0,882 \quad (5-61)$$

Die Wahrscheinlichkeit gibt an, dass sich das System in dem Zustand vollständig verfügbarer Korrekturdaten befindet und die vorliegenden Daten die Korrektheitsforderungen erfüllen. Der Nein-Zweig, der die Wahrscheinlichkeit keine Korrekturdaten zu empfangen repräsentiert, ergibt sich nach (5-41) zu

$$A_{\text{KD}_{\text{nein}}}^{\text{IR}} = 1 - E_{\text{KD}}^{\text{VV}} = 0,10 \quad (5-62)$$

Der Nein-Zweig als Initiator der Prädiktion von Korrekturdaten anhand der Korrekturdaten vorheriger Epochen, mündet in die Applikation „Prädiktion durchführen“. Als Eingangsgrößen dienen

neben der gegebenen Korrektheit der Korrekturdaten vorheriger Epochen der Einfluss der Aktualität auf die Korrektheit der Eingangsdaten (3'). Im Ergebnis ergibt sich die Korrektheit der prädierten Korrekturdaten mit  $E_{\text{KD,nein}}^{\text{IR}} = A_{\text{KD,nein}}^{\text{IR}}$  zu

$$A_{\text{KD,präd}}^{\text{IR}} = E_{\text{KD,nein}}^{\text{IR}} \cdot E_{\text{KD,alt}}^{\text{IR}} \cdot f_{\text{ZA}}(a, t) = 0,10 \cdot 0,98 \cdot (1-a)^t = 0,098 \cdot (1-a)^t \quad (5-63)$$

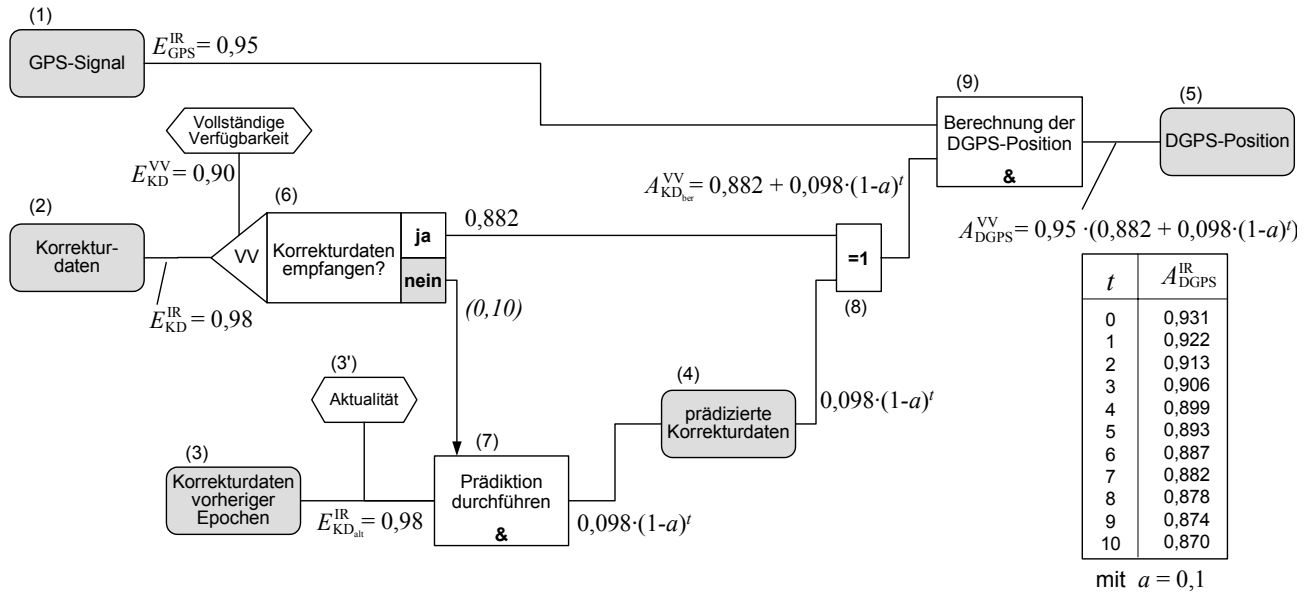


Abbildung 5-25: Analyse der Korrektheit am Beispiel DGPS-Messung

In (8) erfolgt die Zusammenfassung der beiden disjunkten Systemzustände und man erhält mit  $E_{\text{KD,ja}}^{\text{IR}} = A_{\text{KD,ja}}^{\text{IR}}$  und  $E_{\text{KD,präd}}^{\text{IR}} = A_{\text{KD,präd}}^{\text{IR}}$

$$\begin{aligned} A_{\text{KD,ber}}^{\text{IR}} &= \sum_{i=1}^2 E_i^{\text{IR}} = E_{\text{KD,ja}}^{\text{IR}} + E_{\text{KD,präd}}^{\text{IR}} = E_{\text{KD}}^{\text{VV}} \cdot E_{\text{KD}}^{\text{IR}} + (1 - E_{\text{KD}}^{\text{VV}}) \cdot E_{\text{KD,alt}}^{\text{IR}} \cdot f_{\text{ZA}}(a, t) \\ &= 0,882 + 0,098 \cdot (1-a)^t \end{aligned} \quad (5-64)$$

die Wahrscheinlichkeit von korrekten Korrekturdaten zur Berechnung der DGPS-Position. Die Vollständige Verfügbarkeit, welche die beiden Systemzustände mit vollständig verfügbaren und ohne vollständig verfügbare Korrekturdaten (2) angibt, wirkt hierbei als Gewichtungsfaktor. Über die Applikation (9) zur Berechnung der DGPS-Position, bei der es sich um eine UND-Verknüpfung handelt, berechnet sich nach (5-26) mit  $E_{\text{KD,ber}}^{\text{IR}} = A_{\text{KD,ber}}^{\text{IR}}$  die Wahrscheinlichkeit einer korrekten DGPS-Position zu

$$A_{\text{DGPS}}^{\text{IR}} = \prod_{i=1}^2 E_i^{\text{IR}} = E_{\text{GPS}}^{\text{IR}} \cdot E_{\text{KD,ber}}^{\text{IR}} = 0,95 \cdot (0,882 + 0,098 \cdot (1-a)^t) \quad (5-65)$$

Unter der Annahme einer Veränderungsrate von 10% pro Sekunde ergibt sich nach 1 Sekunde die Wahrscheinlichkeit eine korrekte DGPS-Position zu erhalten zu

$$A_{\text{DGPS}}^{\text{IR}} = 0,95 \cdot (0,882 + 0,098 \cdot (1-0,1)^1) = 0,922 \quad (5-66)$$



Dabei zeigt die in Abbildung 5-25 aufgeführte Tabelle, dass mit zunehmender Zeit ohne Empfang originärer Korrekturdaten, die Wahrscheinlichkeit abnimmt, eine korrekte DGPS-Position zu erhalten.

**5. Ergebnis:** Die rechnerische Auswertung des Informationsflussdiagramms des Systems zur Messung einer DGPS-Position (Abbildung 5-14) ergibt folgendes Qualitätstupel:

$$\mathbf{Q}_{\text{DGPS}} = (A_{\text{DGPS}}^{\text{VV}}; A_{\text{DGPS}}^{\text{IR}}) = (0,931; 0,95 \cdot (0,882 + 0,098 \cdot (1-a)^t)) \quad (5-67)$$

Bei einer Veränderungsrate  $a$  von 10% pro Sekunde ergibt sich nach einer Sekunde ohne empfangene Korrekturdaten die Qualität der DGPS-Position zu

$$\mathbf{Q}_{\text{DGPS}} = (0,931; 0,922) \quad (5-68)$$

**Diskussion von alternativen Systementwürfen:** Ein wesentliches Element des Analyseverfahrens ist der Vergleich von Systementwürfen und ihre Auswirkung auf die Informationsqualität. Ausgehend von einer deutlich schlechteren Verfügbarkeit des GPS-Signals ( $E_{\text{GPS}}^{\text{VV}} = 0,85$ ) und der Korrekturdaten ( $E_{\text{KD}}^{\text{VV}} = 0,80$  bzw.  $E_{\text{KD,alt}}^{\text{VV}} = 0,70$ ) im Stadtbereich, ergeben sich bei identischer Systemmodellierung – aufgrund abweichender Eingangswerte – die folgenden Qualitätsgrößen für die DGPS-Position:

$$\begin{aligned} A_{\text{DGPS}}^{\text{VV}} &= E_{\text{GPS}}^{\text{VV}} \cdot (E_{\text{KD}}^{\text{VV}} + (1 - E_{\text{KD}}^{\text{VV}}) \cdot E_{\text{KD,alt}}^{\text{VV}}) = 0,799 \\ A_{\text{DGPS}}^{\text{IR}} &= E_{\text{GPS}}^{\text{IR}} \cdot (E_{\text{KD}}^{\text{VV}} \cdot E_{\text{KD}}^{\text{IR}} + (1 - E_{\text{KD}}^{\text{VV}}) \cdot E_{\text{KD,alt}}^{\text{IR}} \cdot (1-a)^t) = 0,95 \cdot (0,784 + 0,196 \cdot (1-a)^t) \end{aligned} \quad (5-69)$$

Mit denselben Werten für die Veränderungsrate  $a=10\%$  und der Anzahl der Zeiteinheiten  $t=1\text{s}$  ohne Empfang von Korrekturdaten wie in (5-68), erhält man für die Qualität einer DGPS-Position in der Stadt

$$\mathbf{Q}_{\text{DGPS}}^{\text{Stadt}} = (0,799; 0,912) \quad (5-70)$$

Mit der abnehmenden Vollständigen Verfügbarkeit der Eingangsgrößen sinkt damit auch die Vollständige Verfügbarkeit der DGPS-Position. Ebenso zeigt sich, dass trotz der gleichen Eingangswahrscheinlichkeiten für die Korrektheit, die Wahrscheinlichkeit einer korrekten DGPS-Position abnimmt. Dies ist auf die geringere Vollständige Verfügbarkeit der Korrekturdaten zurückzuführen und der damit verbundenen höheren Wahrscheinlichkeit der Durchführung einer Prädiktion von Korrekturdaten, die aufgrund des Einflusses der Aktualität eine geringere Korrektheit aufweisen als die originären Korrekturdaten (2).

Als zweite Systemalternative wird die DGPS-Messung ohne die Möglichkeit der Prädiktion von Korrekturdaten betrachtet. Dies bedeutet, dass, im Falle nicht vollständig verfügbarer Korrekturdaten, keine Korrekturdaten für die Berechnung der DGPS-Position zur Verfügung stehen. Die entsprechende rechnerische Auswertung ergibt bei Verwendung der unter (5-52) angegebenen Eingangswerte für die Vollständige Verfügbarkeit und die Korrektheit der DGPS-Position:

$$\begin{aligned} A_{\text{DGPS}}^{\text{VV}} &= E_{\text{GPS}}^{\text{VV}} \cdot E_{\text{KD}}^{\text{VV}} = 0,855 \\ A_{\text{DGPS}}^{\text{IR}} &= E_{\text{GPS}}^{\text{IR}} \cdot E_{\text{KD}}^{\text{IR}} = 0,931 \end{aligned} \quad (5-71)$$

und man erhält als Qualitätstupel für die Messung einer DGPS-Position ohne Prädiktion von Korrekturdaten mit

$$\mathbf{Q}_{\text{DGPS}}^{\text{ohne Präd}} = (0,855 ; 0,931) \quad (5-72)$$

im Gegensatz zu dem Systementwurf mit Prädiktion in (5-68) eine geringfügig höhere Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Position, verbunden mit einer wesentlich schlechteren Vollständigen Verfügbarkeit. Dies zeigt, dass die Integration der Prädiktion von Korrekturdaten eine wirksame Maßnahme zur Erhöhung der Vollständigen Verfügbarkeit von DGPS-Positionen darstellt.

### Beispiel 2 - Ortungskomponente

Im Folgenden wird eine Ortungskomponente behandelt, die aus einem GPS-Empfänger als Lieferant der GPS-Position (1), einem elektronischen Tachosignal für das Streckeninkrement  $ds$  (2) und einem elektronischen Kreisel (Gyro) zur Ermittlung des Richtungsinkrements  $d\phi$  (3) besteht (Abbildung 5-26). Über die Fahrzeugposition der vorherigen Epoche (4) sowie dem Strecken- und Richtungsinkrement  $ds$  und  $d\phi$  wird in (10) die Fahrzeugposition prädiziert. Diese wird in (9) zur Überprüfung der GPS-Position (1) herangezogen. Wird die GPS-Position als korrekt eingestuft, ergibt sich die Fahrzeugposition (8) aus der GPS-Position. Bei einer als unkorrekt identifizierten GPS-Position oder im Falle einer nicht vollständig verfügbaren GPS-Position ergibt sich die Fahrzeugposition (8) aus der prädizierten Fahrzeugposition (7). Die folgende Erläuterung der rechnerischen Auswertung des Informationsflussdiagramms beschränkt sich auf die Vollständige Verfügbarkeit und die Korrektheit.

**Auswertung der Vollständigen Verfügbarkeit:** Mit der gegebenen Vollständigen Verfügbarkeit und Korrektheit der GPS-Position von jeweils 0,95 erhält man nach (5-44) im Ja-Zweig der einfachen Kontrolle (9)

$$A_{\text{GPS,ja}}^{\text{VV}} = E_{\text{GPS}}^{\text{VV}} \cdot (K_{\text{ja}}^{\text{IR}} \cdot E_{\text{GPS}}^{\text{IR}} + K_{\text{nein}}^{\text{IR}}) = 0,907 \quad (= E_{\text{Pos}_{\text{GPS}}}^{\text{VV}}) \quad (5-73)$$

die die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren Ausgangsinformation angibt. Der Nein-Zweig beschreibt mit

$$A_{\text{GPS,nein}}^{\text{VV}} = 1 - A_{\text{GPS,ja}}^{\text{VV}} = 0,093 \quad (5-74)$$

die Wahrscheinlichkeit, dass keine GPS-Position verfügbar ist. Aufgrund des enthaltenen Kontrollmechanismus, der 90% der unkorrekten GPS-Positionen erkennt und aus der weiteren Datenverarbeitung eliminiert, liegt die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren Fahrzeugposition aus GPS (6) unter der Wahrscheinlichkeit der Vollständigen Verfügbarkeit der GPS-Position (1).

Zur Prädiktion der Fahrzeugposition werden die beiden inkrementellen Messgrößen  $ds$  (2) und  $d\phi$  (3) sowie die in der vorherigen Epoche ermittelte absolute Fahrzeugposition (4) herangezogen. Mit der gegebenen UND-Verknüpfung (10) erhält man nach (5-26) die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren prädizierten Fahrzeugposition (5) von

$$A_{\text{Pos}_{\text{präd}}}^{\text{VV}} = E_{\text{ds}}^{\text{VV}} \cdot E_{\text{d}\phi}^{\text{VV}} \cdot E_{\text{Pos}_{\text{alt}}}^{\text{VV}} = 0,998 \quad (5-75)$$

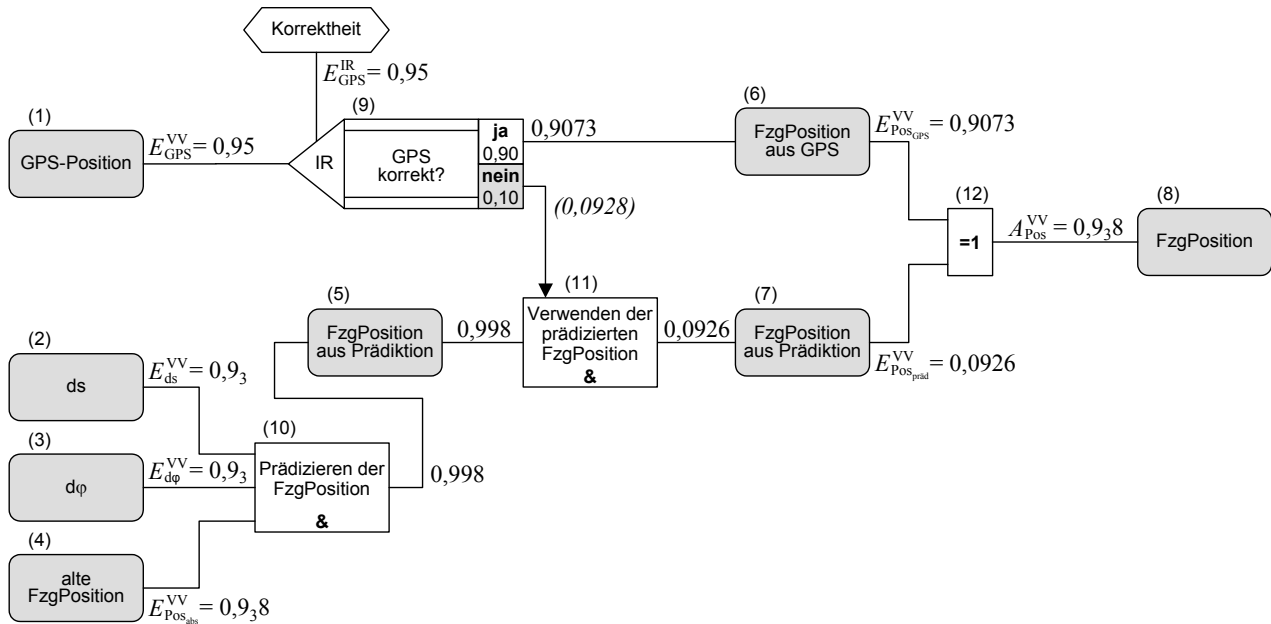


Abbildung 5-26: Analyse der Vollständigen Verfügbarkeit am Beispiel einer Ortungskomponente

Unter Berücksichtigung des Systemzustands einer nicht vollständig verfügbaren GPS-Position erhält man im Ausgang der Applikation (11)

$$E_{\text{Pos}_{\text{präd}}}^{\text{VV}} = A_{\text{GPS,nein}}^{\text{VV}} \cdot A_{\text{Pos}_{\text{präd}}}^{\text{VV}} = 0,093 \quad (5-76)$$

Mit der nach (5-51) durchzuführenden Addition der errechneten Wahrscheinlichkeit für die Vollständige Verfügbarkeit der Fahrzeugposition aus GPS (6) und der Fahrzeugposition aus Prädiktion (7) erhält man als Ergebnis der exklusiven ODER-Verknüpfung (12) die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren Fahrzeugposition (8):

$$A_{\text{Pos}}^{\text{VV}} = E_{\text{Pos}_{\text{GPS}}}^{\text{VV}} \cdot E_{\text{Pos}_{\text{präd}}}^{\text{VV}} = 0,938 \quad (5-77)$$

Die vorgestellte rechnerische Auswertung weicht dabei geringfügig von der tatsächlichen Vorgehensweise ab. Da die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren alten Fahrzeugposition  $E_{\text{Pos}_{\text{alt}}}^{\text{VV}}$  der gesuchten Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren Fahrzeugposition  $A_{\text{Pos}}^{\text{VV}}$  entspricht, ist eine iterative Lösung notwendig. Hierzu wird, ausgehend von einem geeigneten Anfangswert für  $E_{\text{Pos}_{\text{alt}}}^{\text{VV}}$ , die Vollständige Verfügbarkeit der Fahrzeugposition  $A_{\text{Pos}}^{\text{VV}}$  berechnet und diese als neue Eingangswahrscheinlichkeit für die alte Fahrzeugposition verwendet. Dies wird so lange wiederholt, bis beide Werte übereinstimmen.

**Auswertung der Korrektheit:** Ebenso wie bei der Vollständigen Verfügbarkeit ist die rechnerische Auswertung der Korrektheit in der einfachen Kontrolle (9) von der Vollständigen Verfügbarkeit und der Korrektheit der GPS-Position abhängig. Nach (5-49) erhält man im Ja-Zweig mit

$$A_{\text{GPS,ja}}^{\text{IR}} = E_{\text{GPS}}^{\text{VV}} \cdot E_{\text{GPS}}^{\text{IR}} = 0,903 \quad (= E_{\text{Pos}_{\text{GPS}}}^{\text{IR}}) \quad (5-78)$$

die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren und korrekten GPS-Position. Für den Nein-Zweig ergibt sich nach (5-50) dieselbe Wahrscheinlichkeit wie für die Vollständige Verfügbarkeit:

$$A_{GPS,nein}^{IR} = A_{GPS,nein}^{VV} = 0,093 \tag{5-79}$$

Die Wahrscheinlichkeit eine korrekte prädizierte Fahrzeugposition (5) zu erhalten errechnet sich gemäß (5-26) zu

$$A_{Pos_{präd}}^{IR} = E_{ds}^{IR} \cdot E_{d\varphi}^{IR} \cdot E_{Pos_{alt}}^{IR} = 0,962 \tag{5-80}$$

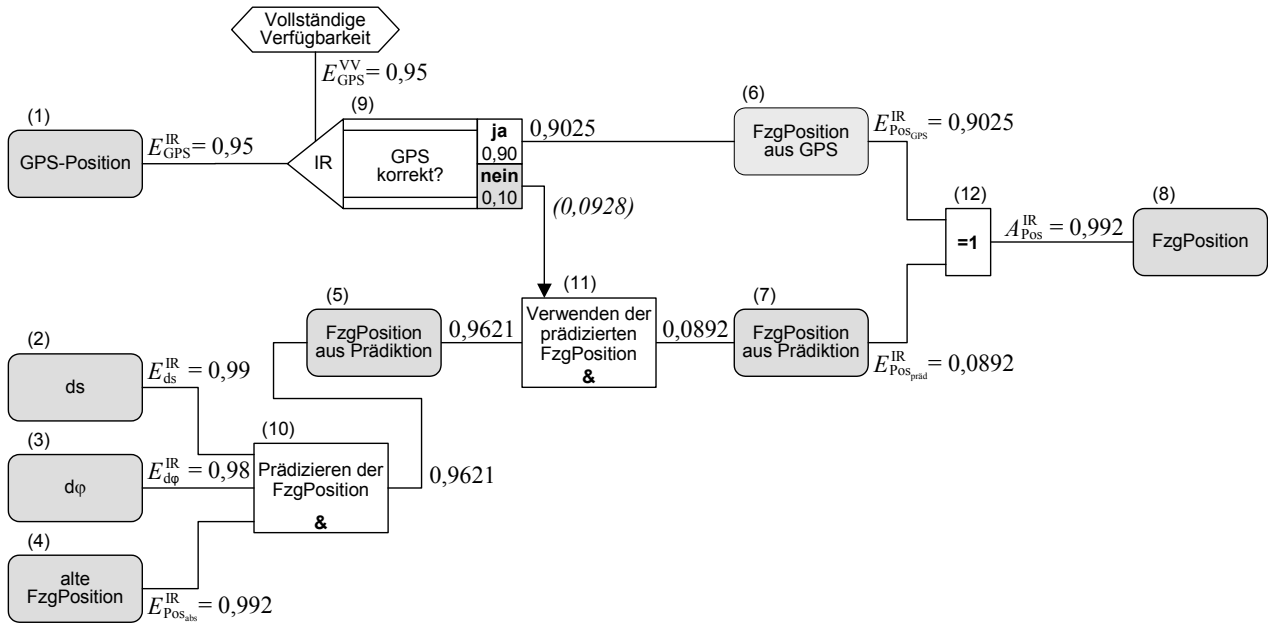


Abbildung 5-27: Analyse der Korrektheit am Beispiel einer Ortungskomponente

Mit der notwendigen Berücksichtigung des Systemzustands einer nicht vollständig verfügbaren GPS-Position erhält man mit

$$E_{Pos_{präd}}^{IR} = A_{GPS,nein}^{IR} \cdot A_{Pos_{präd}}^{IR} = 0,089 \tag{5-81}$$

den zweiten Eingangswert. Über die daran anschließende exklusive ODER-Verknüpfung (12) berechnet sich die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Fahrzeugposition (8) zu

$$A_{Pos}^{IR} = E_{Pos_{GPS}}^{IR} \cdot E_{Pos_{präd}}^{IR} = 0,992 \tag{5-82}$$

Aufgrund der notwendigen Übereinstimmung der Korrektheit der alten Fahrzeugposition (4) und der gesuchten Korrektheit der Ergebnisinformation Fahrzeugposition (8) ist ebenso wie bei der Auswertung der Vollständigen Verfügbarkeit ein iteratives Vorgehen erforderlich.

**Ergebnis:** Nach der rechnerischen Auswertung der in Abbildung 5-26 dargestellten Ortungskomponente ergibt sich, ausgehend von folgender Qualität der Eingangsgrößen

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{GPS} &= (0,95 ; 0,95) & \mathbf{Q}_{d\varphi} &= (0,9_3 ; 0,98) \\ \mathbf{Q}_{ds} &= (0,9_3 ; 0,99) & \mathbf{Q}_{Pos_{alt}} &= \mathbf{Q}_{Pos} \end{aligned} \tag{5-83}$$

die Qualität der ermittelten Fahrzeugposition zu

$$\mathbf{Q}_{\text{Pos}} = (E_{\text{Pos}}^{\text{VV}} ; E_{\text{Pos}}^{\text{IR}}) = (0,938 ; 0,992) \quad (5-84)$$

**Diskussion eines alternativen Systementwurfs:** Analog zum ersten Beispiel soll auch hier eine Systemvariante mit einer wesentlich schlechteren Vollständigen Verfügbarkeit von GPS, wie sie typischerweise im Stadtverkehr auftritt, kurz dargestellt werden. Unter den geänderten Qualitätswerten für GPS mit

$$\mathbf{Q}_{\text{GPS}}^{\text{Stadt}} = (0,85 ; 0,90)$$

erhält man für die Qualität der Fahrzeugposition mit

$$\mathbf{Q}_{\text{Pos}}^{\text{Stadt}} = (0,935 ; 0,988) \quad (5-85)$$

nur eine geringfügig schlechtere Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit als in (5-84). Dies zeigt die Unempfindlichkeit des Systementwurfs gegenüber Ausfällen und Fehlern von GPS. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der systemimmanenten Eigenschaft der Koppelortung, die Bestimmung der Fahrzeugposition über die inkrementellen Messgrößen zu einem Drift führt und mit steigender Zahl von Epochen ohne absolute Positionsbestimmung somit die Wahrscheinlichkeit eine unkorrekte Fahrzeugposition zu erhalten deutlich zunimmt. Ebenso ist mit einer deutlichen Verschlechterung der metrischen Genauigkeit zu rechnen (vgl. u.a. CZOMMER 2001, AUSSEMS 1999).

### Beispiel 3 - Navigationssystem

Im abschließenden Beispiel wird ein Navigationssystem behandelt. Die Betrachtung beschränkt sich hierbei auf die vom System ermittelte Fahrzeugposition. Im Gegensatz zu der im vorherigen Beispiel behandelten Ortungskomponente wird beim Navigationssystem zusätzlich eine digitale Straßenkarte als Informationsquelle genutzt, um über Map-Matching eine logische Positionsbestimmung im Straßennetz vorzunehmen (s. CZOMMER & MÖHLENBRINK 1999, SCHLOTT 1997).

Der dazu modellierte Informationsfluss des Navigationssystems ist in Abbildung 5-28 dargestellt. Demnach kommen als Informationsquellen eine digitale Straßenkarte (4) und die von einer Ortungskomponente (1), bestehend aus GPS-Empfänger, Tachosignal und elektronischem Kreisler (s. Beispiel 2, Abbildung 5-26), gelieferte Fahrzeugposition (6) zum Einsatz. Über die Systemkomponente CD-ROM (3) wird die technische Verfügbarkeit der CD-ROM bzw. des CD-Laufwerks berücksichtigt. Durch das Map-Matching (13) wird aus der sensortechnisch gewonnenen Fahrzeugposition (6) und dem ausgelesenen Straßennetz (5) die Fahrzeugposition (7) ermittelt. Mit der zusätzlich bestimmten Map-Matching-Güte kann eine Plausibilitätskontrolle zur Überprüfung der Korrektheit der Positionsbestimmung (14) durchgeführt werden. Liegt keine logische Fahrzeugposition vor bzw. wird die ermittelte Position als unkorrekt eingestuft, so wird die von der Ortungskomponente (2) gelieferte Position (8) als aktuelle Fahrzeugposition (11) ausgegeben. Andernfalls bildet die über Map-Matching ermittelte Position (9) die vom Navigationssystem bestimmte Fahrzeugposition (11).

Davon ausgehend, dass konsistente Kartendaten vorliegen und ein konsistenter Informationsaustausch zwischen den Systemkomponenten gegeben ist, wird auf eine Behandlung der Konsistenz

verzichtet. Die Auswirkungen der Aktualität der digitalen Straßenkarte auf die Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit sind bei der Verwendung der Kartendaten (12) zu berücksichtigen. Aufgrund der mehrfach bestehenden Abhängigkeit zwischen der Vollständigen Verfügbarkeit und der Korrektheit werden diese beiden Qualitätsmerkmale anschließend parallel ausgewertet.

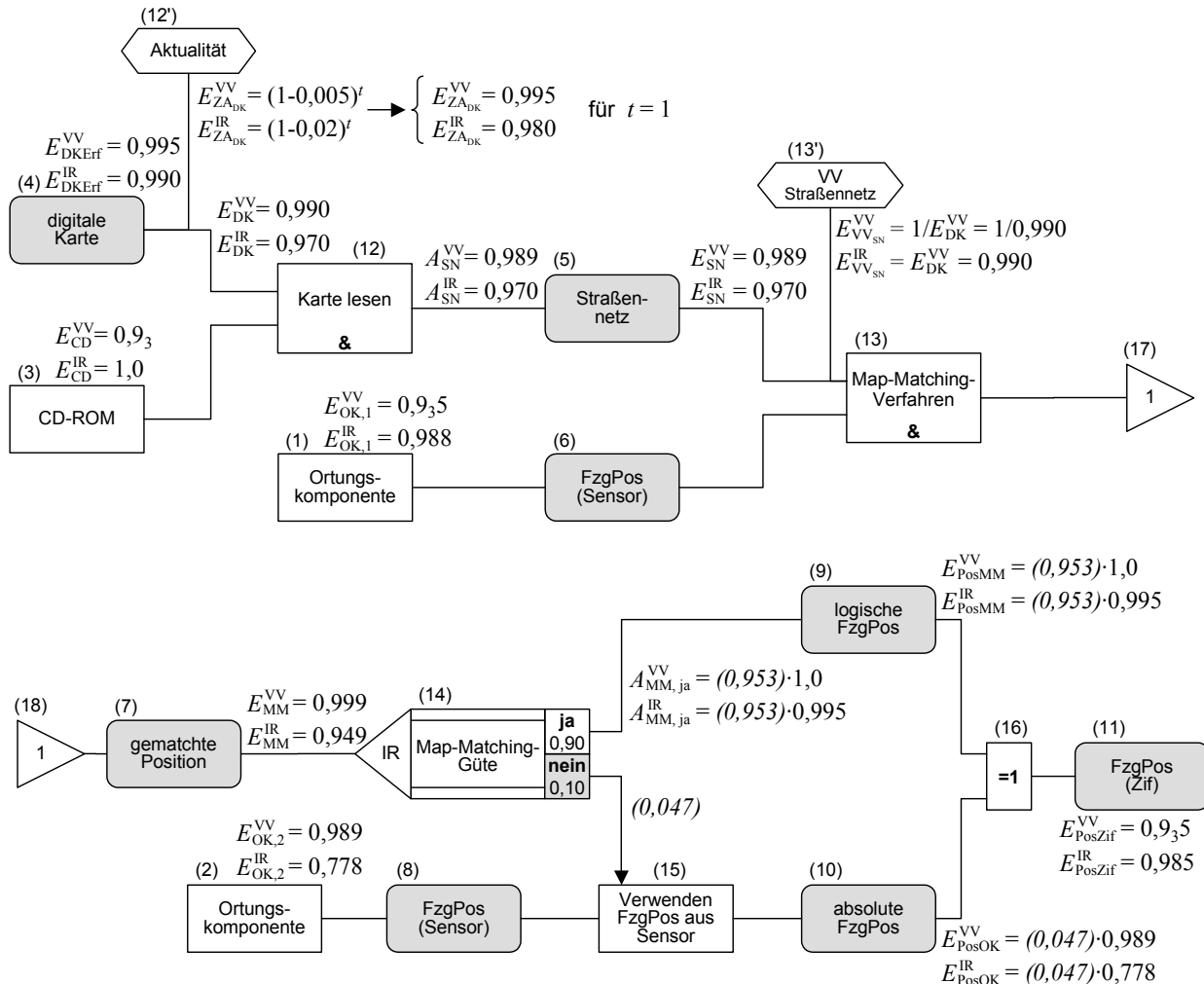


Abbildung 5-28: Analyse der Informationsqualität der Fahrzeugposition eines Navigationssystems

**Auswertung der Aktualität:** Aufgrund der sich ergebenden Änderungen in der Realität werden die Kartendaten im Laufe der Zeit veralten. Davon ausgehend, dass hierdurch pro Jahr 0,5% der Daten nicht vollständig verfügbar und 2% nicht mehr korrekt sind, ergeben sich, ausgehend von einer Vollständigkeit der Erfassung der Kartendaten von  $E_{DK\text{Erf}}^{VV} = 0,995$  und einer Korrektheit von  $E_{DK\text{Erf}}^{IR} = 0,990$ , nach Ablauf eines Jahres folgende Qualitätsgrößen für die digitale Straßenkarte:

$$Q_{DK} = (E_{DK}^{VV} ; E_{DK}^{IR}) = (0,990 ; 970) \tag{5-86}$$

**Auswertung der Vollständigen Verfügbarkeit und der Korrektheit:** Die technische Verfügbarkeit des CD-ROM Laufwerks (3) wird mit einer Vollständigen Verfügbarkeit von  $E_{CD}^{VV} = 0,93$  festgesetzt. Auf die Korrektheit der Kartendaten hat das CD-Laufwerk keinen Einfluss, weshalb diese mit  $E_{CD}^{IR} = 1,0$  in die Analyse eingeht. Für die Ortungskomponente (1) werden die in Beispiel 2 ermittelten Qualitätsgrößen für eine Stadtfahrt aus (5-85) übernommen.

Auf die Qualitätsgrößen  $E_{OK,1}^{VV}$  und  $E_{OK,1}^{IR}$  der im Nein-Zweig der Kontrolle der Map-Matching-Güte aufgeführten Ortungskomponente (2) wird im Rahmen der rechnerischen Auswertung des alternativen Informationsflusses eingegangen. Mit der gegebenen Qualität der digitalen Karte (4) und dem Einfluss von CD-Fehlern (3) berechnet sich die Qualität des ausgelesenen Straßennetzes (5) zu

$$E_{SN}^{VV} = 0,989 \quad \text{und} \quad E_{SN}^{IR} = 0,970 \quad (5-87)$$

Bei dem daran anschließenden Map-Matching (13) erfolgt die Zuordnung der ermittelten Fahrzeugposition der Ortungskomponente (6) zum Straßennetz (5). Hierbei resultieren Unvollständigkeiten in der Karte nicht in einem unvollständig verfügbaren, sondern in einem unkorrekten Map-Matching-Ergebnis. Um diesem Sachverhalt gerecht zu werden, wird das Übergangssymbol (13') derart angewandt, dass Fehler in der Vollständigen Verfügbarkeit der digitalen Karte (4) sich nicht in der Vollständigen Verfügbarkeit, sondern in der Korrektheit der gematchten Position wiederfinden. Für das Übergangssymbol ergeben sich somit die folgenden Qualitätsgrößen:

$$E_{VV_{SN}}^{VV} = \frac{1}{E_{DK}^{VV}} = \frac{1}{0,990} \quad \text{und} \quad E_{VV_{SN}}^{IR} = E_{DK}^{VV} = 0,990 \quad (5-88)$$

wobei der erste Wert nicht als Wahrscheinlichkeit, sondern als formale Größe zur Anpassung der Vollständigen Verfügbarkeit der gematchten Fahrzeugposition (7) zu interpretieren ist. Die daran anschließende Kontrolle (14) ergibt, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von

$$E_{PosMM}^{VV} = (0,953) \cdot 1,0 = 0,953 \quad \text{und} \quad E_{PosMM}^{IR} = (0,953) \cdot 0,995 = 0,948 \quad (5-89)$$

die logische Fahrzeugposition (9) vollständig verfügbar bzw. korrekt ist. Der alternative Informationsfluss, der zu 4,7% eintritt, führt zu einer Verwendung der sensortechnisch ermittelten Fahrzeugposition (8). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Information bereits für das Map-Matching herangezogen wird. Es besteht somit eine stochastische Abhängigkeit der Eingangsdaten der beiden im Informationsflussdiagramm aufgeführten Ortungskomponenten (1) und (2). Da für eine analytische Auswertung des Informationsflussdiagramms, gemäß der in den Kapiteln 5.4.4.2 bis 5.4.4.8 aufgestellten Berechnungsvorschriften, die stochastische Unabhängigkeit der Eingangsinformationen gefordert ist, können die Qualitätsgrößen für die Ortungskomponente (2) nicht von der Ortungskomponente (1) übernommen werden.

Für eine korrekte Berechnung der Informationsqualität ist die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren bzw. korrekten Fahrzeugposition der Ortungskomponente (2) erforderlich unter der Bedingung, dass aufgrund einer nicht vollständig verfügbaren oder einer als unkorrekt identifizierten gematchten Fahrzeugposition (7) die absolute Fahrzeugposition (8) verwendet wird. Es liegt somit eine **bedingte Wahrscheinlichkeit** vor. Gemäß der Wahrscheinlichkeitsrechnung gibt die bedingte Wahrscheinlichkeit

$$p(A/B) = \frac{p(A \wedge B)}{p(B)} \quad \text{mit} \quad p(B) \neq 0 \quad (5-90)$$

die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses  $A$  unter der Bedingung, dass das Ereignis  $B$  schon eingetreten ist, an.

Übertragen auf den hier vorliegenden Fall bedeutet dies: Es ist die Wahrscheinlichkeit einer vollständig verfügbaren und korrekten absoluten Fahrzeugposition der Ortungskomponente (2)  $E_{OK,2}^{VV}$  und  $E_{OK,2}^{IR}$  gesucht unter der Bedingung einer Unvollständigen Verfügbarkeit des CD-Laufwerks  $\bar{E}_{CD}^{VV}$  (3) oder der Ortungskomponente  $\bar{E}_{OK,1}^{VV}$  (1) oder der Elimination einer unkorrekt gematchten Fahrzeugposition  $\bar{E}_{IR}$ , die auf eine unkorrekte Positionsinformation  $\bar{E}_{OK,1}^{IR}$  (1), eine unkorrekte Karte  $\bar{E}_{DK}^{IR}$  oder auf eine unvollständige Karte  $\bar{E}_{DK}^{VV}$  (4) zurückzuführen ist:

$$\begin{aligned} E_{OK,2}^{VV} &= p\left(E_{OK,1}^{VV} \mid \bar{E}_{CD}^{VV} \vee \bar{E}_{OK,1}^{VV} \vee \bar{E}_{IR}\right) = \frac{E_{OK,1}^{VV} \wedge (\bar{E}_{CD}^{VV} \vee \bar{E}_{OK,1}^{VV} \vee \bar{E}_{IR})}{\bar{E}_{CD}^{VV} \vee \bar{E}_{OK,1}^{VV} \vee \bar{E}_{IR}} \\ &= \frac{E_{OK,1}^{VV} \cdot (1 - E_{IR} \cdot E_{CD}^{VV})}{1 - E_{CD}^{VV} \cdot E_{OK,1}^{VV} \cdot E_{IR}} \end{aligned} \quad (5-91)$$

und

$$\begin{aligned} E_{OK,2}^{IR} &= p\left(E_{OK,1}^{IR} \mid \bar{E}_{CD}^{VV} \vee \bar{E}_{OK,1}^{VV} \vee \bar{E}_{IR}\right) = \frac{E_{OK,1}^{IR} \wedge (\bar{E}_{CD}^{VV} \vee \bar{E}_{OK,1}^{VV} \vee \bar{E}_{IR})}{\bar{E}_{CD}^{VV} \vee \bar{E}_{OK,1}^{VV} \vee \bar{E}_{IR}} \\ &= \frac{E_{OK,1}^{IR} \cdot (1 - E_{OK,1}^{VV} \cdot E_{CD}^{VV} \cdot (1 - K_{ja} \cdot (1 - E_{DK}^{VV} \cdot E_{DK}^{IR})))}{1 - E_{CD}^{VV} \cdot E_{OK,1}^{VV} \cdot E_{IR}} \end{aligned} \quad (5-92)$$

$$\text{mit } E_{IR} = (K_{ja} \wedge E_{OK,1}^{IR} \wedge E_{DK}^{VV} \wedge E_{DK}^{IR}) \vee K_{nein} \quad \text{bzw.} \quad E_{IR} = 1 - K_{ja} \cdot (1 - E_{OK,1}^{IR} \cdot E_{DK}^{VV} \cdot E_{DK}^{IR})$$

Für die Ortungskomponente (2) ergeben sich somit die folgenden Qualitätsgrößen:

$$E_{OK,2}^{VV} = 0,989 \quad \text{und} \quad E_{OK,2}^{IR} = 0,778 \quad (5-93)$$

Die wesentlich geringere Wahrscheinlichkeit einer korrekten Fahrzeugposition der Ortungskomponente (2) ergibt sich dadurch, dass in ungefähr einem Viertel der Fälle die Verzweigung in den Nein-Zweig auf eine unkorrekte Fahrzeugposition der Ortungskomponente (1) zurückzuführen ist. Aus demselben Grund, wenn auch in geringerem Ausmaß, ergibt sich eine geringere Vollständige Verfügbarkeit. Bezüglich der Verwendung stochastisch abhängiger Informationen im Informationsflussdiagramm ist anzumerken, dass mit Hilfe der bedingten Wahrscheinlichkeit die entsprechenden Qualitätsgrößen für den alternativen Informationszweig berechnet werden können.

Über die Verknüpfung der beiden disjunkten Systemzustände (16) erhält man für die vom Navigationssystem gelieferte Fahrzeugposition (11) folgendes Qualitätstupel:

$$\mathbf{Q}_{\text{PosZif}} = (E_{\text{PosZif}}^{VV} ; E_{\text{PosZif}}^{IR}) = (0,935 ; 985) \quad (5-94)$$

Die Auswertung des Informationsflussdiagramms eines Navigationssystems zeigt, dass mit der hier gewählten Modellierung die Vollständige Verfügbarkeit der Fahrzeugposition ausschließlich von der vollständigen Verfügbarkeit der Ortungskomponente abhängt. Dies ergibt sich daraus, dass bei einem Ausfall der gematchten Position generell die absolute Position der Ortungskomponente als Positionsinformation (10) herangezogen wird. Bei dem unter (5-94) aufgeführten Qualitätstupel ist zu berücksichtigen, dass hierbei nicht ausschließlich logische Positionsinformationen vorliegen.



Sollten in einer Applikation diese erforderlich sein, so muss von dem bei der logischen Fahrzeugposition (9) aufgeführten Qualitätstupel

$$\mathbf{Q}_{\text{PosMM}} = (E_{\text{PosMM}}^{\text{VV}} ; E_{\text{PosMM}}^{\text{IR}}) = (0,953 ; 995) \quad (5-95)$$

ausgegangen werden, das im Vergleich zu (5-94) eine höhere Korrektheit, verbunden mit einer wesentlich geringeren Verfügbarkeit, aufweist. Das Beispiel zeigt die Möglichkeit der Einbindung von Systemkomponenten, die bereits an anderer Stelle analysiert wurden. Dies wird ebenfalls beim Ampel- und Vorfahrterkenner (Kapitel 6) genutzt, bei dem das hier behandelte Navigationssystem als Informationslieferant für die aktuelle Fahrzeugposition verwendet wird.

## 5.5 Generierung von „Sicherer Information“

Wie in Kapitel 5.2 ausführlich dargelegt sind Informationen verarbeitete Daten, die zur Problemlösung herangezogen (PETZEL 1996) und zum Handeln im Hinblick auf gesetzte Ziele benötigt werden (u.a. HEINRICH 1996, FANK 1996, BILL 1999). Ein **informationsverarbeitendes System** kann demnach als ein System verstanden werden, das verschiedene Daten nutzt, um über einen definierten Verarbeitungsprozess eine Information zu erzeugen, mit der ein konkreter Verwendungszweck verbunden ist. Ergibt sich aufgrund fehlerhafter Eingangsdaten oder einer fehlerhaften Datenverarbeitung eine fehlerhafte Information, so resultiert daraus ein fehlerhaftes Systemverhalten. Es besteht somit ein direkter Zusammenhang zwischen einem Informationsfehler und einem fehlerhaften Systemverhalten. Hinsichtlich der auftretenden Fehler sind hierbei Fehler, welche die Funktionsfähigkeit des Systems beeinträchtigen, und Fehler, die zu einem gefährlichen Systemzustand führen (gefährliche Fehler), zu unterscheiden, wobei die zweite Gruppe eine Untermenge der ersten darstellt (vgl. TRIER 1990).

Da gefährliche Fehler zu einem Systemzustand führen, von dem eine Gefährdung für die im Systemumfeld befindlichen Personen und Sachen ausgeht, ist das oberste Ziel, bei der Entwicklung und dem Betrieb von sicherheitsrelevanten Systemen, derartige Fehler zu vermeiden. Bei **sicherheitsrelevanten informationsverarbeitenden Systemen** überträgt sich diese Forderung auf die vom System erzeugten Informationen. Es sind Informationen notwendig, die über die gesamte Verwendungsdauer eine Qualität aufweisen, die sicherstellt, dass von den Handlungen, die auf diesen Informationen beruhen, keine Gefährdung ausgeht. Diese werden im weiteren Verlauf als „**Sichere Information**“ bezeichnet.

Wie bei allen sicherheitsrelevanten technischen Systemen gilt auch bei den sicherheitsrelevanten informationsverarbeitenden Systemen, dass eine absolute Sicherheit in der Realität nicht erreicht werden kann (Kapitel 4.1). Das Ziel muss deshalb sein, das vom System ausgehende Risiko auf einen annehmbaren Wert zu begrenzen (vgl. DIN EN ISO 8402: 1995). Die Ermittlung des akzeptierten Risikos kann durch eine Risikoanalyse erfolgen und führt im Ergebnis zu einer Festlegung der Sicherheitsanforderungen, die an das System und somit auch an die im System enthaltenen Daten und Informationen gestellt werden (vgl. Kapitel 3.3 und 4.3). Um das geforderte Sicherheitsniveau zu erreichen sind geeignete Maßnahmen festzulegen, die eine Vermeidung bzw. Beherrschung von gefährlichen Fehlern in den sicherheitsrelevanten Informationen bewirken. Die angewandten Maßnahmen zur Steigerung der Zuverlässigkeit und Sicherheit von technischen

Systemen lassen sich in vollem Umfang auf Maßnahmen zur Steigerung der Informationsqualität mit dem Ziel der Generierung von „Sicheren Informationen“ übertragen:

- **Maßnahmen zur Fehlervermeidung:** Durch höhere Anforderungen an die Qualität der Eingangsdaten reduziert sich die Wahrscheinlichkeit eine fehlerhafte Information zu erhalten.
- **Maßnahmen zur Fehlerbeherrschung:** Durch die Integration von Redundanzen und Kontrollen werden fehlerhafte (Eingangs-)Daten vom Gesamtsystem ausgeglichen (**Fehlertolerierung**) bzw. fehlerhafte Daten werden erkannt und führen zu einer Schutzfunktion, sodass sich kein gefährlicher Systemzustand einstellen kann (**Fehlererkennung**).

Der notwendige Sicherheitsnachweis (MECKELBURG 1989) ist durch eine objektive Beschreibung der Informationsqualität aller im System eingehenden und verarbeiteten Daten sowie der ausgegebenen Informationen mit Hilfe des aufgestellten Qualitätsmodells gegeben. Der ferner geforderte analytische Nachweis der Wirksamkeit der Maßnahmen kann über das im vorherigen Unterkapitel entwickelte Analyseverfahren geführt werden. Anhand des folgenden Beispiels wird die Wirksamkeit dieser Maßnahmen aufgezeigt, außerdem werden die grundlegenden Auswirkungen auf die Informationsqualität diskutiert.

Hierzu wird von einem System ausgegangen, in dem die eingehenden Daten  $X1$  und  $X2$  zur Information  $Y$  verarbeitet werden. Für die Information  $Y$  ist aufgrund des angestrebten Sicherheitsniveaus eine Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit von jeweils 99,8% gefordert. Bei dem ersten Systementwurf  $S1$  (Abbildung 5-29) ergibt sich mit der gegebenen Vollständigen Verfügbarkeit und Korrektheit der Eingangsdaten  $X1$  und  $X2$  von jeweils 99% für die Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit der Information  $Y$  eine Wahrscheinlichkeit von  $A_Y^{VV} = A_Y^{IR} = 0,980$ . Die sich durch die Informationsqualität der Eingangsdaten und der gewählten Informationsverarbeitung mit der dazugehörigen logischen Verknüpfung der Daten ergebende Qualität der Information  $Y$  beim Systementwurf  $S1$  erfüllt demnach nicht die gestellte Forderung.

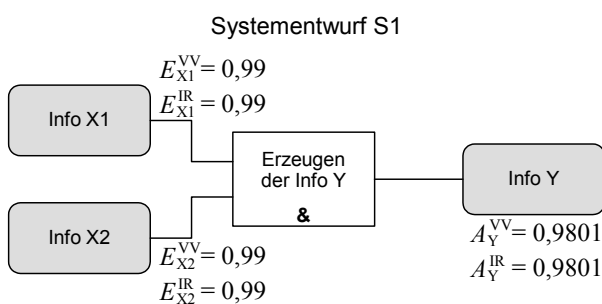


Abbildung 5-29: Beispiel eines Systementwurfs zur Erläuterung der Maßnahmen zur Fehlervermeidung und -beherrschung

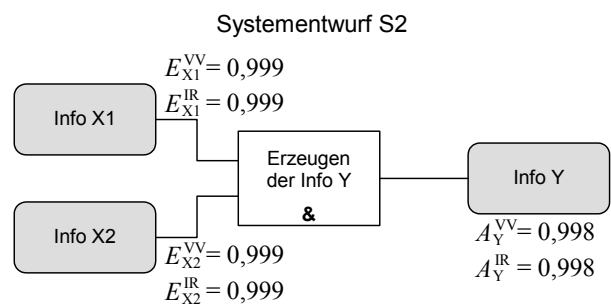


Abbildung 5-30: Erhöhung der Qualität der Eingangsinformation als Maßnahme zur Fehlervermeidung

### Maßnahmen zur Fehlervermeidung

Eine Möglichkeit der Forderung einer maximalen Ausfallwahrscheinlichkeit von  $10^{-3}$  zu entsprechen, ist durch die Verwendung von Daten mit einer höheren Wahrscheinlichkeit der Erfüllung

der Forderung an die Vollständige Verfügbarkeit gegeben. Der Informationsfluss und die damit verbundene Informationsverarbeitung bleiben unverändert (Abbildung 5-30). Durch die Verwendung von Informationen, die eine Vollständige Verfügbarkeit von jeweils 99,9% aufweisen, kann der Forderung entsprochen werden. Für die Praxis bedeutet dies, dass Informationen aus einer anderen Informationsquelle (z.B. Einsatz eines höherwertigen Sensors) verwendet werden müssen. Dies gilt ebenso für die Korrektheit.

An dieser Stelle soll kurz auf die grundlegenden Auswirkungen der Informationsqualität bei der Verbindung von Informationen über eine UND-Verknüpfung eingegangen werden. Die Ausführungen beschränken sich hierbei auf das Qualitätsmerkmal Vollständige Verfügbarkeit. Für die anderen Qualitätsmerkmale gilt Entsprechendes. Der sich ergebende Zusammenhang zwischen der Vollständigen Verfügbarkeit der Eingangsinformationen und der Vollständigen Verfügbarkeit der Ausgangsinformation ist in Abbildung 5-31 dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass bei dieser Verknüpfungsform generell die Vollständige Verfügbarkeit der Ausgangsinformation gegenüber den Eingangsinformationen abnimmt, wobei sich dieser Effekt mit zunehmender Zahl  $n$  von Eingangsinformationen verstärkt. Die Forderung an die Vollständige Verfügbarkeit der Ausgangsinformation kann nur erreicht werden, wenn jede Eingangsinformation für sich mindestens die geforderte Vollständige Verfügbarkeit erfüllt.

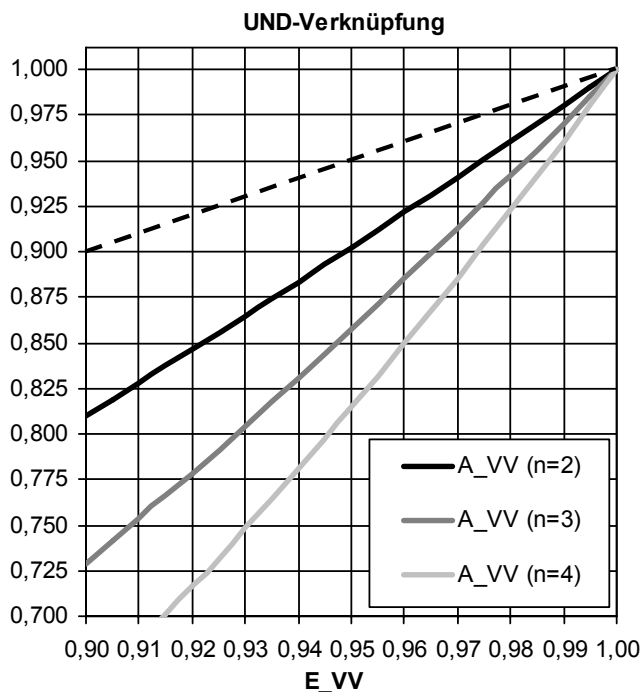


Abbildung 5-31: Zusammenhang zwischen der Vollständigen Verfügbarkeit der  $n$  Eingangsinformationen und der Ausgangsinformation bei einer UND-Verknüpfung

### Maßnahme zur Fehlerbeherrschung durch Redundanzen

Eine zweite Möglichkeit, den Anforderungen an die Informationsqualität zu genügen, bilden die Maßnahmen zur Fehlerbeherrschung. Im Folgenden werden die Auswirkungen auf die Informationsqualität durch die Verwendung von redundanten Informationen behandelt. Eine Betrachtung

der Kontrolle folgt im Anschluss. Für die Erläuterungen wird wiederum das oben angeführte System, das aus zwei Eingangsdaten  $X1$  und  $X2$  die Information  $Y$  erzeugt, herangezogen. Um den Forderungen zu genügen, werden die Eingangsdaten redundant ausgelegt (Abbildung 5-32).

Für  $X1$  liegt hierbei eine heiße Redundanz vor, die nach Kapitel 5.4.4.3 im Informationsflussdiagramm durch eine ODER-Verknüpfung dargestellt wird. Im Vergleich zum Systementwurf  $S2$  ergibt sich, trotz einer wesentlich geringeren Vollständigen Verfügbarkeit der Eingangsdaten  $X1.1$  und  $X1.2$  von 97,5%, mit 99,9% eine etwas höhere Wahrscheinlichkeit für die Vollständige Verfügbarkeit von  $X1$ . Mit der Implementierung einer heißen Redundanz kann die Vollständige Verfügbarkeit wesentlich gesteigert werden. Die Wahrscheinlichkeit, eine vollständig verfügbare Information zu erhalten, nimmt dabei mit der Anzahl der redundanten Informationen zu. Für die Korrektheit und die weiteren Qualitätsmerkmale gilt das nicht. Bei diesen bleibt die Wahrscheinlichkeit für die Erfüllung der Qualitätsforderung unverändert (vgl. Abbildung 5-33). Die Eingangsinformationen zu  $X1$  müssen deshalb bereits das geforderte bzw. notwendige Qualitätsniveau erfüllen.

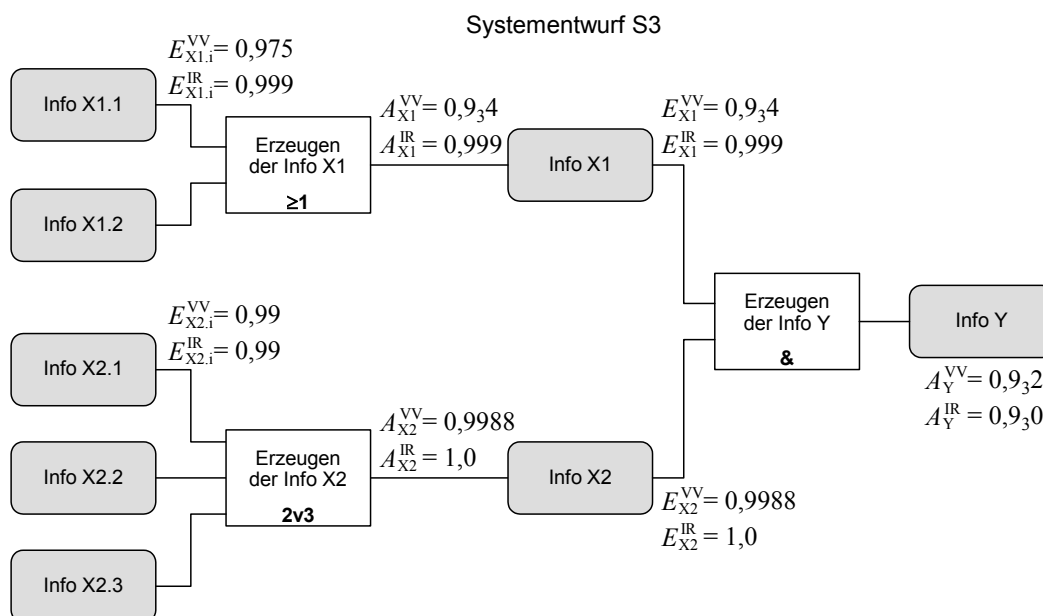


Abbildung 5-32: Redundanzen als Maßnahme zur Fehlerbeherrschung

Bei der Information  $X2$  handelt es sich um eine Majoritätsredundanz, die durch eine mvn-Verknüpfung im Informationsflussdiagramm dargestellt wird. Mit dem darin enthaltenen Vergleich (vgl. Kapitel 5.4.4.4) werden alle unkorrekten Informationen erkannt und eliminiert, wodurch die Information  $X2$  die Korrektheitsforderung zu 100% erfüllt. Aufgrund der Elimination der unkorrekten Information sinkt die Verfügbarkeit. Dabei nimmt die Vollständige Verfügbarkeit bei zunehmender Unkorrektheit ab (Abbildung 5-34). Bei der Verwendung der mvn-Verknüpfung ist stets zu prüfen, ob der Vergleich der eingehenden Informationen eine hundertprozentige Fehlererkennung ermöglicht. Ist dies nicht der Fall, ist der Informationsfluss mit einer einfachen Kontrolle zu modellieren. Im dargestellten Systementwurf  $S3$  zeigt sich, dass, obwohl die Vollständige Verfügbarkeit und die Korrektheit der eingehenden Daten  $X2.i$  die erforderlichen 99,9% nicht aufweisen, durch die Integration der 2v3-Verknüpfung beiden Forderungen entsprochen werden

kann. Mit der mvn-Verknüpfung kann demnach sowohl die Vollständige Verfügbarkeit als auch die Korrektheit gesteigert werden. Wie bei der ODER-Verknüpfung steigt die Vollständige Verfügbarkeit der Ausgangsinformation mit der Zahl der Eingangsinformationen.

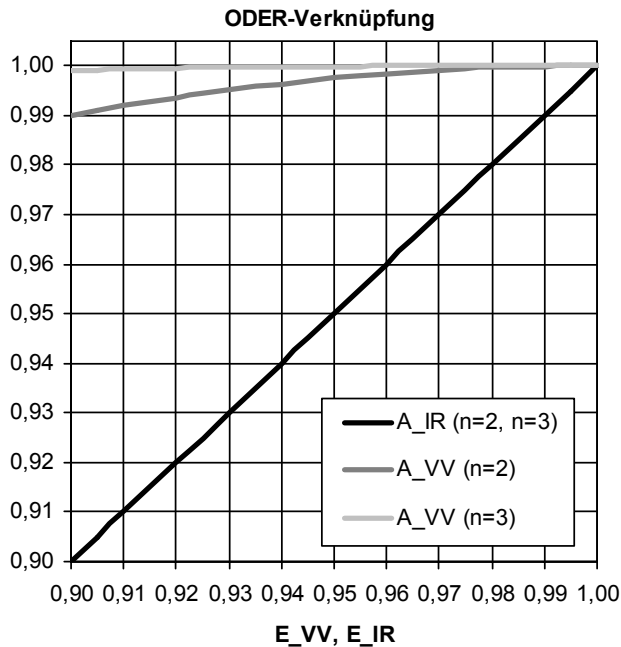


Abbildung 5-33: Zusammenhang zwischen der Vollständigen Verfügbarkeit bzw. der Korrektheit der Eingangsinformationen und der Ausgangsinformation bei einer ODER-Verknüpfung

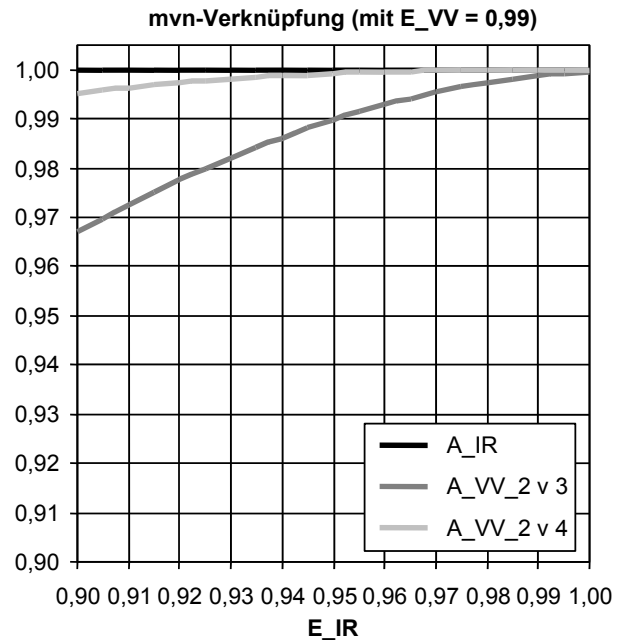


Abbildung 5-34: Zusammenhang zwischen der Vollständigen Verfügbarkeit und der Korrektheit der Eingangsinformationen und der Ausgangsinformation bei einer mvn-Verknüpfung

### Maßnahme zur Fehlerbeherrschung durch Kontrollen

Abschließend wird die Kontrolle als zweite Maßnahme zur Steigerung der Informationsqualität durch Fehlerbeherrschung erläutert. Bei dem Systementwurf *S4* (Abbildung 5-35) entspricht der Teil für die Information *X2* dem Systementwurf *S2*. Für die Information *X1* ergibt sich folgender Informationsfluss: Die Information *X1.1* wird in der ersten Applikation auf ihre Korrektheit hin überprüft. Diese Überprüfung kann z.B. auf einer Plausibilitätskontrolle beruhen. Ebenso ist es denkbar, dass die Information *X1.2* als Referenzinformation herangezogen wird, wobei dies dann einer mvn-Verknüpfung entspricht, bei der nicht von einer hundertprozentigen Erkennung der unkorrekten Informationen ausgegangen wird. Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Informationsqualität gilt für die Kontrolle, dass zu Lasten der Vollständigen Verfügbarkeit die Qualität des Merkmals steigt, für die die Kontrolle durchgeführt wird.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Im Gegensatz zu der mvn-Verknüpfung ist bei der einfachen Kontrolle die Überprüfung der Information nicht auf die Korrektheit beschränkt.

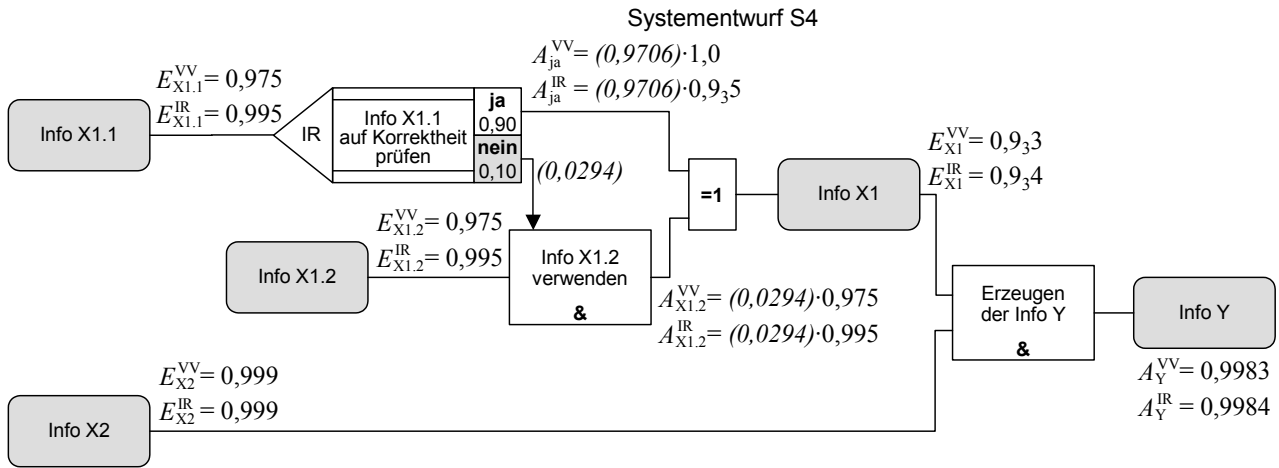


Abbildung 5-35: Korrekturen als Maßnahme zur Fehlerbeherrschung

**Zusammenfassung**

In Tabelle 5-6 sind die resultierende Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit der Ausgangsinformation in Abhängigkeit der Qualität der Eingangsdaten zusammenfassend dargestellt. Dabei zeigt sich, dass verschiedene Maßnahmen zur Erzeugung einer „Sicheren Information“ ergriffen werden können.

Tabelle 5-6: Zusammenfassung der Qualität der Ausgangsinformation Y in Abhängigkeit der Qualität der Eingangsdaten und der ergriffenen Maßnahme zur Steigerung der Informationsqualität

Systementwurf	$E_{1,i}^{VV}$	$E_{1,i}^{IR}$	$E_1^{VV}$	$E_1^{IR}$	$E_{2,i}^{VV}$	$E_{2,i}^{IR}$	$E_2^{VV}$	$E_2^{IR}$	$A_Y^{VV}$	$A_Y^{IR}$	$\bar{A}_Y^{VV}$ [10 <sup>-2</sup> %]	$\bar{A}_Y^{IR}$ [10 <sup>-2</sup> %]
S1 – keine	-	-	0,9 <sub>2</sub>	0,9 <sub>2</sub>	-	-	0,9 <sub>2</sub>	0,9 <sub>2</sub>	0,9 <sub>18</sub>	0,9 <sub>18</sub>	2,00	2,00
S2 – Eingangsdaten	-	-	0,9 <sub>3</sub>	0,9 <sub>3</sub>	-	-	0,9 <sub>3</sub>	0,9 <sub>3</sub>	0,9 <sub>28</sub>	0,9 <sub>28</sub>	0,20	0,20
S3 – Redundanz	0,975	0,9 <sub>3</sub>	0,9 <sub>34</sub>	0,9 <sub>3</sub>	0,9 <sub>2</sub>	0,9 <sub>2</sub>	0,9 <sub>29</sub>	1,0	0,9 <sub>32</sub>	0,9 <sub>3</sub>	0,08	0,10
S4 – Kontrolle	0,975	0,9 <sub>25</sub>	0,9 <sub>33</sub>	0,9 <sub>34</sub>	-	-	0,9 <sub>3</sub>	0,9 <sub>3</sub>	0,9 <sub>28</sub>	0,9 <sub>28</sub>	0,17	0,16

Ein Hauptziel bei der Entwicklung sicherheitsrelevanter informationsverarbeitender Systeme muss es sein, durch den Einsatz geeigneter Daten und Informationen und einer Festsetzung einer angemessenen Informationsverarbeitung, die Maßnahmen zur Fehlervermeidung und Fehlerbeherrschung derartig auszunutzen, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens gefährlicher Fehler den akzeptierten Grenzwert nicht überschreitet. Der rechnerische Nachweis für die „Sichere Information“ kann über das vorgestellte Qualitätskonzept und dem darin enthaltenen Analyseverfahren erbracht werden. Welche Maßnahmen im Einzelfall zum Einsatz kommen, ist u.a. abhängig von der Verfügbarkeit qualitativ höherwertiger Informationen und der möglichen Integration von Redundanzen und Kontrollen. In der Praxis gilt es hierbei nicht nur das technisch Machbare, sondern insbesondere Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit, wie den Kostenrahmen für die Sensorkomponenten eines Fahrerassistenzsystems oder die Refinanzierbarkeit der Fortführungsrate einer digitalen Karte, zu berücksichtigen.

## 6 Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität am Beispiel des Ampel- und Vorfahrterkenners

### 6.1 Einleitung

Am Beispiel eines Fahrerassistenzsystems soll die Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität eines Fahrerassistenzsystems unter Verwendung des in Kapitel 5 vorgestellten Qualitätskonzepts ausführlich dargestellt werden. Es wird dazu der Ampel- und Vorfahrterkenner gewählt, auf den bereits im Rahmen der Betrachtung von sicherheitssteigernden Assistenzsystemen für den Stadtverkehr (Kapitel 3.4) eingegangen wurde. Ziel des Ampel- und Vorfahrterkenners ist, den Fahrer in der Erkennung der durch Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen angezeigten Vorfahrtsregelung zu unterstützen. Dazu benötigt das System Informationen über die geltende Vorfahrtsregelung. Daneben sind – abhängig von der gewählten Systemkonzeption – weitere Informationen wie die Fahrzeugposition, der Abstand zum nächsten Knotenpunkt, die Fahrtrichtung und das Fahrerverhalten erforderlich. Die verschiedenen möglichen Eingangsinformationen eines Ampel- und Vorfahrterkenners werden in Kapitel 6.2 beschrieben. Dabei werden die unterschiedlichen Informationsquellen und -lieferanten vorgestellt und im daran anschließenden Kapitel die Informationsqualität der Eingangsinformationen festgesetzt. Mit der bestehenden Abhängigkeit zwischen den genutzten Informationsquellen des Assistenzsystems und dem Assistenzkonzept (vgl. Kapitel 3.2) lassen sich hierbei **fahrzeugautonome** und **infrastrukturgestützte** Systemansätze unterscheiden. Ein kooperatives Assistenzkonzept eines Ampel- und Vorfahrterkenners wird im Rahmen dieser Untersuchung nicht behandelt.

Hinsichtlich der Assistenzstrategie werden die Systemvarianten **informieren** und **warnen**, die einen indirekten Eingriff in den Fahrprozess tätigen, sowie das **Intervenieren**, als direkte Eingriffsform, untersucht. In Kapitel 3.2 sind die Assistenzstrategien ausführlich beschrieben und ihre Auswirkungen auf den Fahrprozess im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt dargestellt. Unter Berücksichtigung des in Kapitel 3.4 aufgezeigten Zusammenhangs zwischen dem durch die Assistenzstrategie vorliegenden Eingriffsniveau und den zu stellenden Anforderungen an die Qualität der fahrerunterstützenden Informationen zur Gewährleistung des geforderten Sicherheitsniveaus, werden in Kapitel 6.4 die Anforderungen an die Informationsqualität des Vorfahrtshinweises für die beiden Systemkonzepte aufgestellt. Im abschließenden Kapitel 6.5 erfolgt für verschiedene Systemansätze des Ampel- und Vorfahrterkenners die Analyse der Informationsqualität und eine Diskussion über deren Eignung, die gestellten Anforderungen an die Informationsqualität zu erfüllen.

### 6.2 Informationsquellen

Die **Vorfahrtsregelung** bildet die wichtigste Information des Ampel- und Vorfahrterkenners. Im Rahmen der Untersuchung wird von einem Assistenzsystem ausgegangen, dessen Vorfahrtshinweise auf die durch Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen angezeigte Vorfahrts- und Vorrangsregelung beschränkt sind. Der Hinweis erfolgt somit unabhängig davon, ob in der vorliegenden Verkehrssituation ein vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer existiert. Die Implementierung einer derartigen Funktionalität würde zusätzlich die Erkennung und Prognostizierung der Absichten

der anderen Verkehrsteilnehmer erfordern. Für die durch Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen angezeigte Vorfahrtsregelung kommen folgende Informationsquellen in Betracht:

- Bildverarbeitungssystem zur Erkennung von Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen
- digitale Karte mit Informationen zur Vorfahrtsregelung
- Lichtsignalanlagen und Verkehrszeichen, die mit einer Kommunikationseinrichtung zur Übertragung der vorfahrtsregelnden Information ausgestattet sind.

Bei den meisten Systemvarianten und insbesondere bei denen mit einer digitalen Karte, sind Informationen zur **Fahrzeugposition** erforderlich. Davon ausgehend, dass mittelfristig ein Navigationssystem zur Standardausstattung eines Pkws gehört, wird im Rahmen dieser Untersuchung das Navigationssystem als Lieferant der Fahrzeugposition genutzt. Aufgrund der orts- und zeitgleichen Fahrerunterstützung eines Ampel- und Vorfahrterkenners und eines Navigationssystems ist ohnehin eine Abstimmung der Informationsausgaben erforderlich und somit eine Kombination beider Systeme anzustreben. Über die Fahrzeugposition und die für den Knotenpunkt in der digitalen Karte gespeicherte Position kann der **Abstand** zum Knotenpunkt berechnet werden. Dies kann ebenso über ein Bildverarbeitungssystem erfolgen.

Mit der berechneten Route besitzt das Navigationssystem ebenso Hinweise zur beabsichtigten **Fahrtrichtung**. Diese Information ist notwendig, um an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten mit fahrtrichtungsabhängiger Schaltung den für die gewählte Fahrtrichtung geltenden Signalgeber zu identifizieren. Weitere mögliche Informationsquellen zur Fahrtrichtung bilden ein Bildverarbeitungssystem mit einer Fahrstreifenenerkennung und der Fahrtrichtungsanzeiger. Die **Fahrzeuggeschwindigkeit** kann beispielsweise vom Tachosignal oder vom Navigationssystem gewonnen werden.

Da beim warnenden und intervenierenden Ampel- und Vorfahrterkenner nur im Falle einer drohenden Missachtung ein Hinweis erfolgt, sind ferner Informationen zum **Fahrerverhalten** notwendig. Im einfachsten Fall kann das System aus der Geschwindigkeit und dem Abstand zum nächsten Knotenpunkt prognostizieren, ob der Fahrer die Wartepflicht bzw. das Rotlicht erkannt hat.

Im Folgenden werden die einsetzbaren Informationsquellen für die Vorfahrtsregelung ausführlich vorgestellt und die Applikation der Informationsgewinnung anhand eines Informationsflussdiagramms dargestellt.

### **Bildverarbeitung**

Über eine im Fahrzeug befindliche Videokamera wird der in Fahrtrichtung liegende Verkehrsraum erfasst. Mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung werden die im Bild enthaltenen Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen erkannt. Für den Einsatz im Stadtverkehr ergeben sich hierbei besondere Anforderungen an die Kamera. Gegebenenfalls sind hierfür mehrere Kameras mit unterschiedlicher Brennweite oder drehbare Kameras notwendig (FRANKE 1999). Die Bildverarbeitung kann fahrzeugautonom eingesetzt werden und bietet den großen Vorteil, dass die Informationen stets aktuell sind. Probleme bestehen in der geringen Erkennungsrate von ca. 90% (FRANKE et al. 1999). Dies ist u.a. auf die hohe Verwechslungsgefahr durch die in Stadtsituationen auftretenden komplexen Bildszenen und der Gefahr von verdeckten Objekten aufgrund bestehender Sichthindernisse (z.B. durch vorausfahrenden Lkw) zurückzuführen.



Das in Abbildung 6-1 dargestellte Informationsflussdiagramm zur Bildverarbeitung berücksichtigt über die Systemkomponente Sichthindernis (2) dessen Einfluss auf die Vollständige Verfügbarkeit der relevanten Objekte im digitalen Bild. Mit dem Übergangssymbol (4') wird die Qualität des Bildverarbeitungsalgorithmus hinsichtlich der korrekten und vollständigen Erkennung der Objekte angegeben.

### **Digitale Karte**

Bei der Nutzung von vorfahrtsregelnden Informationen aus einer digitalen Karte ist zu berücksichtigen, dass neben Fehlern in der Erfassung (1) sich weitere Fehler durch die Datenalterung (3') einstellen. Diese beiden maßgeblichen Einflüsse auf die Informationsqualität sind in dem in Abbildung 6-2 dargestellten Informationsflussdiagramm entsprechend berücksichtigt.

Bestrebungen, um insbesondere die Fortführungsproblematik zu lösen, gehen beispielsweise in Richtung „lernende Karte“ (SCHRAUT 2000). Hierbei ist zu bedenken, dass bei einem fahrzeugautonomen Ansatz Änderungen erst durch wiederholtes Befahren derselben Strecke erkannt werden. Bei einem infrastrukturgestützten Ansatz müssen die Daten vom Fahrzeug in die Zentrale übertragen werden und dort Änderungen festgestellt und korrekt eingepflegt werden. Die fortgeführten Daten müssen dann wiederum an die Verkehrsteilnehmer übermittelt werden. Der Ansatz zeigt, dass hierfür umfangreiche Datenmengen kommuniziert werden müssen und somit die Kommunikation als eine zusätzliche Fehlerquelle zu betrachten ist, die insbesondere die Vollständige Verfügbarkeit, Korrektheit und Konsistenz negativ beeinflusst.

Die digitale Karte hat den Vorteil, dass sie sowohl bei einem fahrzeugautonomen wie infrastrukturgestützten Assistenzkonzept eines Ampel- und Vorfahrterkenners eingesetzt werden kann. Der große Nachteil besteht darin, dass keine dynamische Information in der Karte vorgehalten werden kann und somit der Hinweis zur Anzeige des Signalgebers entfallen muss. Des Weiteren ist eine Information zur Fahrzeugposition erforderlich, um die relevante Vorfahrtsinformation aus der Karte auszulesen.

### **Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen**

Um Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen als Informationsquellen eines Ampel- und Vorfahrterkenners nutzen zu können, müssen diese die vorfahrtsregelnde Information nicht nur in der gewohnten Form anzeigen, sondern zusätzlich noch digital bereitstellen und über eine geeignete Kommunikationseinrichtung in das Fahrzeug übertragen. Hierbei ergeben sich insbesondere bei den schildergeregelten Knotenpunkten, aufgrund der geringen Ausstattung und der großen Anzahl, extrem hohe Investitionskosten. Weniger kritisch zeigt sich dies an den lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten, bei denen die bestehende Stromversorgung und der vorhandene Kreuzungsrechner genutzt werden können und somit nur die fehlende Kommunikationseinrichtung zu ergänzen ist.

Bei einer Beschränkung der Speicherung und Aussendung der Vorfahrtsregelung auf Lichtsignalanlagen, die dann neben der eigenen Vorfahrtsregelung die Vorfahrtsregelung der umliegenden schilder- und rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkte an das Fahrzeug übertragen, ergibt sich eine kostengünstigere Systemvariante.

Tabelle 6-1: Informationsquellen des Ampel- und Vorfahrterkenners für vorfahrtsregelnde Informationen

Informationsquelle	Assistenzkonzept	Probleme
<b>Bildverarbeitung (BV)</b>	fahrzeugautonom	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Erkennungsrate</li> <li>• Verwechslungsgefahr</li> <li>• Sichthindernisse</li> </ul>
<b>Digitale Karte (DK)</b>	fahrzeugautonom, infrastrukturgestützt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fortführung (Aktualität)</li> <li>• keine Informationen zum LSA-Status</li> <li>• fehlende Informationen zu vorfahrtsregelnden Verkehrszeichen bzw. Knotenpunktregelung in den heute verfügbaren digitalen Straßenkarten</li> </ul>
<b>Lichtsignalanlage (LSA)</b>	infrastrukturgestützt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fehlende Kommunikationseinrichtung</li> </ul>
<b>Verkehrszeichen (VZ)</b>	infrastrukturgestützt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fehlende Kommunikationseinrichtung</li> <li>• hohe Investitionskosten wegen geringer bestehender Infrastrukturausstattung</li> </ul>

### 6.3 Qualität der Eingangsdaten

Für die im vorherigen Kapitel aufgeführten Informationsquellen werden im Folgenden die zu erwartende Qualität der Eingangsinformationen erörtert und für die in Kap. 6.5 durchzuführende Analyse der Informationsqualität festgelegt. Die festgesetzten Qualitätsgrößen erheben hierbei keinesfalls den Anspruch auf absolute Korrektheit. In vielen Fällen würde dies umfangreiche Voruntersuchungen und oftmals eine wesentlich detailliertere Betrachtung einzelner Systemzustände und Umgebungseinflüsse erfordern. Ziel ist vielmehr, für die Eingangsinformationen plausible Qualitätsgrößen zu finden. Zu den meisten Informationen wird ein zweites alternatives Qualitätstupel mit einer höheren Qualität angegeben. Zur Unterscheidung werden hierfür die beiden Qualitätsstufen Q1 und Q2 eingeführt.

#### Vorfahrtsregelung und Fahrstreifen aus Bildverarbeitung

Die wesentlichen qualitätsbeeinflussenden Elemente der Bildverarbeitung sind die Sichtbehinderung und Erkennungsrate des Bildverarbeitungsalgorithmus. Des Weiteren ist, wie in Abbildung 6-1 dargestellt, der Einfluss der technischen Komponente CCD-Sensor zu berücksichtigen. Für diesen wird eine Vollständige Verfügbarkeit von  $E_{CCD}^{VV} = 0,9_4$  und eine Korrektheit von  $E_{CCD}^{IR} = 0,9_6$  festgesetzt. Hinsichtlich der Sichtbehinderung ist zu berücksichtigen, ob die relevanten Verkehrszeichen bzw. Signalgeber einfach oder mehrfach auftreten, da bei einer Mehrfachsignalisierung die Wahrscheinlichkeit einer Sichtbehinderung sinkt. An den schildergeregelten Knotenpunkten wird generell ein Verkehrszeichen am rechten Fahrbahnrand und in Ausnahmefällen zusätzlich ein zweites Schild am linken Fahrbahnrand aufgestellt (HAV 1992). An lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten sind bei einer gemeinsamen Signalisierung mindestens zwei Signalgeber, bei einer getrennten Signalisierung für die durchgehende Fahrtrichtung mindestens zwei und für jede gesonderte Fahrtrichtung mindestens ein Signalgeber angebracht (FGSV 1992). Unter diesem Aspekt wird bei einem schildergeregelten Knotenpunkt eine Verdeckungsrate von  $10^{-2}$  festgesetzt. Beim lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt wird von einer Verdeckungsrate von  $5 \cdot 10^{-3}$  ausgegangen mit

Ausnahme der Verkehrssituationen, in denen nach links abgebogen wird. Hierfür wird mit  $10^{-2}$  dieselbe Verdeckungsrate wie für die Verkehrszeichen angesetzt.

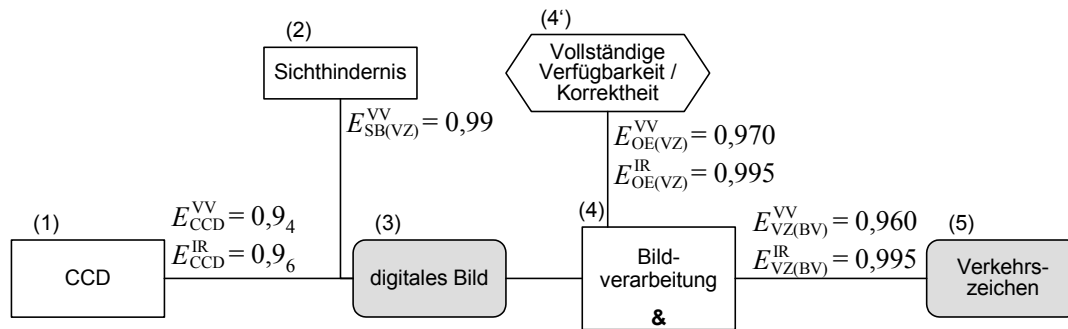


Abbildung 6-1: Informationsflussdiagramm für die Bildverarbeitung

Beim Bildverarbeitungsalgorithmus wird davon ausgegangen, dass bei einem Schild eine höhere Erkennungsrate vorliegt als bei einem Signalgeber. In Tabelle 6-2 sind die festgelegten Qualitätsgrößen für den Bildverarbeitungsalgorithmus für die Objekterkennung von Schild (VZ), Signalgeber (SG) und Fahrstreifen (FS) aufgeführt. Mit den oben aufgeführten Qualitätsgrößen für den Sensor und die Sichtbehinderung ergibt die Auswertung des Informationsflussdiagramms in Abbildung 6-1 die in Tabelle 6-7 aufgeführten Qualitätswerte für die vom Bildverarbeitungssystem gelieferten Informationen zur Vorfahrtsregelung und Fahrstreifen. Bei der Fahrstreifenenerkennung wird dabei nicht von einer Beeinträchtigung der Vollständigen Verfügbarkeit aufgrund einer Sichtbehinderung ausgegangen.

Tabelle 6-2: Qualitätsgrößen für die Objekterkennung des Bildverarbeitungsalgorithmus

Objekt-erkennung		Qualitätsstufe Q1		Qualitätsstufe Q2	
		VV	IR	VV	IR
Schild (VZ)	$Q_{OE(VZ)}$	0,970	0,995	0,990	0,935
Signalgeber (SG)	$Q_{OE(SG)}$	0,950	0,990	0,980	0,930
Fahrstreifen (FS)	$Q_{OE(FS)}$	0,970	0,950	0,990	0,995

### Vorfahrtsregelung und Straßennetz aus digitaler Karte

Die beiden wesentlichen Einflussfaktoren auf die Qualität einer digitalen Karte sind die Erfassungsqualität und Aktualität der Kartendaten. Für die Erfassung wird bei der Qualitätsstufe Q1 von einer Vollständigen Verfügbarkeit von 0,995 und einer Korrektheit von 0,990 ausgegangen. Für Q2 werden beide Qualitätsmerkmale mit 0,93 festgesetzt. Bezüglich der metrischen Genauigkeit wird für beide Qualitätsstufen jeweils eine Standardabweichung von 5,0 Metern angenommen.

Zur Berücksichtigung der Aktualität der Kartendaten wird eine Veränderungsrate von  $a_{VV} = 0,005$  bzw.  $a_{IR} = 0,02$  pro Jahr festgelegt, die den Einfluss der Aktualität auf die Vollständige Verfügbarkeit und die Korrektheit der Kartendaten angibt. Mit

$$f = (a_{QM}, t) = (1 - a_{QM})^t \tag{6-1}$$

lassen sich die Qualitätsgrößen in Abhängigkeit der Fortführungsrate  $t$  berechnen (Tabelle 6-3). Bei den angegebenen Qualitätswerten in Tabelle 6-7 wird dabei von einer jährlichen bzw. vierteljährlichen Fortführung der Karte ausgegangen. Die deutlich höhere Vollständige Verfügbarkeit der Verkehrszeichen  $E_{DK_{VZ}}^{VV}$  gegenüber dem Straßennetz  $E_{DK_{Netz}}^{VV}$  ist darauf zurückzuführen, dass die Qualitätsgröße die Wahrscheinlichkeit der Vollständigen Verfügbarkeit der Verkehrszeichen unter der Bedingung eines vollständig verfügbaren Straßennetzes angibt. Diese Betrachtungsweise ist notwendig, um bei der späteren Analyse der Informationsqualität stochastisch unabhängige Eingangsgrößen zu verwenden. Dies betrifft die Systemansätze in Kapitel 6.5.2.1 und 6.5.2.3, die die logische Position vom Navigationssystem zum Auslesen der Vorfahrtsregelung aus der digitalen Karte nutzen (Abbildung 6-5). Bei diesen wird bereits beim Navigationssystem das in der digitalen Karte gespeicherte Straßennetz als Informationsquelle herangezogen (vgl. Abbildung 5-28).

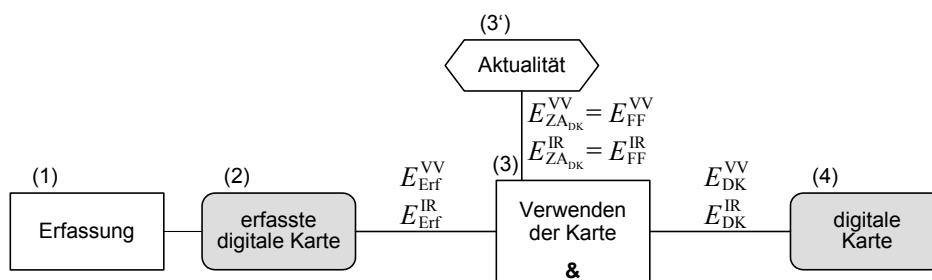


Abbildung 6-2: Informationsflussdiagramm für die digitale Karte

Tabelle 6-3: Einfluss der Fortführungsrate auf die Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit der Kartendaten

Fortführungsrate	$t$	$Q_{ZA_{DK}}(t)$		Veränderungsrate [%]
		VV	IR	
wöchentlich	0,02	0,9 <sub>4</sub> 0	0,9 <sub>3</sub> 6	0,05
monatlich	0,08	0,9 <sub>3</sub> 6	0,998	0,2
4x pro Jahr	0,25	0,9 <sub>3</sub> 0	0,995	0,6
1x pro Jahr	1,0	0,995	0,980	2,5
alle 5 Jahre	5,0	0,975	0,904	11,8

Tabelle 6-4: Qualitätsgrößen für die Erfassung der digitalen Karte

Eingangsinformation		Qualitätsstufe Q1			Qualitätsstufe Q2		
		VV	IR	GM	VV	IR	GM
(Erst-)Erfassung	$Q_{Erf_{Netz}}$	0,995	0,990	5,0 m	0,9 <sub>3</sub>	0,9 <sub>3</sub>	5,0 m
Fortführung	$Q_{FF_{Netz}}$	0,995	0,980	5,0 m	0,9 <sub>3</sub>	0,995	5,0 m
<b>Straßennetz (DK)</b>	$Q_{DK_{Netz}}$	0,990	0,970	5,0 m	0,998	0,994	5,0 m
(Erst-)Erfassung	$Q_{Erf_{VZ}}$	0,995	0,990	5,0 m	0,9 <sub>3</sub>	0,9 <sub>3</sub>	5,0 m
Fortführung	$Q_{FF_{VZ}}$	0,995	0,980	5,0 m	0,9 <sub>3</sub>	0,995	5,0 m
<b>Vorfahrtsregelung (DK)</b>	$Q_{DK_{VZ}}$	0,990	0,970	5,0 m	0,998	0,994	5,0 m

### Vorfahrtsregelung durch Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen

Bei einer Bereitstellung der vorfahrtsregelnden Information durch Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen kann von einer sehr hohen Vollständigen Verfügbarkeit und Korrektheit der Informationen ausgegangen werden. Für die Untersuchung des Ampel- und Vorfahrterkenners sind die in Tabelle 6-6 aufgeführten Qualitätsgrößen festgesetzt. Auf eine Unterscheidung von zwei Qualitätsstufen wird hierbei verzichtet. Wird die Vorfahrtsinformation der schildergeregelten und lichtsignalgesteuerten Knotenpunkte durch die umliegenden Lichtsignalanlagen mit übertragen, so muss von einer etwas geringeren Vollständigen Verfügbarkeit und Korrektheit der Vorfahrtsinformationen ausgegangen werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass an den Lichtsignalanlagen jeweils die in der Umgebung liegenden Vorfahrtsregelungen der schilder- und rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkte gespeichert sein müssen. Als Informationsquelle entspricht dies einer kleinräumigen digitalen Karte, die im weiteren Verlauf auch als Umgebungskarte bezeichnet wird. Die festgesetzten Werte für die Umgebungskarte entsprechen dabei der Qualität einer Karte mit einem monatlichen bzw. wöchentlichen Fortführungszyklus und einer Erfassungsqualität von jeweils  $0,9_3$  bzw.  $0,9_4$  für die Vollständige Verfügbarkeit und die Korrektheit.

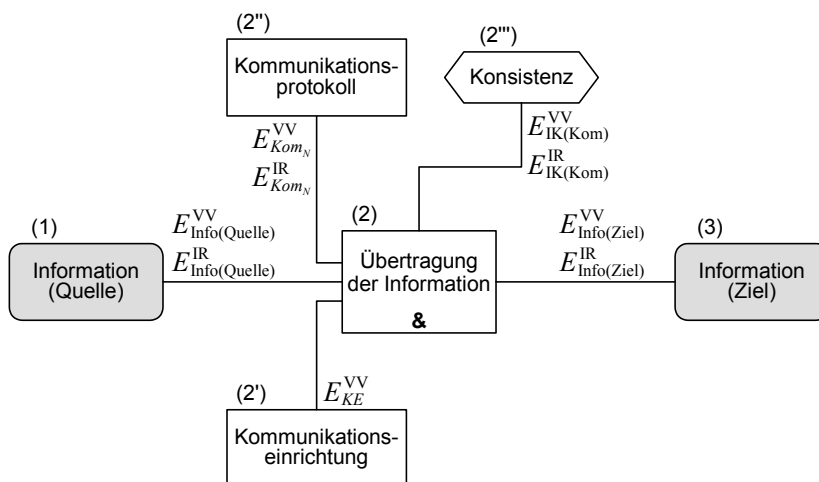


Abbildung 6-3: Informationsflussdiagramm für die Übertragung von Informationen

Die notwendige Übertragung der Information von der Infrastruktur ins Fahrzeug erfolgt über eine geeignete Kommunikationseinrichtung, deren Einfluss auf die Informationsqualität zu berücksichtigen ist. Die qualitätsbeeinflussenden Elemente der Kommunikation lassen sich in

- Signalverfügbarkeit
- Kommunikationsprotokoll
- Konsistenz

einteilen (vgl. Abbildung 6-3). Mit der Signalverfügbarkeit wird die technische Ausprägung der Kommunikationseinrichtung (2') und die damit verbundene Verfügbarkeit des Signals auf Seiten des Empfängers beschrieben. Es wird hierbei die Datenübertragung mittels Bake, Kreuzungssender und Balise unterschieden. Bei der Balisentechnik wird von einer höheren Verfügbarkeit ausgegangen als bei den beiden anderen Kommunikationseinrichtungen (vgl. Tabelle 6-5). Der Einfluss von Fehlern in der Datenübertragung wird über das Kommunikationsprotokoll (2'') berücksichtigt.

Ausgehend von einer Bitfehlerrate  $f_b$ , einer Fehlerkennungsrate  $K_f$  und einer übertragenen Datenmenge  $N$  [Byte] lassen sich mit

$$E_{Kom_N}^{VV} = 1 - K_f \cdot (8N \cdot f_b) \quad \text{und} \quad E_{Kom_N}^{IR} = 1 - (1 - K_f) \cdot (8N \cdot f_b) \quad (6-2)$$

die Qualitätsgrößen für das Kommunikationsprotokoll berechnen. Bei den in Tabelle 6-5 angegebenen Werten wird von einer Bitfehlerrate von  $10^{-6}$  bzw.  $10^{-8}$  und einer Fehlerkennungsrate von 95% ausgegangen.

Tabelle 6-5: *Qualitätsgrößen für die Datenkommunikation*

Kommunikations- element		Ausprägung	Qualitätsstufe Q1		Qualitätsstufe Q2	
			VV	IR	VV	IR
Kommunikations- einrichtung	$Q_{KE}$	Bake	0,9 <sub>4</sub>	–	0,9 <sub>5</sub>	–
		Kreuzungssender	0,9 <sub>4</sub>	–	0,9 <sub>5</sub>	–
		Balise	0,9 <sub>5</sub>	–	0,9 <sub>6</sub>	–
Kommunikations- protokoll	$Q_{Kom_N}$	≈ 10 Bytes	0,9 <sub>4</sub> 2	0,9 <sub>5</sub> 6	0,9 <sub>6</sub> 2	0,9 <sub>7</sub> 6
		≈ 100 Bytes	0,9 <sub>3</sub> 2	0,9 <sub>4</sub> 6	0,9 <sub>5</sub> 2	0,9 <sub>6</sub> 6
Konsistenz	$Q_{IK(Kom)}$		0,9 <sub>5</sub>	0,9 <sub>6</sub>	0,9 <sub>5</sub>	0,9 <sub>6</sub>

Tabelle 6-6: *Qualitätsgrößen für die Bereitstellung der Informationen zur Vorfahrtsregelung durch Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen*

Eingangs- information		Qualitätsstufe Q1			Qualitätsstufe Q2		
		VV	IR	GM	VV	IR	GM
(Erst-)Erfassung	$Q_{Erf_{VZ}}$	0,9 <sub>3</sub>	0,9 <sub>3</sub>	5,0 m	0,9 <sub>4</sub>	0,9 <sub>4</sub>	5,0 m
Fortführung	$Q_{Erf_{VZ}}$	0,9 <sub>3</sub> 6	0,998	5,0 m	0,9 <sub>4</sub> 0	0,9 <sub>3</sub> 6	5,0 m
Verkehrszeichen in Umgebungskarte	$Q_{Erf_{VZ}}$	0,999	0,979	5,0 m	0,9 <sub>3</sub> 8	0,9 <sub>3</sub> 5	5,0 m

Tabelle 6-7: *Eingangsinformationen des Ampel- und Vorfahrterkenners für die Ermittlung der vorfahrtsregelnden Information*

Eingangs- information	Informations- quelle		Qualitätsstufe Q1			Qualitätsstufe Q2		
			VV	IR	GM	VV	IR	GM
Verkehrs- zeichen	Bildverarbeitung	$Q_{VZ(BV)}$	0,960	0,995	-	0,980	0,9 <sub>3</sub> 5	-
	Digitale Karte	$Q_{DK_{VZ}}$	0,9 <sub>3</sub> 8	0,970	5,0 m	0,9 <sub>4</sub> 8	0,994	5,0 m
	Verkehrszeichen	$Q_{VZ(VZ)}$	0,9 <sub>6</sub>	0,9 <sub>6</sub>	1,0 m	0,9 <sub>6</sub>	0,9 <sub>6</sub>	1,0 m
	Lichtsignalanlage	$Q_{VZ(LSA)}$	0,999	0,997	5,0 m	0,9 <sub>3</sub> 8	0,9 <sub>3</sub> 5	5,0 m
Signalgeber	Bildverarbeitung	$Q_{SG(BV)}$	0,945	0,990	-	0,975	0,999	-
		$Q_{SG_{F2}(BV)}$	0,940	0,990	-	0,970	0,999	-
	Lichtsignalanlage	$Q_{SG(LSA)}$	0,9 <sub>9</sub>	0,9 <sub>9</sub>	1,0 m	0,9 <sub>9</sub>	0,9 <sub>9</sub>	1,0 m
Straßennetz	Digitale Karte	$Q_{DK_{Netz}}$	0,990	0,970	5,0 m	0,998	0,994	5,0 m
Position	Navigationssystem	$Q_{Pos(Zif)}$	0,9 <sub>3</sub> 5	0,985	10,0 m	0,9 <sub>3</sub> 5	0,988	10,0 m
		$Q_{logPos}$	0,953	0,995	5,0 m	0,981	0,998	5,0 m
Fahrstreifen / Fahrtrichtung	Bildverarbeitung	$Q_{FS(BV)}$	0,970	0,970	-	0,990	0,995	-
	Navigationssystem	$Q_{Route(Zif)}$	0,953	0,995	-	0,981	0,998	-

### Position

Als Informationslieferant der Fahrzeugposition fungiert das Navigationssystem. In Kapitel 5.4.5, Beispiel 3, wurde bereits die sich ergebende Qualität der Fahrzeugposition analysiert. Für die digitale Karte wurden hierbei die in Tabelle 6-4 aufgeführten Qualitätsgrößen zu Q1 und die in Tabelle 6-3 angegebenen Werte für die jährliche Fortführung herangezogen. Nach (5-94) weist die vom Navigationssystem gelieferte Fahrzeugposition eine Qualität von

$$\mathbf{Q}_{\text{PosZif},Q1} = (E_{\text{PosZif},Q1}^{\text{VV}} ; E_{\text{PosZif},Q1}^{\text{IR}}) = (0,935 ; 985) \quad (6-3)$$

auf. Beschränkt auf die logische Fahrzeugposition gilt mit (5-95):

$$\mathbf{Q}_{\log\text{Pos}(\text{Zif}),Q1} = \mathbf{Q}_{\text{PosMM}} = (E_{\log\text{Pos}(\text{Zif}),Q1}^{\text{VV}} ; E_{\log\text{Pos}(\text{Zif}),Q1}^{\text{IR}}) = (0,953 ; 0,995) \quad (6-4)$$

Da beim Einsatz einer digitalen Karte nur über den topologischen Bezug zum Straßennetz auf die Vorfahrtsregelung der Knotenpunktzufahrt geschlossen werden kann, ist für den Ampel- und Vorfahrterkenner die Qualität der logischen Fahrzeugposition ausschlaggebend.

Unter Verwendung der Qualitätsgrößen  $\mathbf{Q}_{\text{DK}_{\text{Netz}},Q2}$  der digitalen Karte ergibt sich für die logische Fahrzeugposition des Navigationssystem das Qualitätstupel zu

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{\log\text{Pos},Q1} = \mathbf{Q}_{\text{PosMM}} &= (E_{\log\text{Pos},Q1}^{\text{VV}} ; E_{\log\text{Pos},Q1}^{\text{IR}}) = (0,953 ; 0,995) \quad \text{und} \\ \mathbf{Q}_{\log\text{Pos},Q2} &= (E_{\log\text{Pos},Q2}^{\text{VV}} ; E_{\log\text{Pos},Q2}^{\text{IR}}) = (0,981 ; 0,998) \end{aligned} \quad (6-5)$$

### Fahrerverhalten

Wie bereits in Kapitel 6.2 beschrieben, kann im einfachsten Fall aus dem Abstand zum Knotenpunkt und der Fahrzeuggeschwindigkeit des Fahrzeugs auf die Erkennung der Vorfahrtsregelung durch den Fahrer geschlossen werden. Die Abstandsinformation ist dabei eng gekoppelt an die Gewinnung der vorfahrtsregelnden Information, da meist dieselbe Informationsquelle genutzt wird. So kann bei einer digitalen Karte der Abstand aus der Fahrzeugposition und der in der Karte verzeichneten Position des Knotenpunkts berechnet werden. Über das Bildverarbeitungssystem ist der Abstand zu erkannten Objekten bestimmbar. Bei den infrastrukturgestützten Systemvarianten kann bei der Verwendung von Baken über die Laufzeit des ausgesandten Signals auf den Abstand zum Verkehrszeichen bzw. der Lichtsignalanlage geschlossen werden. Die zweite Variante nutzt den Abstand der Balise zum Knotenpunkt und den zurückgelegten Weg des Fahrzeugs relativ zur Balise. Die Differenz der beiden Informationen ergibt den Abstand des Fahrzeugs zum Knotenpunkt. Durch die enge Koppelung an die vorfahrtsregelnde Information kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Vollständigen Verfügbarkeit der vorfahrtsregelnden Information auch die Abstandsinformation vollständig verfügbar ist. Dasselbe gilt für die Korrektheit. Ebenso kann davon ausgegangen werden, dass über das Tachosignal die Fahrzeuggeschwindigkeit mit einer sehr hohen Verfügbarkeit und Korrektheit bereitgestellt werden kann.

## 6.4 Anforderungen an die Qualität der fahrerunterstützenden Information

Wie in Kapitel 3.3 ausführlich dargelegt, wird das Eingriffsniveau eines Fahrerassistenzsystems maßgeblich durch die angewandte Assistenzstrategie bestimmt. Da beim Warnen und Intervenieren

eine Kompensation durch den Fahrer im Falle einer unkorrekten Fahrerunterstützung nur in einem wesentlich geringeren Umfang möglich ist als beim Informieren, müssen bei diesen Systemvarianten höhere Anforderungen an die Korrektheit der fahrerunterstützenden Information gestellt werden.

Bezüglich der Anforderungen an die Verfügbarkeit der Information ist die Wirkung auf den Fahrer bei ausbleibender Fahrerunterstützung zu berücksichtigen. So ist bei einer informierenden Assistenz davon auszugehen, dass das Ausbleiben eines Hinweises wie ein fehlerhafter Hinweis wirkt. Aus diesem Grund wird beim Informieren dieselbe Anforderung an die Vollständige Verfügbarkeit gestellt wie an die Korrektheit.

Beim Intervenieren und Warnen erfolgt die Fahrerunterstützung nur im Falle einer Fehlhandlung. In REICHART (2001) wird die Fehlhandlungswahrscheinlichkeit für die Nichtbeachtung des Vorrangs bzw. des Rotlichts mit  $1 \cdot 10^{-3}$  bis  $3 \cdot 10^{-3}$  angegeben. Dies bedeutet, dass in weit über 99% der Knotenpunktsituationen der Fahrer die Vorfahrtsregelung erkennt und befolgt und somit auch keine Fahrerunterstützung erfolgen muss. Steht im Falle einer kritischen Verkehrssituation keine fahrerunterstützende Information zur Verfügung, ist zwar eine Abwendung der Gefahrensituation nicht möglich, es wird jedoch auch keine zusätzliche Gefährdung durch das System induziert. Somit können bei Ampel- und Vorfahrterkenner, bei denen nur im Falle einer Fehlhandlung eine Fahrerunterstützung erfolgt, wesentlich geringere Anforderungen an die Verfügbarkeit der vorfahrtsregelnden Information gerichtet werden. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte werden die in Tabelle 6-8 aufgeführten Qualitätsgrößen als Anforderung an die fahrerunterstützende Information festgesetzt.

Tabelle 6-8: *Anforderungen an die Qualität der fahrerunterstützenden Information*

<b>Assistenzstrategie</b>	<b>VV</b>	<b>IR</b>	<b>GM</b>
<b>informieren</b>	0,995	0,995	10,0 m
<b>warnen</b>	0,95	0,9 <sub>3</sub> 5	10,0 m
<b>intervenieren</b>	0,95	0,9 <sub>4</sub> 5	5,0 m

Davon ausgehend, dass das Fahrerverhalten generell in einer Qualität ermittelt werden kann, die den Anforderungen der behandelten Assistenzstrategien entspricht, lassen sich die formulierten Anforderungen auf die Qualität der Bereitstellung der vorfahrtsregelnden Information übertragen. Die hohe Qualität der Information zum Fahrerverhalten ist auf den engen Zusammenhang zur vorfahrtsregelnden Information zurückzuführen. Dies ergibt sich aus der Nutzung derselben Informationsquelle für die Abstandsbestimmung (vgl. Kapitel 6.3). Dadurch werden ein unverfügbarer Sensor, ein nicht erfasster Knotenpunkt in der digitalen Karte, eine Sichtbehinderung usw. als qualitätsbeeinflussende Faktoren bei der Erkennung der Vorfahrtsregelung berücksichtigt. Um der Forderung stochastisch unabhängiger Eingangsgrößen zu genügen (s. S. 104), müssen diese aus der Betrachtung der Qualität zum Fahrerverhalten ausgeklammert werden. Die im folgenden Kapitel durchzuführende Analyse der Informationsqualität verschiedener Systemansätze des Ampel- und Vorfahrterkenners beschränkt sich damit auf die Betrachtung der Qualität der vorfahrtsregelnden Informationen.



## 6.5 Analyse der Informationsqualität verschiedener Systemansätze

### 6.5.1 Systemmodellierung

Mit den festgesetzten Qualitätsgrößen der Eingangsdaten und -informationen werden im Folgenden für verschiedene Systemansätze des Ampel- und Vorfahrterkenners die zu erwartende Informationsqualität des ausgegebenen Vorfahrtshinweises ermittelt und die Ergebnisse gegenübergestellt. Hierzu muss eine Systemmodellierung gefunden werden, die eine Vergleichbarkeit der verschiedenen zu behandelnden Systemkonzepte – insbesondere der fahrzeugautonomen und infrastrukturgestützten – gestattet und eine übersichtliche Darstellung der Analyse gewährleistet.

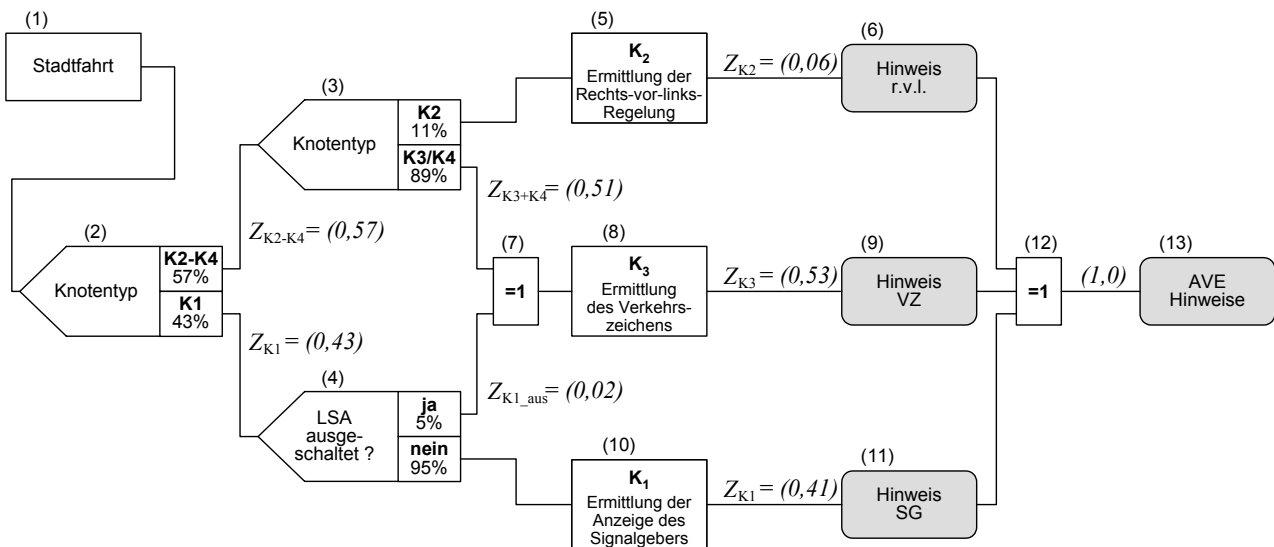


Abbildung 6-4: Informationsflussdiagramm zur Gliederung der zu unterscheidenden Systemzustände des Ampel- und Vorfahrterkenners

Unter Nutzung des modularen Aufbaus des Informationsflussdiagramms wird der Ampel- und Vorfahrterkenner in die drei grundsätzlich zu unterscheidenden Systemkomponenten gegliedert:

- K<sub>1</sub>: Ermittlung der Anzeige des Signalgebers an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten (K1)
- K<sub>2</sub>: Ermittlung der Vorfahrtsregelung an rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkten (K2)
- K<sub>3</sub>: Ermittlung des Verkehrszeichens an schildergeregelten Knotenpunkten (K3 und K4)

In Abbildung 6-4 ist der dazugehörige Informationsfluss dargestellt. Im weiteren Verlauf können diese Systemkomponenten in eigenen Informationsflussdiagrammen behandelt werden. Die angegebenen Wahrscheinlichkeiten des Auftretens der einzelnen Systemzustände sind aus den in Kapitel 2.4 angegebenen Werten für die Häufigkeit von Verkehrssituationen für eine Stadtfahrt übernommen (Tabelle 2-12).

### 6.5.2 Fahrzeugautonome Systemansätze

Für das fahrzeugautonome Konzept des Ampel- und Vorfahrterkenners werden drei Systemvarianten betrachtet. Neben einer kartengestützten und einer auf Bildverarbeitung basierenden Variante wird in einem weiteren Systemansatz die Kombination der beiden Informationsquellen untersucht.

### 6.5.2.1 Kartenbasierter fahrzeugautonomer Ampel- und Vorfahrterkenner

Um aus einer digitalen Karte die geltende Vorfahrtsregelung für die aktuelle Fahrzeugposition ermitteln zu können, ist die logische Fahrzeugposition erforderlich. Mit der logischen Position kann die Knotenpunktzufahrt identifiziert und das zugehörige Attribut mit der Vorfahrtsinformation aus der Karte ausgelesen werden. In Abbildung 6-5 ist der dazugehörige Informationsfluss dargestellt.

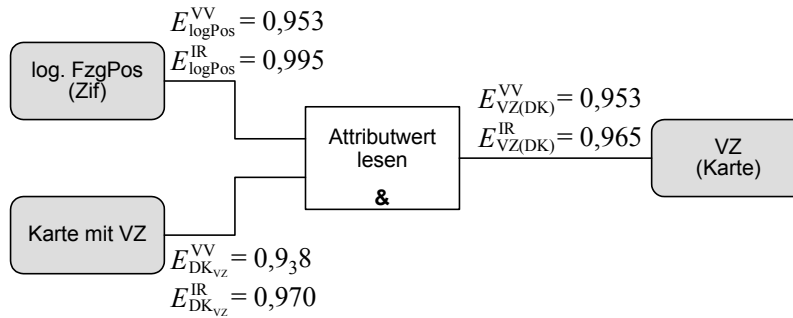


Abbildung 6-5: Informationsflussdiagramm für das Auslesen der Vorfahrtsregelung aus der digitalen Karte

**Systemkomponente K<sub>2</sub> und K<sub>3</sub>:** Mit den in Kapitel 6.3 festgesetzten Qualitätsgrößen erhält man für die Systemkomponenten K<sub>2</sub> und K<sub>3</sub> bezüglich der Bereitstellung des Hinweises rechts vor links bzw. Verkehrszeichen das folgende Qualitätstupel:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{K_2,Q1} = \mathbf{Q}_{K_3,Q1} = \mathbf{Q}_{VZ(DK),Q1} &= (E_{VZ(DK),Q1}^{VV}; E_{VZ(DK),Q1}^{IR}) = (0,953; 965) \quad \text{bzw.} \\ \mathbf{Q}_{K_2,Q2} = \mathbf{Q}_{K_3,Q2} = \mathbf{Q}_{VZ(DK),Q2} &= (E_{VZ(DK),Q2}^{VV}; E_{VZ(DK),Q2}^{IR}) = (0,981; 992) \end{aligned} \quad (6-6)$$

**Systemkomponente K<sub>1</sub>:** Beim kartenbasierten Ansatz ist eine Einschränkung der Funktionalität bezüglich des Hinweises zur Anzeige des Signalgebers gegeben, da diese Information von einer digitalen Karte nicht geliefert werden kann. Es kann nur auf die Existenz einer Lichtsignalanlage hingewiesen werden, wobei es – gemäß dem in Abbildung 6-4 dargestellten Informationsfluss – in 5% der Fälle aufgrund einer abgeschalteten Lichtsignalanlage zu einem unkorrekten Hinweis kommt. Für den Hinweis zur Lichtsignalanlage ergibt sich dieselbe Vollständige Verfügbarkeit wie in (6-6) für die Verkehrszeichen. Bei der Korrektheit ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der Möglichkeit einer abgeschalteten Lichtsignalanlage nur in 95% der auftretenden Situationen ein korrekter Hinweis zu erwarten ist:

$$E_{K_1,Q1}^{IR} = 0,95 \cdot 0,965 = 0,917 \quad (6-7)$$

Unter Berücksichtigung der in Abbildung 6-4 aufgeführten Wahrscheinlichkeiten der Systemzustände ergeben sich die Qualitätsgrößen des AVE-Hinweises zu

$$\begin{aligned} E_{AVE,Q1}^{VV} &= Z_{K1} \cdot E_{K_1,Q1}^{VV} + Z_{K2} \cdot E_{K_2,Q1}^{VV} + Z_{K3} \cdot E_{K_3,Q1}^{VV} = 0,943 \quad \text{und} \\ E_{AVE,Q1}^{IR} &= Z_{K1} \cdot E_{K_1,Q1}^{IR} + Z_{K2} \cdot E_{K_2,Q1}^{IR} + Z_{K3} \cdot E_{K_3,Q1}^{IR} = 0,944 \end{aligned} \quad (6-8)$$

In Tabelle 6-9 sind die Ergebnisse der Qualitätsanalyse der einzelnen Systemkomponenten und des gesamten Systems zusammenfassend dargestellt. Daneben findet sich die zu erwartende Qualität bei Verwendung der Eingangsinformationen mit einer höheren Qualität (Qualitätsstufe Q2).

Tabelle 6-9: Informationsqualität des kartenbasierten Ampel- und Vorfahrterkenners

		Qualitätsstufe Q1		Qualitätsstufe Q2	
		VV	IR	VV	IR
<b>K<sub>1</sub></b> (Hinweis SG)	<b>Q<sub>K<sub>1</sub></sub></b>	0,953	0,917	0,981	0,942
<b>K<sub>2</sub></b> (Hinweis r.v.l.)	<b>Q<sub>K<sub>2</sub></sub></b>	0,953	0,965	0,981	0,992
<b>K<sub>3</sub></b> (Hinweis VZ)	<b>Q<sub>K<sub>3</sub></sub></b>	0,953	0,965	0,981	0,992
<b>AVE-Hinweis (ohne LSA)</b>	<b>Q<sub>AVE<sub>K<sub>2</sub>+K<sub>3</sub></sub></sub></b>	<b>0,953</b>	<b>0,965</b>	<b>0,981</b>	<b>0,992</b>
<b>AVE-Hinweis</b>	<b>Q<sub>AVE</sub></b>	<b>0,953</b>	<b>0,945</b>	<b>0,979</b>	<b>0,972</b>

**Ergebnis:** Für den kartenbasierten Ansatz zeigt sich, dass für beide Qualitätsstufen den Anforderungen an die Qualität der vorfahrtsregelnden Informationen bei weitem nicht entsprochen werden kann. Die Gründe liegen maßgeblich in der Aktualität der digitalen Karte und der Vollständigen Verfügbarkeit der Fahrzeugposition.

Bei dem kartenbasierten Ansatz gilt es ferner zu berücksichtigen, dass es aufgrund einer fehlerhaften Ortung nicht nur zu fehlerhaften Hinweisen an Knotenpunkten kommt. Ebenso können Hinweise zur Vorfahrtsregelung auf freier Strecke auftreten, wobei ein vorfahrtsregelnder Hinweis in einer knotenfreien Verkehrssituation grundsätzlich als unkorrekte Information zu werten ist. Im aufgeführten Analyseergebnis bleibt dieser Fehler unberücksichtigt, da der Systemzustand für freie Verkehrssituationen (K0) nicht modelliert ist (vgl. Abbildung 6-4). Eine weitere Betrachtung dieser Systemvariante erübrigt sich, da diese bereits ohne die Berücksichtigung der unberechtigten Hinweise in knotenfreien Verkehrssituationen die vorfahrtsregelnde Information nicht in der geforderten Qualität bereitstellen kann.

### 6.5.2.2 Fahrzeugautonomer Ampel- und Vorfahrterkennung mit Bildverarbeitung

Die zweite fahrzeugautonome Systemvariante verwendet zur Gewinnung der vorfahrtsregelnden Informationen ein Bildverarbeitungssystem. Die Qualitätsgrößen für die Erkennung von Verkehrszeichen und Signalgebern mittels Bildverarbeitung wurden bereits in Kap. 6.3 ermittelt.

**Systemkomponente K<sub>1</sub>:** An den lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten ist zu unterscheiden, ob eine gemeinsame oder getrennte Signalisierung der einzelnen Fahrtrichtungen erfolgt. Bei einer getrennten Signalisierung ist neben der Erkennung der Anzeige der Signalgeber die Selektion des für die Fahrtrichtung relevanten Signalgebers erforderlich. Dazu werden Informationen zur Fahrtrichtung benötigt (vgl. Abbildung 6-6). Daneben ist zu berücksichtigen, dass beim Linksabbiegen durch eine höhere Verdeckungsrate die Vollständige Verfügbarkeit sinkt (vgl. Kapitel 6.3). Nach der in Tabelle 2-12 aufgeführten Häufigkeit von Verkehrssituationen liegt bei 18% der Verkehrssituationen an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten eine Fahrtrichtungsänderung nach links vor. Mit  $Z_{F2}=0,18$  – als die Häufigkeit des Systemzustands in dem ein Abbiegemanöver nach links vollzogen wird – berechnet sich die Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit für die Erkennung des Signalgebers bei einer getrennten Signalisierung zu:

$$E_{SG_{sep},Q1}^{VV} = (1 - Z_{F2}) \cdot E_{SG(BV),Q1}^{VV} + Z_{F2} \cdot E_{SG_{F2}(BV),Q1}^{VV} = 0,944 \quad \text{und} \quad (6-9)$$

$$E_{SG_{sep},Q1}^{IR} = E_{SG(BV)}^{IR} = 0,990$$

Mit der aus der Route des Navigationssystems, dem Fahrstreifen des Bildverarbeitungssystems und der Schalterstellung des Blinkers ermittelten Fahrtrichtung ergibt sich über die 1v3-Verknüpfung (14) eine Qualität für die Information zur Fahrtrichtung von

$$E_{FR,Q1}^{VV} = 0,988 \quad \text{und} \quad E_{FR,Q1}^{IR} = 0,939 \quad (6-10)$$

und für die fahrtrichtungsbezogenen Signalgeber somit eine Vollständige Verfügbarkeit und Korrektheit von

$$E_{SG(FR),Q1}^{VV} = E_{SG_{sep},Q1}^{VV} \cdot E_{FR,Q1}^{VV} = 0,930 \quad \text{und} \quad E_{SG(FR),Q1}^{IR} = E_{SG_{sep},Q1}^{IR} \cdot E_{FR,Q1}^{IR} = 0,990 \quad (6-11)$$

Bei einer gemeinsamen Signalisierung ist keine Selektion des Signalgebers und keine Sonderbehandlung für Linksabbiegemaneöver erforderlich. Die Qualitätsgrößen für die Anzeige des Signalgebers entsprechen damit den in Tabelle 6-7 aufgeführten Werten  $Q_{SG(BV)}$ .

Unter Berücksichtigung der Häufigkeit des Auftretens der beiden Signalisierungsformen – bei dieser Untersuchung wird von 70% gemeinsamer und  $Z_{sep} = 30%$  getrennter Signalisierung ausgegangen – ergeben sich die Qualitätsgrößen für die Systemkomponente  $K_1$  zu:

$$\begin{aligned} E_{K_1,Q1}^{VV} &= (1 - Z_{sep}) \cdot E_{SG(BV),Q1}^{VV} + Z_{sep} \cdot E_{SG(FR),Q1}^{VV} = 0,941 \quad \text{und} \\ E_{K_1,Q1}^{IR} &= (1 - Z_{sep}) \cdot E_{SG(BV),Q1}^{IR} + Z_{sep} \cdot E_{SG(FR),Q1}^{IR} = 0,990 \end{aligned} \quad (6-12)$$

Die **Systemkomponente  $K_3$**  dient der Erkennung der Verkehrszeichen an schildergeregelten Knotenpunkten. Außer der aus dem digitalen Bild gewonnenen Information zur Vorfahrtsregelung sind hierbei keine weiteren Informationen oder Verarbeitungsschritte notwendig. Die Qualitätsgrößen der Systemkomponente  $K_3$  entsprechen somit den in Tabelle 6-7 aufgeführten Werten zu den Verkehrszeichen aus Bildverarbeitung:

$$E_{K_3,Q1}^{VV} = E_{VZ(BV),Q1}^{VV} = 0,960 \quad \text{und} \quad E_{K_3,Q1}^{IR} = E_{VZ(BV),Q1}^{IR} = 0,995 \quad (6-13)$$

**Systemkomponente  $K_2$ :** Bei den rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkten ist zu bedenken, dass in den allermeisten Fällen kein Verkehrszeichen zur Anzeige der Vorfahrtsregelung aufgestellt ist und somit die Möglichkeit der Entnahme der Vorfahrtsregelung aus der Schilderanzeige nicht besteht. In diesen Situationen müsste durch Identifikation der Kreuzung bzw. Einmündung und der korrekten Erkennung, dass in der Bildszene kein vorfahrtsregelndes Verkehrszeichen enthalten ist, auf die Vorfahrtsregelung geschlossen werden. Davon ausgehend, dass im Stadtverkehr eine Identifikation von Knotenpunkten nicht mit der erforderlichen Korrektheit und Vollständigen Verfügbarkeit erfolgen kann und der Problematik, dass bei einer bestehenden Sichtbehinderung an den lichtsignalgesteuerten und schildergeregelten Knotenpunkten sich mit rechts vor links ein unkorrekter Hinweis zur Vorfahrtsregelung ergibt, wird bei dem gewählten Systemansatz auf eine Erkennung der Rechts-vor-links-Regelung verzichtet.

Die Qualitätsgrößen für den **Ampel- und Vorfahrterkenner** mit Bildverarbeitung berechnen sich analog zu (6-8) und man erhält mit

$$\begin{aligned} E_{AVE,Q1}^{VV} &= Z_{K1} \cdot E_{K_1,Q1}^{VV} + Z_{K3} \cdot E_{K_3,Q1}^{VV} = 0,952 \quad \text{und} \\ E_{AVE,Q1}^{IR} &= Z_{K1} \cdot E_{K_1,Q1}^{IR} + Z_{K3} \cdot E_{K_3,Q1}^{IR} = 0,993 \end{aligned} \quad (6-14)$$

die Qualitätswerte für den fahrzeugautonomen Systemansatz mit Bildverarbeitung, wobei die Fahrerunterstützung auf lichtsignalgesteuerte und schildergeregelte Knotenpunkte beschränkt ist. In Tabelle 6-10 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Daneben finden sich die Qualitätsgrößen unter Verwendung der Eingangsinformationen der Qualitätsstufe Q2.

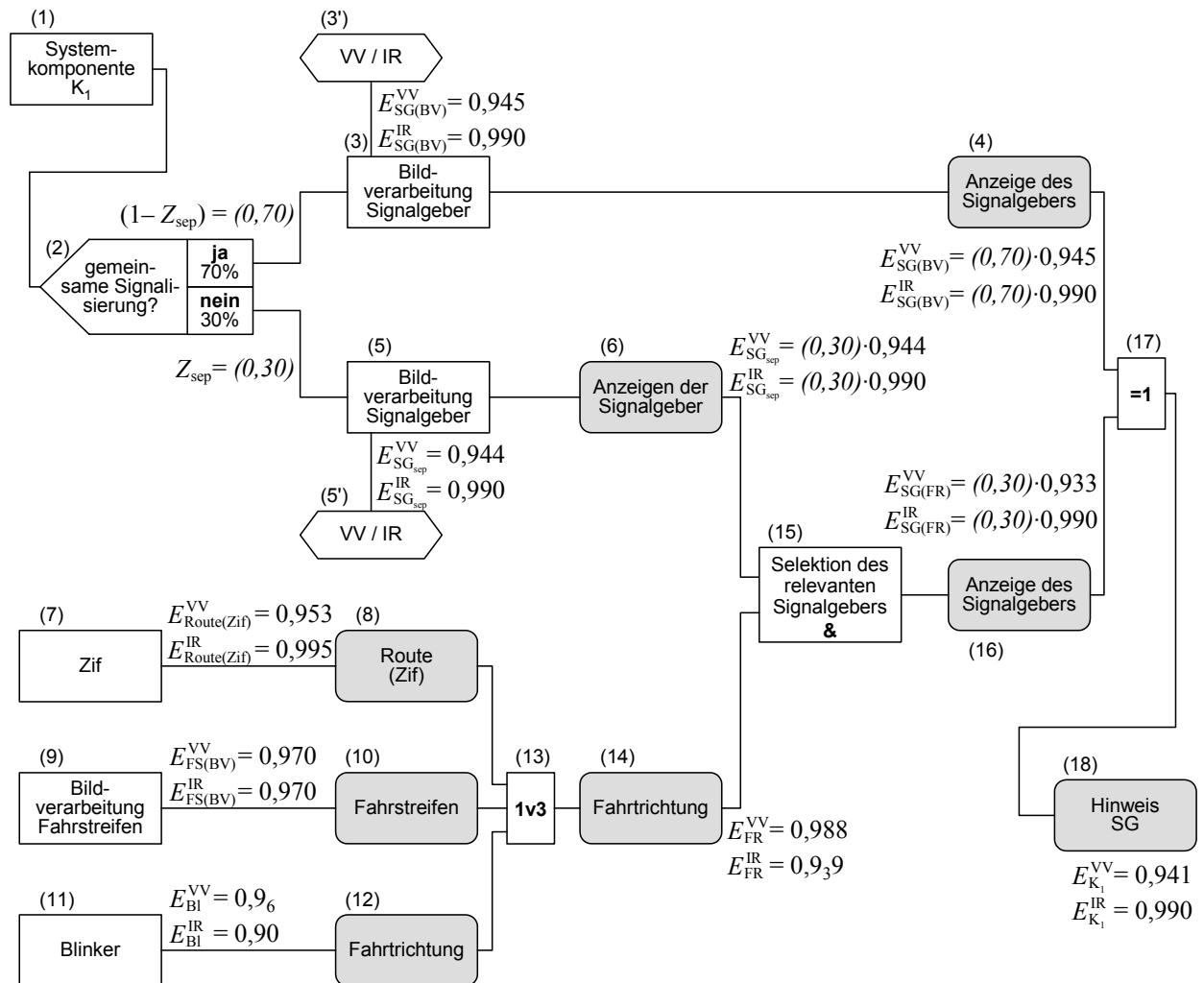


Abbildung 6-6: Informationsflussdiagramm für die Ermittlung der Anzeige des Signalgebers über Bildverarbeitung

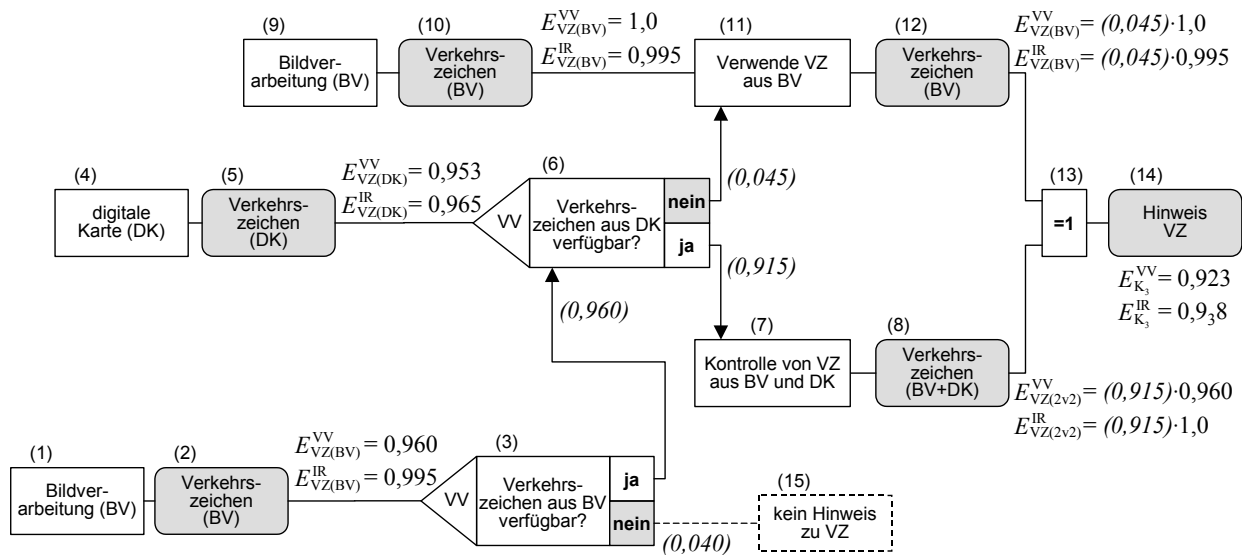
Tabelle 6-10: Informationsqualität des auf Bildverarbeitung basierenden Ampel- und Vorfahrterkenners

		Qualitätsstufe Q1		Qualitätsstufe Q2	
		VV	IR	VV	IR
<b>K<sub>1</sub></b> (Hinweis SG)	<b>Q<sub>K<sub>1</sub></sub></b>	0,941	0,990	0,974	0,999
<b>K<sub>2</sub></b> (Hinweis r.v.l.)	<b>Q<sub>K<sub>2</sub></sub></b>	-	-	-	-
<b>K<sub>3</sub></b> (Hinweis VZ)	<b>Q<sub>K<sub>3</sub></sub></b>	0,960	0,995	0,980	0,935
<b>AVE-Hinweis (ohne r.v.l.)</b>	<b>Q<sub>AVE</sub></b>	<b>0,952</b>	<b>0,993</b>	<b>0,977</b>	<b>0,933</b>

**Ergebnis:** Die berechnete Informationsqualität zur Anzeige der Lichtsignalanlage entspricht für keine Assistenzstrategie den gestellten Anforderungen. An den schildergeregelten Knotenpunkten zeigt sich eine deutlich höhere Informationsqualität im Vergleich zum kartenbasierten Ansatz. Für einen warnenden Ampel- und Vorfahrterkenner lassen sich für Qualitätsstufe Q2 die Vorfahrtsinformationen in der geforderten Qualität bereitstellen.

### 6.5.2.3 Ampel- und Vorfahrterkenner mit Bildverarbeitung und digitaler Karte

Bei einer fahrzeugautonomen Systemvariante, die sowohl die digitale Karte als auch die Bildverarbeitung als Informationsquelle nutzt, ergeben sich an den lichtsignalgesteuerten und rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkten keine Redundanzen, die zur Steigerung der Informationsqualität herangezogen werden können. Einzig für die schildergeregelten Knotenpunkte liegen redundante Informationen vor, die jedoch nur bedingt zur Fehlerbeherrschung eingesetzt werden können.



Applikation "Kontrolle von VZ aus BV und DK" (7) unter der Bedingung, dass beide Eingangsinformationen vollständig verfügbar sind

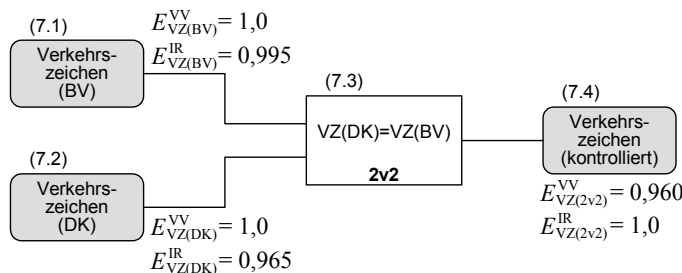


Abbildung 6-7: Informationsflussdiagramm für die Ermittlung der Vorfahrtsregelung unter Verwendung des Bildverarbeitungssystems und einer digitalen Karte

**Systemkomponente K<sub>3</sub>:** Werden die redundant vorliegenden Informationen über eine 1v2-Verknüpfung miteinander verbunden, ergeben sich mit

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Q}_{K_3,Q1} &= (E_{K_3,Q1}^{VV} ; E_{K_3,Q1}^{IR}) = (0,962 ; 0,998) \quad \text{bzw.} \\
 \mathbf{Q}_{K_3,Q2} &= (E_{K_3,Q2}^{VV} ; E_{K_3,Q2}^{IR}) = (0,991 ; 0,938)
 \end{aligned}
 \tag{6-15}$$

eine deutlich höhere Korrektheit und bei der Qualitätsstufe Q2 auch eine höhere Vollständige Verfügbarkeit. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei Anwendung dieser Verknüpfungsform in knotenfreien Verkehrssituationen gehäuft mit unkorrekten Vorfahrtshinweisen gerechnet werden muss. Da in knotenfreien Verkehrssituationen vom Bildverarbeitungssystem keine Informationen zur Vorfahrtsregelung bereitgestellt werden, besteht in diesen Situationen generell keine Kontrollmöglichkeit der Karteninformation. Die Informationsqualität stützt sich somit einzig auf die Qualität der Vorfahrtsinformation der digitalen Karte. Für eine ODER-Verknüpfung gilt Entsprechendes. Eine mögliche Systemvariante ist in Abbildung 6-7 dargestellt.

**Ergebnis:** Bei einem Systemansatz, der mit einem Bildverarbeitungssystem und einer digitalen Karte zwei Informationsquellen für die vofahrtsregelnde Information nutzt, ergeben sich für die Systemkomponenten zur Erkennung der Anzeige des Signalgebers und der Rechts-vor-links-Regelung keine redundanten Informationen, die zur Qualitätssteigerung herangezogen werden können. Einzig bei der Systemkomponente  $K_3$ , der die Erkennung der Vorfahrtsregelung an schildergeordneten Knotenpunkten obliegt, liegen redundante Informationen vor. Die Maßnahmen zur Steigerung der Informationsqualität sind hierbei auf eine Steigerung der Korrektheit beschränkt. Sämtliche Maßnahmen zur Steigerung der Vollständigen Verfügbarkeit sind verbunden mit fehlerhaften Vorfahrtshinweisen in knotenfreien Verkehrssituationen. Diese würden sich immer dann ergeben, wenn aufgrund einer fehlerhaften Ortung eine Vorfahrtsinformation aus der digitalen Karte ermittelt wird. Mit der gewählten 2v2-Verknüpfung ergibt sich eine Steigerung der Informationsqualität in dem Maße, dass bereits mit der Qualitätsstufe Q1 den Anforderungen für eine warnende Assistenz und mit der Qualitätsstufe Q2 auch den Anforderungen einer intervenierenden Assistenz entsprechen werden kann.

Tabelle 6-11: *Informationsqualität des Ampel- und Vorfahrterkenners mit digitaler Karte und Bildverarbeitung*

		Qualitätsstufe Q1		Qualitätsstufe Q2	
		VV	IR	VV	IR
$K_1$ (Hinweis SG)	$Q_{K_1}$	0,941	0,990	0,974	0,999
$K_2$ (Hinweis r.v.l.)	$Q_{K_2}$	0,943	0,965	0,979	0,992
$K_3$ (Hinweis VZ)	$Q_{K_3}$	0,924	0,937	0,971	0,949
<b>AVE-Hinweis</b>	<b><math>Q_{AVE}</math></b>	<b>0,932</b>	<b>0,994</b>	<b>0,973</b>	<b>0,931</b>

Da die Erkennung der Lichtsignale und der rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkte nicht in der geforderten Qualität erfolgen kann, ist bei dem fahrzeugautonomen Ampel- und Vorfahrterkenners die Funktionalität auf die Unterstützung des Fahrers an schildergeregelten Knotenpunkten beschränkt. Mit der vorliegenden Vollständigen Verfügbarkeit der vofahrtsregelnden Information kann dabei nur für die warnende und intervenierende Assistenzstrategie die geforderte Informationsqualität erfüllt werden.

### 6.5.3 Infrastrukturgestützte Systemansätze

Bei einem infrastrukturgestützten Konzept des Ampel- und Vorfahrterkenners wird die vorfahrtsregelnde Information von den Lichtsignalanlagen und den Verkehrszeichen vorgehalten und über Nahbereichskommunikation ins Fahrzeug übertragen. Im Rahmen dieser Untersuchung sollen hierbei zwei unterschiedliche Kommunikationseinrichtungen betrachtet werden: Zum einen die Bake, die über eine gebündelte Infrarot-Übertragung die Anzeige des Verkehrszeichens bzw. der Lichtsignalanlage in Richtung der Knotenpunktzufahrten sendet (vgl. Abbildung 6-8), zum anderen einen an dem Knotenpunkt installierten Sender, der für alle Zufahrten die Vorfahrtsregelung überträgt (vgl. Abbildung 6-9). Beim zweiten Ansatz ist eine Selektion der für die Knotenpunktzufahrt geltenden Vorfahrtsregelung erforderlich.

#### 6.5.3.1 Verkehrszeichen und Lichtsignale mit Baken

Bei diesem Systemansatz wird die vorfahrtsregelnde Information durch Baken übertragen. Dazu ist an jedem Verkehrszeichen und Lichtsignal ein Sender angebracht, der in Richtung der Knotenpunktzufahrt die Information zur geltenden Vorfahrtsregelung abstrahlt. Der Sender könnte beispielsweise so gestaltet sein, dass durch einen horizontalen Öffnungswinkel von ca.  $50^\circ$  eine Bündelung in Richtung der Knotenpunktzufahrt, für die das Verkehrszeichen gilt, erreicht wird. Der im Fahrzeug befindliche Empfänger benötigt eine Abschirmung, die den Empfang auf Signale von Sendern, die in Fahrtrichtung liegen, beschränkt. Um ca. 4-5 Sekunden vor Erreichen des Knotenpunkts die Information empfangen zu können, ist bei einer üblichen Fahrtgeschwindigkeit von 50 bis 60 km/h in der Stadt ein Empfangsbereich von 50 bis 80 Metern erforderlich. Bei einer dichten Knotenpunktfolge ist der Empfangsbereich durch eine Verringerung des vertikalen Öffnungswinkels und der Senderleistung zu reduzieren.

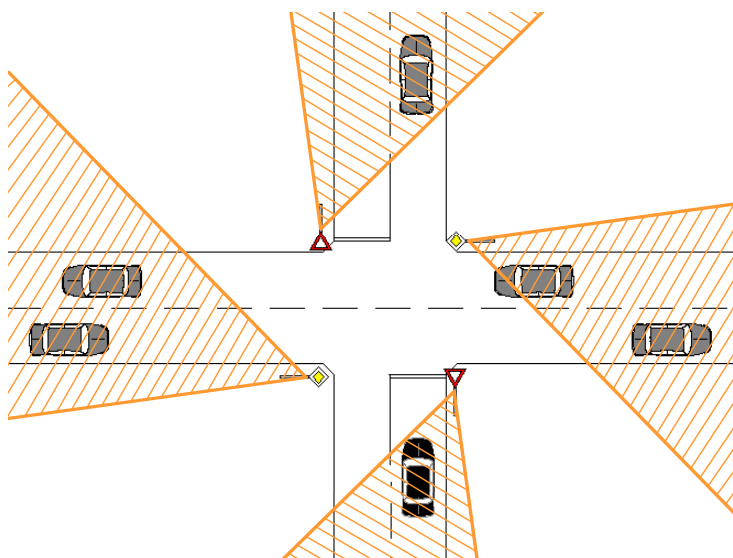


Abbildung 6-8: Übertragung der vorfahrtsregelnden Informationen mit Baken

**Systemkomponente K<sub>2</sub> und K<sub>3</sub>:** Bei der Übertragung der vorfahrtsregelnden Informationen mittels Baken liegt mit der gewählten Ausprägung des Empfangsbereichs unmittelbar die für die Knotenpunktzufahrt gültige Vorfahrtsinformation vor. Die Informationsqualität der beiden Systemkompo-



nenen ergibt sich somit aus der Qualität der auszusendenden Vorfahrtsinformation und der Qualität der Datenkommunikation:

$$\begin{aligned} E_{K_2}^{VV} = E_{K_3}^{VV} &= E_{VZ(VZ)}^{VV} \cdot E_{Bake}^{VV} \cdot E_{Kom_{10}}^{VV} \cdot E_{Kom(IK)}^{VV} \quad \text{und} \\ E_{K_2}^{IR} = E_{K_3}^{IR} &= E_{VZ(VZ)}^{IR} \cdot E_{Kom_{10}}^{IR} \cdot E_{Kom(IK)}^{IR} \end{aligned} \quad (6-16)$$

Mit den in Kap. 6.3 festgesetzten Qualitätsgrößen ergibt sich für die beiden Systemkomponenten  $K_2$  und  $K_3$  die Qualität zu

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{K_3,Q1} = \mathbf{Q}_{K_2,Q1} &= (E_{K_3,Q1}^{VV} ; E_{K_3,Q1}^{IR}) = (0,9_{41} ; 9_{55}) \quad \text{bzw.} \\ \mathbf{Q}_{K_3,Q2} = \mathbf{Q}_{K_2,Q2} &= (E_{K_3,Q2}^{VV} ; E_{K_3,Q2}^{IR}) = (0,9_{56} ; 9_{59}) \end{aligned} \quad (6-17)$$

Für beide Qualitätsstufen kann demnach den Anforderungen an die Qualität der fahrerunterstützten Information sowohl für eine informierende als auch für eine warnende und intervenierende Assistenz entsprochen werden.

**Systemkomponente  $K_1$ :** Bei der Lichtsignalanlage ist zu berücksichtigen, dass neben dem Empfang der aktuellen Anzeige des Signalgebers insbesondere ein Signalgeberwechsel erkannt werden muss. Mit der Ergänzung des Informationsflussdiagramms um ein Übergangssymbol zur Aktualität wird dieses Phänomen berücksichtigt. Dabei wirkt sich eine Aktualitätsverletzung mit

$$E_{ZA_{Bake}}^{IR} = E_{Bake}^{VV} \quad (6-18)$$

auf die Korrektheit der Information aus, wobei die Aktualität der Anzeige des Signalgebers mit der Vollständigen Verfügbarkeit bezüglich des Empfangs der Information gleichgesetzt werden kann. Die Qualität der empfangenen Information zur Anzeige des Signalgebers ergibt sich über

$$\begin{aligned} E_{SG}^{VV} &= E_{SG(LSA)}^{VV} \cdot E_{Bake}^{VV} \cdot E_{Kom_{10}}^{VV} \cdot E_{Kom(IK)}^{VV} \quad \text{und} \\ E_{SG}^{IR} &= E_{SG(LSA)}^{IR} \cdot E_{ZA_{Bake}}^{IR} \cdot E_{Kom_{10}}^{IR} \cdot E_{Kom(IK)}^{IR} \end{aligned} \quad (6-19)$$

Somit erhält man für die beiden Qualitätsstufen Q1 und Q2 folgende Qualitätstupel:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{SG,Q1} &= (E_{SG,Q1}^{VV} ; E_{SG,Q1}^{IR}) = (0,9_{41} ; 9_{49}) \quad \text{bzw.} \\ \mathbf{Q}_{SG,Q2} &= (E_{SG,Q2}^{VV} ; E_{SG,Q2}^{IR}) = (0,9_{57} ; 9_{59}) \end{aligned} \quad (6-20)$$

Die in (6-20) angegebenen Qualitätsgrößen entsprechen nur im Falle einer gemeinsamen Signalisierung aller Fahrtrichtungen der Informationsqualität der vorfahrtsregelnden Information. Bei einer getrennten Signalisierung ist ebenso wie beim fahrzeugautonomen Ansatz eine Selektion des für die Fahrtrichtung relevanten Signalgebers erforderlich. Werden hierzu die geplante Route des Ziel-führungssystems und der Blinker als Informationslieferanten herangezogen und über eine 1v2-Verknüpfung miteinander verknüpft, so erhält man für die Fahrtrichtung folgende Qualität:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{FR_{1v2},Q1} &= (E_{FR_{1v2},Q1}^{VV} ; E_{FR_{1v2},Q1}^{IR}) = (0,90 ; 995) \quad \text{bzw.} \\ \mathbf{Q}_{FR_{1v2},Q2} &= (E_{FR_{1v2},Q2}^{VV} ; E_{FR_{1v2},Q2}^{IR}) = (0,90 ; 998) \end{aligned} \quad (6-21)$$

Mit der anschließenden UND-Verknüpfung zur Selektion des relevanten Signalgebers ergibt sich aufgrund der geringen Informationsqualität der Fahrtrichtung keine ausreichend hohe Qualität für die vorfahrtsregelnde Information. Zur Steigerung der Informationsqualität wird in einer System-

variante ein Bildverarbeitungssystem zur Erkennung des Fahrstreifens herangezogen. Analog zum fahrzeugautonomen Ansatz (Kap. 6.5.2.2) stehen damit drei Informationen zur Fahrtrichtung zur Verfügung. Über eine 1v3-Verknüpfung ergeben sich nach (6-10) – im Gegensatz zu der 1v2-Verknüpfung in (6-21) – deutlich bessere Qualitätsgrößen für die Fahrtrichtung. Im Ergebnis erhält man für die Systemvariante mit Bildverarbeitung zur Fahrstreifenenerkennung für die Information zum fahrtrichtungsrelevanten Signalgeber folgende Qualitätswerte:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{SG(FR),Q1} &= (E_{SG(FR),Q1}^{VV} ; E_{SG(FR),Q1}^{IR}) = (0,988 ; 9_39) \\ \mathbf{Q}_{SG(FR),Q2} &= (E_{SG(FR),Q2}^{VV} ; E_{SG(FR),Q2}^{IR}) = (0,996 ; 9_47) \end{aligned} \quad (6-22)$$

Für die Systemkomponente  $K_1$  zur Bereitstellung der Anzeige des Signalgebers an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten berechnet sich – unter Berücksichtigung der Häufigkeit des Auftretens von getrennter und gemeinsamer Signalisierung analog zu (6-12) – die Qualität zu

$$\begin{aligned} E_{K_1,Q1}^{VV} &= (1 - Z_{sep}) \cdot E_{SG,Q1}^{VV} + Z_{sep} \cdot E_{SG(FR),Q1}^{VV} = 0,996 \quad \text{und} \\ E_{K_1,Q1}^{IR} &= (1 - Z_{sep}) \cdot E_{SG,Q1}^{IR} + Z_{sep} \cdot E_{SG(FR),Q1}^{IR} = 0,9_46 \end{aligned} \quad (6-23)$$

In Tabelle 6-12 sind alle berechneten Qualitätsgrößen für den Systemansatz eines infrastrukturgestützten Ampel- und Vorfahrterkenners, bei dem die Datenkommunikation mittels Baken erfolgt, nochmals zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 6-12: Informationsqualität des infrastrukturgestützten Ampel- und Vorfahrterkenners mit Bake

Systemkomponente		Qualitätsstufe Q1		Qualitätsstufe Q2	
		VV	IR	VV	IR
$K_1$ (Hinweis SG) – ohne BV	$Q_{K_1,1v2}$	0,970	0,995	0,970	0,998
	– mit BV	$Q_{K_1}$	0,996	0,9_46	0,999
$K_2$ (Hinweis r.v.l.)	$Q_{K_2}$	0,9_41	0,9_55	0,9_56	0,9_59
$K_3$ (Hinweis VZ)	$Q_{K_3}$	0,9_41	0,9_55	0,9_56	0,9_59
<b>AVE-Hinweis – ohne BV</b>	$Q_{AVE,1v2}$	<b>0,988</b>	<b>0,998</b>	<b>0,988</b>	<b>0,9_32</b>
	– mit BV	$Q_{AVE}$	<b>0,998</b>	<b>0,9_48</b>	<b>0,9_36</b>

**Ergebnis:** Bei einer ortsdiskreten Bereitstellung der vorfahrtsregelnden Information mittels Baken zeigt sich an den rechts-vor-links-geregelten und den schildergeregelten Knotenpunkten für beide Qualitätsstufen eine Qualität der vorfahrtsregelnden Information, die einen Einsatz in allen drei behandelten Assistenzstrategien gestattet. In den lichtsignalgesteuerten Verkehrssituationen ist bei einer gemeinsamen Signalisierung eine ebenso hohe wie ausreichende Informationsqualität gegeben. Im Falle einer getrennten Signalisierung ist die Informationsqualität maßgeblich abhängig von der Qualität, mit der die Fahrtrichtung ermittelbar ist. So kann erst durch den Einsatz des Bildverarbeitungssystems – als weitere Informationsquelle für die Fahrtrichtung – die vorfahrtsregelnde Information in der geforderten Qualität bereitgestellt werden. Mit diesem Systemansatz gelingt dies bei beiden Qualitätsstufen für alle drei Assistenzstrategien.

### 6.5.3.2 Lichtsignalanlage mit einem Kreuzungssender

Bei dieser Systemvariante wird von einer Ausstattung der lichtsignalgesteuerten Knotenpunkte mit einer Kommunikationseinrichtung ausgegangen, die im weiteren Verlauf als Kreuzungssender bezeichnet wird. Im Gegensatz zu der Bake erfolgt hierbei kein gerichtetes Aussenden der Information. Damit stimmt der Empfangsbereich der Vorfahrtsinformation nicht mit dessen Gültigkeitsbereich überein. Folglich ist eine Selektion der geltenden Vorfahrtsinformation erforderlich. Eine Möglichkeit hierzu bildet die Nutzung der logischen Fahrzeugposition. Diese Variante entspricht weitgehend dem kartenbasierten fahrzeugautonomen Ansatz unter Verwendung einer hoch aktuellen Karte, die neben den Verkehrszeichen auch die Anzeigen der Lichtsignalanlagen enthält. Dabei wirkt die Ortungskomponente wiederum als limitierender Faktor für die Qualität der Vorfahrtsinformation des Ampel- und Vorfahrterkenners.

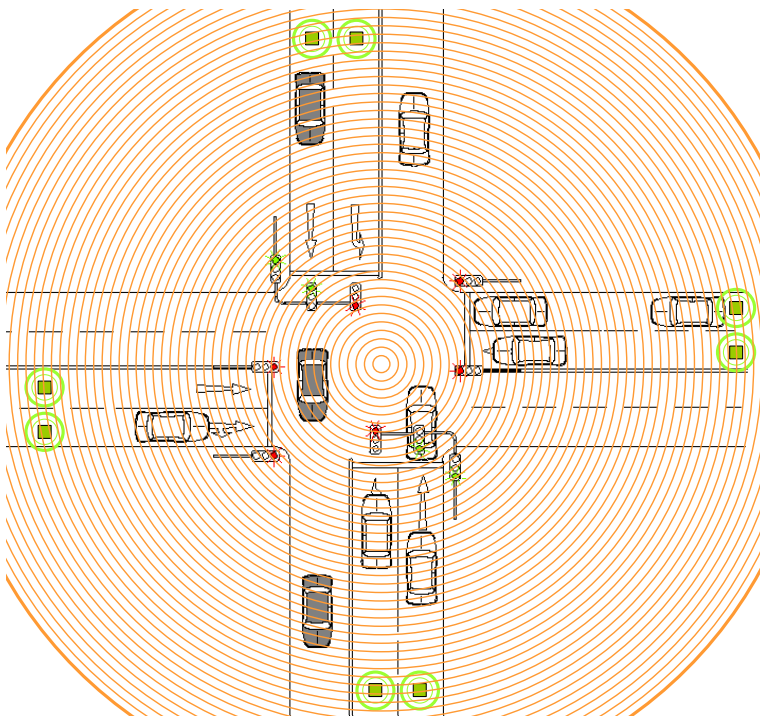


Abbildung 6-9: Übertragung der vorfahrtsregelnden Informationen mit einem Kreuzungssender

Eine weitere denkbare Variante ist die Realisierung einer individuellen Informationsbereitstellung durch den Kreuzungssender. Hierzu können beispielsweise an Knotenpunktzufahrten Balisen in die Fahrbahn eingelassen werden, an denen sich beim Überfahren das Fahrzeug an dem Knotenpunkt anmeldet und für die Dauer des Aufenthalts im Knotenpunktbereich eine eindeutige Fahrzeugkennnummer (FzgID) erhält. Mit Hilfe der FzgID kann die aktuell geltende Anzeige der Lichtsignalanlage individuell übermittelt werden. Neben einer eindeutigen Zuordnung der befahrenen Knotenpunktzufahrt ist bei einer fahrstreifenscharfen Installation der Balisen die Fahrtrichtung gegeben (vgl. Abbildung 6-9). Die Variante mit einer individuellen Übermittlung der vorfahrtsregelnden Information soll im Folgenden diskutiert werden.

**Systemkomponente K<sub>1</sub>:** Bei der Systemvariante mit individueller Informationsbereitstellung wird bei der Überfahrt der Balise die vom Kreuzungsrechner festgelegte Fzgid an das Fahrzeug übermittelt. Für die Dauer des Aufenthalts im Knotenpunktbereich wird die Fzgid für die individuelle Datenübertragung genutzt. Beim Ampel- und Vorfahrterkenner kann die fahrzeugseitige Komponente aus allen ausgesandten Vorfahrtsinformationen die für das Fahrzeug geltende Information identifizieren. Der dazugehörige Informationsfluss ist in Abbildung 6-10 dargestellt.

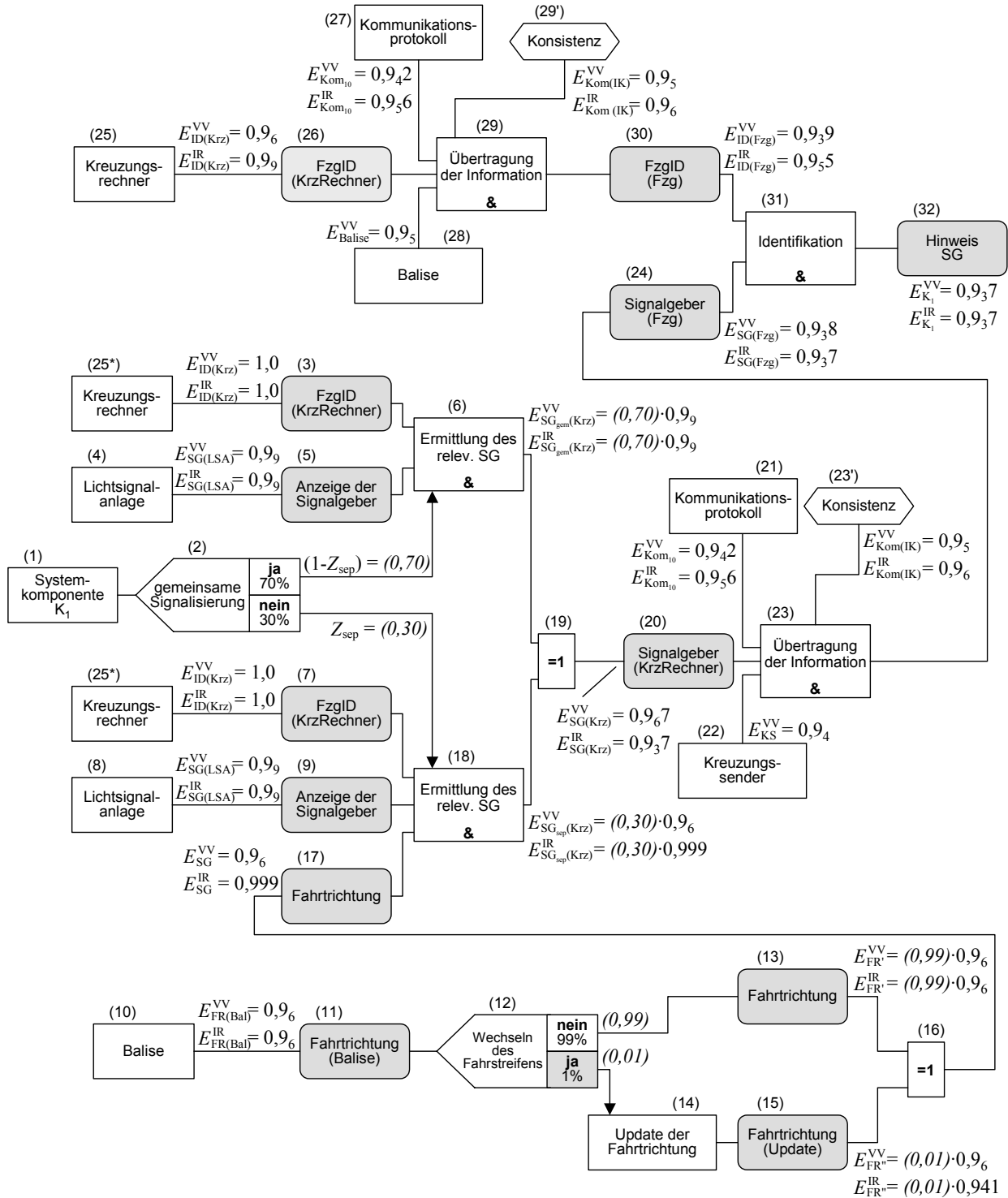


Abbildung 6-10: Informationsflussdiagramm für die Bereitstellung der Information des Signalgebers durch den Kreuzungssender

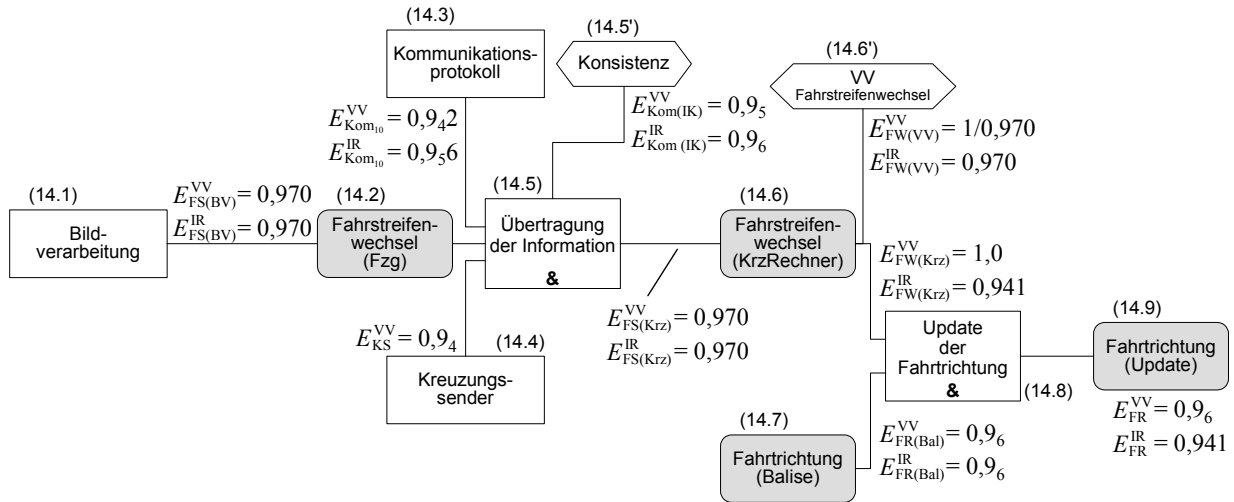


Abbildung 6-11: Applikation „Update der Fahrtrichtung (14)“ für die Erkennung eines Fahrstreifenwechsels zur Aktualisierung der Fahrtrichtung (in Abbildung 6-9)

Da über die Balise auf die Fahrtrichtung geschlossen wird, zeigt sich das Problem, dass bei einem Fahrstreifenwechsel nach Überfahren der Balise die Fahrtrichtung gegebenenfalls unkorrekt ist. Für die Untersuchung wird davon ausgegangen, dass bei jeder hundertsten Anfahrt an einen lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt mit mehreren Fahrstreifen ein Fahrstreifenwechsel erst kurz vor Erreichen des Knotenpunkts und somit nach Überfahren der Balise vorgenommen wird. In der vorgestellten Systemvariante wird dieser Fehlerquelle dadurch entgegengewirkt, dass von dem fahrzeugseitig vorhandenen Bildverarbeitungssystem ein Fahrstreifenwechsel erkannt und per Funk an den Kreuzungsrechner übermittelt wird. Die evaluierte Informationsqualität für das Aktualisieren der Fahrtrichtung geht über die Systemkomponente *Update der Fahrtrichtung* (14) in das Informationsflussdiagramm ein. Wird auf eine entsprechende Aktualisierung der Fahrtrichtung verzichtet, ist in 1% der Knotenpunktsituationen mit getrennter Signalisierung die Fahrtrichtungsinformation veraltet. Mit der daran anschließenden Applikation *Ermittlung des relevanten Signalgebers* (18) schlägt sich die Verletzung der Aktualität in vollem Umfang auf die Korrektheit der vorfahrtsregelnden Information nieder. Für eine Systemvariante ohne Erkennung eines Fahrstreifenwechsels mittels Bildverarbeitung ergeben sich für die vorfahrtsregelnde Information folgende Qualitätstupel:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Q}_{K_1, \text{ohneBV}, Q1} &= (E_{K_1, \text{ohneBV}, Q1}^{VV} ; E_{K_1, \text{ohneBV}, Q1}^{IR}) = (0,9_37 ; 994) \quad \text{bzw.} \\
 \mathbf{Q}_{K_1, \text{ohneBV}, Q2} &= (E_{K_1, \text{ohneBV}, Q2}^{VV} ; E_{K_1, \text{ohneBV}, Q2}^{IR}) = (0,9_47 ; 994)
 \end{aligned}
 \tag{6-24}$$

Selbst unter Verwendung der Informationen der Qualitätsstufe Q2 erhält man somit keine Verbesserung der Korrektheit. Wird entsprechend dem in Abbildung 6-10 dargestellten Informationsfluss eine Aktualisierung der Fahrtrichtung vorgenommen, ergibt sich die Informationsqualität zu

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Q}_{K_1, Q1} &= (E_{K_1, Q1}^{VV} ; E_{K_1, Q1}^{IR}) = (0,9_37 ; 9_37) \quad \text{bzw.} \\
 \mathbf{Q}_{K_1, Q2} &= (E_{K_1, Q2}^{VV} ; E_{K_1, Q2}^{IR}) = (0,9_54 ; 9_39)
 \end{aligned}
 \tag{6-25}$$

**Systemkomponente K<sub>2</sub> und K<sub>3</sub>:** Aufgrund einer deutlich höheren Qualität der Informationen zu den Verkehrszeichen und der Kommunikation ist die Qualität fast ausschließlich von der eingesetzten Ortungskomponente zur Identifikation des Knotenpunkts bzw. der Knotenpunktzufahrt abhängig. Die entsprechende Analyse liefert mit

$$\mathbf{Q}_{K_3, \text{ohneBV}, Q1} = (E_{K_3, \text{ohneBV}, Q1}^{VV} ; E_{K_3, \text{ohneBV}, Q1}^{IR}) = (0,951 ; 997) \quad \text{bzw.} \quad (6-26)$$

$$\mathbf{Q}_{K_3, \text{ohneBV}, Q2} = (E_{K_3, \text{ohneBV}, Q2}^{VV} ; E_{K_3, \text{ohneBV}, Q2}^{IR}) = (0,981 ; 998)$$

annähernd dieselben Qualitätswerte wie die logische Fahrzeugposition des Navigationssystems.

Unter Hinzunahme eines Bildverarbeitungssystems zur Erkennung der Verkehrszeichen kann analog zu dem fahrzeugautonomen Ansatz mit Bildverarbeitungssystem und digitaler Karte (vgl. Abbildung 6-7) eine entsprechende Steigerung der Informationsqualität erreicht werden. Die rechnerische Auswertung des Informationsflussdiagramms liefert für die beiden Qualitätsstufen die folgenden Qualitätstupel:

$$\mathbf{Q}_{K_3, Q1} = (E_{K_3, Q1}^{VV} ; E_{K_3, Q1}^{IR}) = (0,952 ; 9,38) \quad \text{bzw.} \quad (6-27)$$

$$\mathbf{Q}_{K_3, Q2} = (E_{K_3, Q2}^{VV} ; E_{K_3, Q2}^{IR}) = (0,978 ; 9,50)$$

Wie bereits in Kap. 6.5.2.3 ausführlich dargestellt beschränkt sich die Verwendung der redundanten Information auf schildergeregelte Knotenpunkte. Für die rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkte ist keine Verbesserung der Qualität gegenüber (6-26) zu erreichen.

Tabelle 6-13: *Informationsqualität des infrastrukturgestützten Ampel- und Vorfahrterkenners mit Kreuzungssender*

Systemkomponente		Qualitätsstufe Q1		Qualitätsstufe Q2	
		VV	IR	VV	IR
K <sub>1</sub> (Hinweis SG) – ohne BV	$\mathbf{Q}_{K_1, \text{ohneBV}}$	0,937	0,994	0,947	0,994
	– mit BV	$\mathbf{Q}_{K_1}$	0,937	0,937	0,954
K <sub>3</sub> (Hinweis VZ) – ohne BV	$\mathbf{Q}_{K_3, \text{ohneBV}}$	0,951	0,997	0,981	0,998
	– mit BV	$\mathbf{Q}_{K_3}$	0,952	0,938	0,978
AVE-Hinweis – ohne BV	$\mathbf{Q}_{AVE, \text{ohneBV}}$	<b>0,972</b>	<b>0,997</b>	<b>0,989</b>	<b>0,996</b>
	– mit BV	$\mathbf{Q}_{AVE}$	<b>0,973</b>	<b>0,938</b>	<b>0,988</b>

**Ergebnis:** Der infrastrukturgestützte Systemansatz mit einem Kreuzungssender kann weder für die Systemkomponente K<sub>1</sub> noch für K<sub>3</sub> die Anforderungen an die Qualität der fahrerunterstützenden Information erfüllen. Erst mit dem Einsatz eines Bildverarbeitungssystems und geeigneten Maßnahmen zur Fehlerbeherrschung ist – unter Beibehaltung einer akzeptablen Vollständigen Verfügbarkeit – ein ausreichendes Korrektheitsniveau zu erreichen. Dabei kann für die Qualitätsstufe Q1 den Anforderungen eines warnenden und für die Qualitätsstufe Q2 den Anforderungen eines warnenden und intervenierenden Ampel- und Vorfahrterkenners entsprochen werden. Wie bei dem fahrzeugautonomen Konzept (Kapitel 6.5.2.3) ist die Fahrerunterstützung auf lichtsignalgesteuerte und schildergeregelte Knotenpunkte beschränkt.

## 6.6 Ergebnis

Die Analyse der Informationsqualität der einzelnen Systemansätze zeigt, dass am ehesten den Anforderungen der warnenden Assistenzstrategie entsprochen werden kann. Die Anforderungen für eine informierende Assistenz können nur durch den infrastrukturgestützten Ansatz mit Baken erfüllt werden. Dies ergibt sich insbesondere aus den deutlich höheren Anforderungen an die Vollständige Verfügbarkeit der vorfahrtsregelnden Information für einen informierenden Ampel- und Vorfahrerkenner.

Bezüglich der Erfüllung der Anforderungen in den unterschiedlichen Knotenpunktsituationen ist festzuhalten, dass an einem rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkt nur durch den Einsatz von Baken die vorfahrtsregelnde Information in der geforderten Qualität bereitgestellt werden kann. Aufgrund der extrem hohen Investitionskosten für deren Installation und dem im Vergleich zu Maßnahmen an lichtsignalgesteuerten und schildergeregelten Knotenpunkten deutlich geringerem Sicherheitssteigerungspotenzial (vgl. Kapitel 2) ist von einer Fahrerunterstützung an rechts-vor-links-geregelten Knotenpunkten erst mal abzusehen.

An schildergeregelten Knotenpunkten sind unter Verwendung von Eingangsdaten höherer Qualität ebenso die fahrzeugautonomen Ansätze mit Bildverarbeitung in der Lage, die gestellten Anforderungen an die vorfahrtsregelnde Information zu erfüllen. Bei dem infrastrukturgestützten Ansatz mit Kreuzungssender kann die Qualität der fahrerunterstützenden Information an den schildergeregelten Knotenpunkten nur durch Hinzunahme eines fahrzeugautonomen Bildverarbeitungssystems zur Schilderererkennung gewahrt werden.

An den lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten kommen ausschließlich infrastrukturgestützte Systemansätze in Betracht. Aufgrund der erforderlichen Selektion des relevanten Signalgebers bei einer getrennten Signalisierung ist zusätzlich ein Bildverarbeitungssystem zur Erkennung des Fahrstreifens bzw. eines Fahrstreifenwechsels notwendig.

Mit den Analyseergebnissen lassen sich für die Entwicklung eines **Ampel- und Vorfahrterkenners** bezüglich der Systemkonzeption folgende Empfehlungen aussprechen:

- Der Fahrer ist durch eine **warnende Assistenzstrategie** zu unterstützen. Für eine informierende Assistenz ist die notwendige Verfügbarkeit der vorfahrtsregelnden Information nicht gegeben.
- Eine Fahrerunterstützung erfolgt nur **an lichtsignalgesteuerten und schildergeregelten Knotenpunkten**.
- Der Ampel- und Vorfahrterkenner ist als ein **infrastrukturgestütztes Fahrerassistenzsystem** mit Baken oder Kreuzungssender in Verbindung **mit einem fahrzeugautonomen Bildverarbeitungssystem** zu entwickeln.

Mit der dargestellten Systemkonzeption kann ein Ampel- und Vorfahrterkenner realisiert werden, der eine Bereitstellung der fahrerunterstützenden Information in einer Qualität ermöglicht, die den gestellten Anforderungen genügt. Als sicherheitsrelevantes System orientiert sich die Formulierung der Qualitätsforderung an der Bereitstellung einer „Sicheren Information“, die gemäß Kapitel 5.5 als Information definiert ist, die über die gesamte Verwendungsdauer eine Qualität aufweist, dass von Handlungen, die auf diesen Informationen beruhen, keine Gefährdung ausgeht.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die fortwährenden Bemühungen einer weiteren Steigerung der Verkehrssicherheit im Straßenverkehr, verbunden mit dem Ziel einer effizienteren und umweltschonenderen Abwicklung des Verkehrs, zeigen sich unter anderem in den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Verkehrstelematik. Hohe Erwartungen werden dabei in Fahrerassistenzsysteme gesetzt, die den Fahrer situationsangepasst in der Erfüllung der Fahraufgabe unterstützen. Ein Großteil der eingeführten Fahrerassistenzsysteme (z.B. ABS, ESP, ASR) lässt sich als autonom arbeitendes System, das den Fahrer bei der Stabilisierung des Fahrzeugs unterstützt, charakterisieren. Die weiteren verfügbaren Systeme dienen primär dem Zweck einer Komfortsteigerung (ACC, Tempomat, Navigationssystem). In der vorliegenden Arbeit werden Fahrerassistenzsysteme betrachtet, die in erster Linie zu einer Steigerung der Verkehrssicherheit beitragen und vorrangig im innerörtlichen Straßenverkehr wirken. Dabei soll der Fahrer insbesondere auf der Bahnführungsebene unterstützt werden.

Um eine angemessene Fahrerunterstützung zu realisieren, ist unter anderem eine umfassende Erfassung und Interpretation des Verkehrsgeschehens notwendig. Aufgrund der Komplexität des Verkehrsgeschehens in Städten sind hierfür Daten und Informationen unterschiedlichster Herkunft erforderlich. Da das Fahrerassistenzsystem durch die Unterstützung direkt oder indirekt Einfluss auf den Fahrprozess nimmt, handelt es sich um ein sicherheitsrelevantes System, von dem ein sicherer Betrieb gefordert wird. Als informationsverarbeitendes System überträgt sich diese Forderung auf die Informationen. Dabei müssen die Informationen eine Qualität aufweisen, sodass über die gesamte Verwendungsdauer der Informationen keine Gefährdung vom System ausgeht.

Hierbei zeigt sich, dass keine der existierenden Methoden und keines der Modelle in den verwandten Fachbereichen eine einheitliche Beschreibung der Qualität von Informationen in Fahrerassistenzsystemen gestattet. Ziel der Arbeit ist die Erstellung eines Qualitätskonzepts zur Beschreibung und Bewertung der Qualität sämtlicher in einem Fahrerassistenzsystem auftretenden Daten und Informationen.

Zu Beginn der Arbeit wird eine **Verkehrs- und Unfallanalyse** durchgeführt (Kapitel 2). Damit sollen die Stellen im innerörtlichen Straßenverkehr identifiziert werden, an denen ein erhöhtes Konfliktpotenzial und damit ein Wirkungsfeld für sicherheitssteigernde Fahrerassistenzsysteme besteht. Dazu wird eine Methode entwickelt, die auf der Grundlage von **standardisierten Verkehrssituationen** das Unfallgeschehen beschreibt. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass anhand polizeilicher Unfalldaten für jeden Unfallbeteiligten die Unfallsituation individuell aus deren Sicht dargestellt werden kann.

Die Untersuchung des Unfallgeschehens eines repräsentativen Stadtteils von Stuttgart ergab, dass **58%** der Unfallsituationen im Stadtverkehr an **Knotenpunkten** liegen, wobei mit

- **21%** an **lichtsignalgesteuerten** und
- **31%** an **schildergeregelten** Knotenpunkten

diese verstärkt vertreten sind. Die Betrachtung des Fehlverhaltens in Unfallsituationen zeigt, dass der Fahrer besonders in der Erkennung der **Vorfahrts- und Vorrangsregelung** eine Unterstützung benötigt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden in Kapitel 3 verschiedene sicherheits-



steigernde Fahrerassistenzsysteme für Knotenpunktsituationen vorgestellt. Neben einer Einführung in die Aufgaben der Fahrzeugführung wird eine **systematische Einteilung für Fahrerassistenzsysteme** gegeben, um anhand dieser Klassifizierung den Zusammenhang zwischen der Ausprägung eines Fahrerassistenzsystems und den Anforderungen an die Informationsqualität zu erläutern.

Den Schwerpunkt der Arbeit bildet die Erstellung eines **Qualitätskonzepts** zur Beschreibung und Bewertung der Qualität von Daten und Informationen innerhalb informationsverarbeitender Systemen und Prozessen (Kapitel 5). Das Qualitätskonzept ist gegliedert in die zwei Teile **Qualitätsmodell** und **Analyseverfahren**. Das Qualitätsmodell bildet die Grundlage und den Rahmen des Qualitätskonzepts. Darin sind die sieben **Qualitätsmerkmale** Verfügbarkeit, Aktualität, Vollständigkeit, Konsistenz, Korrektheit, metrische und semantische Genauigkeit definiert, mit deren Hilfe eine einheitliche und objektive Beschreibung der Qualität sämtlicher auftretender Arten und Typen von Daten und Informationen gegeben ist. Zur Konkretisierung und Quantifizierung der Informationsqualität werden geeignete **Qualitätsparameter** herangezogen.

Mit dem erarbeiteten **Analyseverfahren** erfolgt die Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität innerhalb des Informationsverarbeitungsprozesses des Systems. Es ist gegliedert in einen graphischen und einen analytischen Teil. Über das **Informationsflussdiagramm** erfolgt die Modellierung des Systems, wobei der Fokus auf den Informationsfluss innerhalb des Systems gerichtet ist. So ist der Aufbau eines Systems und dessen Systemvarianten in anschaulicher und leicht verständlicher Weise darstellbar. Über ein **Rechenverfahren** erfolgt die Auswertung des Informationsflussdiagramms. Es handelt sich hierbei um ein probabilistisches Auswerteverfahren, bei dem als Rechengrößen die Wahrscheinlichkeiten, mit der die Forderungen an die Qualitätsmerkmale erfüllt werden, genutzt werden. Das Analyseverfahren weist dabei die folgenden Eigenschaften auf:

- Die **Systemanalyse** kann in **verschiedenen Abstraktionsstufen** erfolgen. Über den modularen Aufbau können **Systemkomponenten** separat analysiert und die Ergebnisse in das Gesamtsystem integriert werden. Dabei kann in anschaulicher Weise der **Zusammenhang zwischen der Qualität der eingehenden und ausgehenden Daten und Informationen** in einem System dargestellt werden.
- Das Qualitätskonzept für Informationen orientiert sich an Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmodellen und -verfahren verwandter Fachbereiche und berücksichtigt die grundlegenden Normen. Damit ist eine **interdisziplinäre Anwendbarkeit** des Verfahrens gegeben.
- Aufgrund der bestehenden Abhängigkeit zu den Qualitätsgrößen der Eingangsdaten und -informationen, die oftmals nur sehr unsicher quantifizierbar sind, hat das Einzelergebnis nur eine begrenzte Aussagekraft. Die Stärken des Verfahrens liegen vielmehr im **Vergleich von Systemansätzen und -varianten**.
- Das Analyseverfahren ist bereits **in der Entwurfsphase anwendbar**. Es kann hierbei frühzeitig kritische Systemkomponenten im Systemansatz identifizieren und die Formulierung der Anforderungen an die Qualität der Eingangsdaten und der informationsverarbeitenden Komponenten unterstützen. Zudem kann das erarbeitete Verfahren bei sicherheitsrelevanten Systemen die **Führung des notwendigen Sicherheitsnachweises** hilfreich unterstützen.

- Die Qualität des Analyseergebnisses ist maßgeblich abhängig von einer korrekten Systemmodellierung und einer zutreffenden Festlegung der Qualitätsgrößen der Eingangsdaten und Systemkomponenten. Aus diesem Grund sind möglichst alle beteiligten Bereiche bei der Systemmodellierung und der Festsetzung der Qualitätsgrößen einzubeziehen.

In Kapitel 6 wird der **Ampel- und Vorfahrterkenner** als ein möglicher Vertreter eines Kreuzungsassistenzsystems einer Analyse der Informationsqualität unter Einsatz des vorgestellten Qualitätskonzepts unterzogen und damit exemplarisch der Beweis der Anwendbarkeit des Verfahrens erbracht. Das Analyseergebnis zeigt dabei, dass nur durch einen kombinierten Ansatz **mit fahrzeugautonomen und infrastrukturgestützten Komponenten** die fahrerunterstützende Information in der geforderten Qualität bereitgestellt werden kann.

Die Anwendbarkeit des vorgestellten Qualitätskonzepts für Informationen ist nicht auf Fahrerassistenzsysteme beschränkt. Es ist auf alle informationsverarbeitenden Systeme gleichermaßen anwendbar. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Formulierung der Anforderungen an die Informationsqualität nicht nur über das Sicherheitsniveau erfolgen kann. Ebenso ist es möglich, dass diese beispielsweise bei einem Dienst oder Service über das geforderte Akzeptanzniveau formuliert werden.

Mit dem vorgestellten Qualitätskonzept erfolgt die Bewertung der Informationsqualität grundsätzlich an einem Modell des Systems, welches anhand des Informationsflusses des Systementwurfs oder des bestehenden Systems aufzustellen ist. Um eine Bewertung der Informationsqualität während des Betriebs eines Systems zu ermöglichen, ist eine Erweiterung des Qualitätskonzepts um geeignete systemspezifische Qualitätsmanagementstrategien erforderlich.

# Anhang

## Anhang A Klassifikationsschema für Verkehrssituationen

Enthaltene Kategorien und Ausprägungen im Klassifikationsschema für Verkehrssituationen von FASTENMEIER (1995)

	Kategorie	Code	Ausprägungen
<b>Straßentyp und -zustand</b>	Autobahn	A	5
	Landstraße	L	2
	City, innerorts	C	7
<b>Trasse</b>	Horizontal	H	2
	Vertikal	V	2
	Knotenpunkt	K	5
<b>Verkehrsablauf</b>	Engstellen	E	2
	Fahrtrichtung	F	3

- |   |  |
|---|--|
| <p>A1 Autobahn, modern ausgebaut; je Fahrbahn 3 (oder mehr) Fahrspuren; breiter Seitenstreifen: Standspur oder im Anschlussstellenbereich Beschleunigungs- oder Verzögerungsspur</p> <p>A2 Autobahn, je Fahrbahn 2 Fahrspuren; breiter Seitenstreifen: Standspur oder im Anschlussstellenbereich Beschleunigungs- oder Verzögerungsspur</p> <p>A3 Autobahn, je Fahrbahn 3 (oder mehr) Fahrspuren; schmaler oder kein Seitenstreifen: keine Standspur oder im Anschlussstellenbereich keine Beschleunigungs- oder Verzögerungsspur</p> <p>A4 Autobahn, je Fahrbahn 2 Fahrspuren; schmaler oder kein Seitenstreifen: im Anschlussstellenbereich ohne Beschleunigungs- oder Verzögerungsspur</p> <p>A5 Park- und Serviceareal im Autobahnbereich</p> | <p>C3 wie C2, mit eingelassenen Schienen, z.B. für Straßenbahnen</p> <p>C4 eine Fahrbahn, 2-3-spurig befahrbar</p> <p>C5 wie C4, mit eingelassenen Schienen, z.B. für Straßenbahnen</p> <p>C6 schmale oder durch Beparken verengte Fahrbahn, enge Ortsdurchfahrten</p> <p>C7 alle Einbahnstraßen</p>   |
| <p>L1 Landstraße, erbaut nach modernen Längs- und Querschnittsrichtlinien: mindestens 2 Fahrspuren, Fahrbahnmarkierungen (befestigte Bankette), weitkurviger Verlauf</p> <p>L2 Landstraße, nach älteren Richtlinien erbaut oder Landstraße zweiter Ordnung, Nebenstrecken: schmale, runde Fahrbahn, Fahrbahnmarkierungen teilweise oder ganz fehlend, engkurviger Verlauf</p>   | <p>H0 ohne Kurven, Gerade</p> <p>H1 Kurve</p> <p>V0 ebener Verlauf</p> <p>V1 Steigung/Gefälle</p> <p>K0 ohne Kreuzung</p> <p>K1 ampelgeregelte Kreuzung</p> <p>K2 Kreuzung, Regelung rechts vor links</p> <p>K3 Kreuzung, Regelung durch Beschilderung, Fahrer vorfahrtsberechtigt (auch Ein-/Ausfahrten auf BAB aus der Sicht des Fahrers, der sich auf der Autobahn befindet)</p> <p>K4 wie K3, aus der Sicht des Wartepflichtigen</p> |
| <p>C1 alle Straßen mit 2 (oder mehr) Fahrbahnen, Fahrbahnen durch Grünstreifen o.ä. getrennt, innerstädtische Ringe u.ä. Straßen</p> <p>C2 eine Fahrbahn, breit, mindestens in 4 Spuren befahrbar</p>   | <p>E0 ohne Engstellen und Hindernisse</p> <p>E1 Engstellen, Hindernisse, Fahrbahnverengungen, enger Tunnel, schmale Brücken usw.</p> <p>F0 ohne Fahrtrichtungsänderung</p> <p>F1 Rechtsabbiegen</p> <p>F2 Linksabbiegen</p>  |

## Anhang B Boolesche Algebra

Sind  $X_1, X_2, X_3$  die booleschen Größen mit  $X_1, X_2, X_3 \in \{0,1\}$  so gelten für die Operationen Konjunktion (UND,  $\wedge$ ), Disjunktion (inklusive ODER,  $\vee$ ) und Negation (NICHT,  $\bar{\phantom{x}}$ ) die folgenden Axiome:

### Kommutativgesetz:

$$\begin{aligned} X_1 \wedge X_2 &= X_2 \wedge X_1 \\ X_1 \vee X_2 &= X_2 \vee X_1 \end{aligned} \tag{B-1}$$

### Distributivgesetz:

$$\begin{aligned} X_1 \wedge (X_2 \vee X_3) &= (X_1 \wedge X_2) \vee (X_1 \wedge X_3) \\ X_1 \vee (X_2 \wedge X_3) &= (X_1 \vee X_2) \wedge (X_1 \vee X_3) \end{aligned} \tag{B-2}$$

### Existenz eines neutralen Elements:

$$\begin{aligned} 1 \wedge X_1 &= X_1 \\ 0 \vee X_1 &= X_1 \end{aligned} \tag{B-3}$$

### Existenz eines inversen Elements:

$$\begin{aligned} X_1 \wedge \bar{X}_1 &= 0 \\ X_1 \vee \bar{X}_1 &= 1 \end{aligned} \tag{B-4}$$

Aus diesen Axiomen lassen sich folgende für den Umgang mit der Booleschen Algebra äußerst praxisrelevante Regeln ableiten:

### Identität:

$$\begin{aligned} X_1 \wedge 0 &= 0 \\ X_1 \vee 1 &= 1 \end{aligned} \tag{B-5}$$

### Idempotenz:

$$\begin{aligned} X_1 \wedge X_1 &= X_1 \\ X_1 \vee X_1 &= X_1 \end{aligned} \tag{B-6}$$

### Involution:

$$\bar{\bar{X}}_1 = X_1 \tag{B-7}$$

### Absorption:

$$\begin{aligned} X_1 \wedge (X_1 \vee X_2) &= X_1 \\ X_1 \vee (X_1 \wedge X_2) &= X_1 \end{aligned} \tag{B-8}$$

### Assoziativgesetz:

$$\begin{aligned} X_1 \wedge (X_2 \wedge X_3) &= (X_1 \wedge X_2) \wedge X_3 \\ X_1 \vee (X_2 \vee X_3) &= (X_1 \vee X_2) \vee X_3 \end{aligned} \tag{B-9}$$

**De Morgansches Theorem:**

$$\begin{aligned}\overline{X_1 \wedge X_2} &= \overline{X_1} \vee \overline{X_2} \\ \overline{X_1 \vee X_2} &= \overline{X_1} \wedge \overline{X_2}\end{aligned}\tag{B-10}$$

Das Konjunktionszeichen ( $\wedge$ ) wird im Allgemeinen unterdrückt. Ein Konjunktionsterm erhält damit die kompakte Form eines Produktterms.

In der reellen algebraischen Schreibweise lauten die booleschen Operationen wie folgt:

$$\text{UND: } X_1 \wedge X_2 = x_1 \cdot x_2 = x_1 x_2 \tag{B-11}$$

$$\text{ODER: } X_1 \vee X_2 = x_1 + x_2 - x_1 \cdot x_2 = x_1 + x_2 - x_1 x_2 \tag{B-12}$$

$$\text{NICHT: } \overline{X_1} = 1 - x_1 = \bar{x}_1 \tag{B-13}$$

Bei der Verknüpfung von  $n$  booleschen Größen erhält man für die Konjunktion bzw. Disjunktion:

$$X_1 \wedge X_2 \wedge \dots \wedge X_n = \bigwedge_{i=1}^n X_i = \prod_{i=1}^n x_i \tag{B-14}$$

$$X_1 \vee X_2 \vee \dots \vee X_n = \bigvee_{i=1}^n X_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i) \tag{B-15}$$

Der Übergang zu der Wahrscheinlichkeit ergibt sich dadurch, dass die boolesche Größe  $X_i$  als diskrete zweiwertige Zufallsvariable mit der Eintrittswahrscheinlichkeit  $P\{X_i=1\}$  der Funktionsfähigkeit und  $P\{X_i=0\}$  des Ausfalls der Komponente  $i$  aufgefasst wird (VAHL 1998). Der Erwartungswert  $E\{X_i\}$  berechnet sich zu:

$$E\{X_i\} = 0 \cdot P\{X_i = 0\} + 1 \cdot P\{X_i = 1\} \tag{B-16}$$

Verwendete Quellen: SCHNEEWEISS (1992), VAHL (1998), VDI 4008-2 (1998), MEYNA (1994)

## Anhang C Wahrscheinlichkeit für mvn- und m,n-Systeme mit unterschiedlichen Eingangswahrscheinlichkeiten

Das mvn-System beschreibt Systeme bei denen mindestens  $m$  von  $n$  Eingängen funktionsfähig sein müssen. Für gleiche Eingangswahrscheinlichkeiten  $E$  gilt:

$$p_{mvn}(A) = \sum_{k=m}^n \binom{n}{k} \cdot E^k \cdot (1-E)^{n-k}$$

Das m,n-System beschreibt ein System, bei dem genau  $m$  von  $n$  Eingängen funktionsfähig sind. Für gleiche Eingangswahrscheinlichkeiten  $E$  ergibt sich die Wahrscheinlichkeit im Ausgang  $p_{m,n}(A)$  zu:

$$p_{m,n}(A) = \binom{n}{m} \cdot E^m \cdot (1-E)^{n-m}$$

Für unterschiedliche Eingangswahrscheinlichkeiten  $E_i$  gelten die in folgender Tabelle zusammengestellten Formeln.

m	n	$p_{mvn}(A)$	$p_{m,n}(A)$
1	1	$p_{1v1}(A) = E_1$	$p_{1,1}(A) = E_1$
1	2	$p_{1v2}(A) = E_1 + E_2 - E_1 E_2$ $= 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - E_i)$	$p_{1,2}(A) = p_{1v2}(A) - p_{2v2}$ $= 1 - \prod_{i=1}^2 E_i - \prod_{i=1}^2 (1 - E_i)$
2	2	$p_{2v2}(A) = E_1 E_2$ $= \prod_{i=1}^2 E_i$	$p_{2,2}(A) = p_{2v2}(A)$ $= \prod_{i=1}^2 E_i$
1	3	$p_{1v3}(A) = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - E_i)$	$p_{1,3}(A) = p_{1v3}(A) - p_{2v3}(A)$ $= 1 - \sum_{\substack{i,j \in [1..3] \\ i < j}} E_i E_j + 2 \cdot \prod_{i=1}^3 E_i - \prod_{i=1}^3 (1 - E_i)$
2	3	$p_{2v3}(A) = \sum_{\substack{i,j \in [1..3] \\ i < j}} E_i E_j - 2 \cdot \prod_{i=1}^3 E_i$	$p_{2,3}(A) = p_{2v3}(A) - p_{3v3}(A)$ $= \sum_{\substack{i,j \in [1..3] \\ i < j}} E_i E_j - 3 \cdot \prod_{i=1}^3 E_i$
3	3	$p_{3v3}(A) = \prod_{i=1}^3 E_i$	$p_{3,3}(A) = p_{3v3}(A)$ $= \prod_{i=1}^3 E_i$
1	4	$p_{1v4}(A) = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - E_i)$	$p_{1,4}(A) = p_{1v4}(A) - p_{2v4}(A)$ $= 1 - \sum_{\substack{i,j \in [1..4] \\ i < j}} E_i E_j + 2 \cdot \sum_{\substack{i,j,k \in [1..4] \\ i < j < k}} E_i E_j E_k$ $- 3 \cdot \prod_{i=1}^4 E_i - \prod_{i=1}^4 (1 - E_i)$

m	n	$p_{m,n}(A)$	$p_{m,n}(A)$
2	4	$p_{2v4}(A) = \sum_{\substack{i,j \in [1..4] \\ i < j}} E_i E_j - 2 \cdot \sum_{\substack{i,j,k \in [1..4] \\ i < j < k}} E_i E_j E_k$ $+ 3 \cdot \prod_{i=1}^4 E_i$	$p_{2,4}(A) = p_{2v4}(A) - p_{3v4}(A)$ $= \sum_{\substack{i,j \in [1..4] \\ i < j}} E_i E_j - 3 \cdot \sum_{\substack{i,j,k \in [1..4] \\ i < j < k}} E_i E_j E_k$ $+ 6 \cdot \prod_{i=1}^4 E_i$
3	4	$p_{3v4}(A) = \sum_{\substack{i,j,k \in [1..4] \\ i < j < k}} E_i E_j E_k - 3 \cdot \prod_{i=1}^4 E_i$	$p_{3,4}(A) = p_{3v4}(A) - p_{4v4}(A)$ $= \sum_{\substack{i,j,k \in [1..4] \\ i < j < k}} E_i E_j E_k - 4 \cdot \prod_{i=1}^4 E_i$
4	4	$p_{4v4}(A) = \prod_{i=1}^4 E_i$	$p_{4,4}(A) = p_{4v4}(A)$ $= \prod_{i=1}^4 E_i$
1	5	$p_{1v5}(A) = 1 - \prod_{i=1}^5 (1 - E_i)$	$p_{1,5}(A) = p_{1v5}(A) - p_{2v5}(A)$ $= 1 - \sum_{\substack{i,j \in [1..5] \\ i < j}} E_i E_j + 2 \cdot \sum_{\substack{i,j,k \in [1..5] \\ i < j < k}} E_i E_j E_k$ $- 3 \cdot \sum_{\substack{i,j,k,l \in [1..5] \\ i < j < k < l}} E_i E_j E_k E_l$ $+ 4 \cdot \prod_{i=1}^5 E_i - \prod_{i=1}^5 (1 - E_i)$
2	5	$p_{2v5}(A) = \sum_{\substack{i,j \in [1..5] \\ i < j}} E_i E_j - 2 \cdot \sum_{\substack{i,j,k \in [1..5] \\ i < j < k}} E_i E_j E_k +$ $+ 3 \cdot \sum_{\substack{i,j,k,l \in [1..5] \\ i < j < k < l}} E_i E_j E_k E_l - 4 \cdot \prod_{i=1}^5 E_i$	$p_{2,5}(A) = p_{2v5}(A) - p_{3v5}(A)$ $= \sum_{\substack{i,j \in [1..5] \\ i < j}} E_i E_j - 3 \cdot \sum_{\substack{i,j,k \in [1..5] \\ i < j < k}} E_i E_j E_k +$ $+ 6 \cdot \sum_{\substack{i,j,k,l \in [1..5] \\ i < j < k < l}} E_i E_j E_k E_l - 10 \cdot \prod_{i=1}^5 E_i$
3	5	$p_{3v5}(A) = \sum_{\substack{i,j,k \in [1..5] \\ i < j < k}} E_i E_j E_k - 3 \cdot \sum_{\substack{i,j,k,l \in [1..5] \\ i < j < k < l}} E_i E_j E_k E_l$ $+ 6 \cdot \prod_{i=1}^5 E_i$	$p_{3,5}(A) = p_{3v5}(A) - p_{4v5}(A)$ $= \sum_{\substack{i,j,k \in [1..5] \\ i < j < k}} E_i E_j E_k - 4 \cdot \sum_{\substack{i,j,k,l \in [1..5] \\ i < j < k < l}} E_i E_j E_k E_l$ $+ 10 \cdot \prod_{i=1}^5 E_i$
4	5	$p_{4v5}(A) = \sum_{\substack{i,j,k,l \in [1..5] \\ i < j < k < l}} E_i E_j E_k E_l - 4 \cdot \prod_{i=1}^5 E_i$	$p_{4,5}(A) = p_{4v5}(A) - p_{5v5}(A)$ $= \sum_{\substack{i,j,k,l \in [1..5] \\ i < j < k < l}} E_i E_j E_k E_l - 5 \cdot \prod_{i=1}^5 E_i$
5	5	$p_{5v5}(A) = \prod_{i=1}^5 E_i$	$p_{5,5}(A) = p_{5v5}(A)$ $= \prod_{i=1}^5 E_i$

## Glossar

- Abbiege-Unfall:** Unfalltyp, der durch einen Konflikt zwischen einem Abbieger und einem aus gleicher oder entgegengesetzter Richtung kommenden Verkehrsteilnehmer gekennzeichnet ist (FGSV 2000).
- Aktualität:** Die Aktualität gibt das Ausmaß der Übereinstimmung der Information mit der sich zeitlich ändernden konzeptionellen Realität an (S. 80).
- Assistenzebene:** Die Assistenzebene charakterisiert die Aufgabenebene, in der die Fahrerunterstützung erfolgt. Nach der hierarchischen Gliederung der Aufgabe der Fahrzeugführung werden Fahrerassistenzsysteme, die auf der Navigations-, der Bahnführungs- und der Stabilisierungsebene den Fahrer unterstützen unterschieden (S. 42).
- Assistenzkonzept:** Das Assistenzkonzept beschreibt die Ausprägung eines Fahrerassistenzsystems unter Berücksichtigung des Zusammenwirkens von Fahrzeug und Umwelt. Es werden hierbei fahrzeugautonome, infrastrukturgestützte und kooperative Konzepte unterschieden (S. 41).
- Assistenzstrategie:** Die Assistenzstrategie beschreibt die Art der Fahrerunterstützung eines Fahrerassistenzsystems unter Berücksichtigung des Zusammenwirkens von Fahrer und Fahrzeug. Es werden hierbei informierende, warnende, intervenierende und agierende Systeme unterschieden (S. 39).
- Durchgangsstraße:** Straße durch ein bebautes Gebiet, bei deren überwiegendem Verkehrsanteil die Fahrtquellen und Fahrtziele außerhalb des Gebiets liegen (FGSV 2000).
- Einbiegen/Kreuzen-Unfall:** Unfalltyp, der durch einen Konflikt zwischen einem einbiegenden oder kreuzenden Wartepflichtigen und einem Vorfahrtsberechtigten gekennzeichnet ist (FGSV 2000).
- Einmündung:** Knotenpunkt, bei dem eine Straße an eine durchgehende Straße angeschlossen ist (FGSV 2000).
- Fahrnfall:** Unfalltyp, der gekennzeichnet ist durch den Verlust der Kontrolle eines Fahrzeugführers über sein Fahrzeug, ohne dass andere Verkehrsteilnehmer dazu beitragen (FGSV 2000).
- Fehler:** Nichterfüllung mindestens einer Anforderung an ein erforderliches Merkmal einer Betrachtungseinheit (VDI/VDE 3542: 1988).
- Gefahr:** Sachlage, bei der das Risiko größer als das Grenzkrisiko ist (DIN VDE 31000-2: 1987).
- Gefahr:** Zustand, aus dem ein Schaden entstehen kann (DIN 31004).
- Gefährdung:** Räumlich und zeitlich sowie nach Art, Größe und Richtung bestimmte Gefahr für eine Person, eine Sache oder eine Funktion (DIN 31004).
- Getöteter (bei einem Verkehrsunfall):** Person, die innerhalb von 30 Tagen an den Unfallfolgen gestorben ist (FGSV 2000).
- Grenzkrisiko:** Größtes noch vertretbares Risiko eines bestimmten technischen Vorgangs oder Zustands (DIN VDE 31000-2: 1987).
- Hauptsammelstraße (Verkehrsstraße):** Lokal verkehrswichtige Straße innerhalb der geschlossenen Ortslage für durchgehenden Verkehr zwischen Ortsteilen mit Knotenpunkten in einer Ebene und direkten Zufahrten zu anliegenden Grundstücken, die in der Regel gegenüber kreuzenden und einmündenden Straßen bevorrechtigt ist (FGSV 2000).
- Hauptverkehrsstraße:** Lokal besonders verkehrswichtige Straße innerhalb der Ortslage für überwiegend örtlich durchgehenden, starken Verkehr mit meist plangleichen Knotenpunkten und Zufahrten zu anliegenden Grundstücken, die in der Regel gegenüber einmündenden oder kreuzenden Straßen bevorrechtigt ist (FGSV 2000).
- Informationsflussdiagramm:** Graphisches Verfahren zur Darstellung der logischen Zusammenhänge der Informationen und Systemkomponenten mit unmittelbarem Einfluss auf die Informationsqualität innerhalb informationsverarbeitender Systeme (S. 92).
- Innerortsstraße:** Straße innerhalb einer geschlossenen Ortslage (FGSV 2000).



- 
- Knotenpunkt:** Bauliche Anlage, die der Verknüpfung von Verkehrswegen dient (FGSV 2000).
- Konfliktfläche:** Teilfläche einer Straßenverkehrsanlage, die aus der Überlagerung der Bewegungstreifen nicht verträglicher Verkehrsströme entsteht (FGSV 2000).
- Konsistenz:** Die Konsistenz gibt das Ausmaß der Übereinstimmung der Information mit dem Informationsmodell an (S. 82).
- Korrektheit:** Die Korrektheit gibt das Ausmaß der Übereinstimmung der Information mit der konzeptionellen Realität bei vorausgesetzter Aktualität an (S. 83).
- Kreuzung:** Knotenpunkt mit mehr als drei Knotenpunktarmen, die von mindestens zwei durchgehend befahrbaren Straßen gebildet werden (FGSV 2000).
- Leichtverletzter (bei einem Verkehrsunfall):** Verletzte Person, die nach einem Verkehrsunfall nicht unmittelbar zur stationären Behandlung in einem Krankenhaus aufgenommen worden ist (FGSV 2000).
- Metadaten:** Die Metadaten stellen die Menge aller zur Beurteilung der Einsetzbarkeit relevanten Informationen dar (JOOS 2000).
- Metrische Genauigkeit:** Die metrische Genauigkeit gibt den Zusammenhang zwischen dem gemessenen und wahren bzw. plausibelsten Wert an (S. 83).
- Ortsdurchfahrt:** Durch die geschlossene Ortslage hindurchführender Abschnitt einer Straße von überörtlicher Bedeutung, für den besondere Bestimmungen der Baulast, der Unterhaltung und des Anbaus gelten (FGSV 2000).
- PROMETHEUS:** (= Programme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety). Von Industrie und Basisforschung getragene und vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördertes EUREKA-Verbundprojekt mit dem Ziel durch eine integrierte Entwicklung in der Kraftfahrzeug-, Informations- und Verkehrstechnik eine erhebliche Verbesserung in den Bereichen Sicherheit, Umweltverträglichkeit und Leistungsfähigkeit zu erreichen (MARBURGER et al. 1990).
- Qualität:** Gesamtheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen (DIN EN ISO 8402: 1995).
- Qualität:** Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt (DIN EN ISO 9000: 2000).
- Risiko:** Das Risiko, das mit einem bestimmten technischen Vorgang oder Zustand verbunden ist, wird zusammenfassend durch eine Wahrscheinlichkeitsaussage beschrieben, die die zu erwartende Häufigkeit des Eintritts eines zum Schaden führenden Ereignisses und das beim Ereigniseintritt zu erwartende Schadensausmaß berücksichtigt (DIN VDE 31000-2: 1987).
- Schaden (juristisch):** Beeinträchtigung einer natürlichen oder juristischen Person in ihren Rechtsgütern (CREIFELDS 1981).
- Schaden (technisch):** Materielle oder funktionelle Beeinträchtigung einer Person und/oder einer Sache (DIN 31004).
- Schwerverletzter (bei einem Verkehrsunfall):** Verletzte Person, die nach einem Verkehrsunfall unmittelbar zur stationären Behandlung in einem Krankenhaus aufgenommen worden und nicht innerhalb von 30 Tagen an den Unfallfolgen gestorben ist (FGSV 2000).
- Semantische Genauigkeit:** Die semantische Genauigkeit gibt den Diskretisierungsgrad der Objekt- und Sachdaten an (S. 85).
- Sichere Information:** Eine Information, die über die gesamte Verwendungsdauer eine Qualität aufweist, die sicherstellt, dass von der Handlung, die auf dieser Information beruht, keine Gefährdung ausgeht (S. 125).
- Sicherheit:** Sachlage, bei der das Risiko nicht größer als das Grenzkrisiko ist (DIN VDE 31000-2: 1987).
- Sicherheit:** Zustand, in dem das Risiko eines Personen- oder Sachschadens auf einen annehmbaren Wert begrenzt ist (DIN EN ISO 8402: 1995).

- Situationselement:** Über die Situationselemente erfolgt die Klassifizierung der Verkehrs- und Unfallsituationen. Es werden hierbei die drei Situationselemente Straßentyp, Knotentyp und Fahrtrichtung unterschieden (S. 6).
- Straßenverkehrsunfall:** Ereignis, bei dem infolge des Fahrverkehrs auf öffentlichen Wegen und Plätzen Personen getötet oder verletzt werden oder Sachschaden verursacht wird (FGSV 2000).
- Überschreiten-Unfall:** Unfalltyp, der gekennzeichnet ist durch einen Konflikt zwischen einem die Fahrbahn überquerenden Fußgänger und einem Fahrzeug, sofern es sich nicht um einen Abbiege-Unfall handelt (FGSV 2000).
- Unfall durch ruhenden Verkehr:** Unfalltyp, der gekennzeichnet ist durch einen Konflikt zwischen fließendem und ruhendem Verkehr einschließlich des Ein- und Ausparkens (FGSV 2000).
- Unfall im Längsverkehr:** Unfalltyp, der gekennzeichnet ist durch einen Konflikt zwischen Verkehrsteilnehmern aus gleicher oder entgegengesetzter Richtung, sofern es sich nicht um einen anderen definierten Unfalltyp handelt (FGSV 2000).
- Unfall:** Ereignis mit nicht unbeträchtlicher Schädigung eines Menschen oder von Sachen.
- Unfallkosten:** Monetäre Bewertung der Personen- und Sachschäden von Unfällen (FGSV 2000).
- Unfallsituation:** Die Verkehrssituation, die zum Zeitpunkt des Unfalleintritts von am Unfall beteiligten Verkehrsteilnehmern erlebt wird (S. 8).
- Verfügbarkeit:** Die Verfügbarkeit gibt das Ausmaß des Vorhandenseins der Information zu einem definierten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort an (S. 80).
- Verkehr:** Verkehr ist die Summe aller Ortsveränderungen von Personen und Sachen innerhalb eines Betrachtungsraumes in Abhängigkeit von der Zeit (WEIGELT & WEIß 1972).
- Verkehrsgefahr:** Verkehrsspezifische Möglichkeit eines Schadeneintritts ausschließlich beim Nutzer des Verkehrssystems (FRICKE & PIERICK 1990).
- Verkehrssituation:** Stellt einen begrenzten Ausschnitt aus dem Verkehrsgeschehen dar, die der Fahrer als solche erlebt und in seiner zeitlichen und räumlichen Begrenzung erfährt. Sie wird durch die Kombination der Situationselemente Straßentyp, Knotentyp und Fahrtrichtung gebildet und auch als **standardisierte** Verkehrssituation bezeichnet (S. 6).
- Vollständigkeit:** Die Vollständigkeit gibt das Ausmaß des Vorhandenseins sämtlicher zur Beschreibung der konzeptionellen Realität erforderlichen Informationen an (S. 82).
- Wohnstraße:** Anliegerstraße im einem Dorf-, Wohn- oder Mischgebiet (FGSV 2000).
- Zuverlässigkeit:** Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderungen zu erfüllen (DIN 40041: 1990).

## Abkürzungen

<b>ABS</b>	Antiblockiersystem	<b>IK</b>	Konsistenz
<b>ACC</b>	Adaptive Cruise Control	<b>INVENT</b>	Intelligenter Verkehr und nutzer-gerechte Technik
<b>ASA</b>	Abbiege- und Spurwechsellassistentz	<b>IR</b>	Korrektheit
<b>ASR</b>	Anti-Schlupf-Regulierung	<b>IS</b>	Informationssystem
<b>AVE</b>	Ampel- und Vorfahrterkennung	<b>ISO</b>	International Standards Organisation
<b>BAST</b>	Bundesanstalt für Straßenwesen	<b>IT</b>	Informations-Technologie
<b>BMBF</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung	<b>IV</b>	Vollständigkeit
<b>BMVBW</b>	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen	<b>LISB</b>	Leit- und Informationssystem Berlin
<b>BV</b>	Bildverarbeitung	<b>LSA</b>	Lichtsignalanlage
<b>CCD</b>	Charge Coupled Device (ladungs-gekoppeltes Halbleiterelement)	<b>LZA</b>	Lichtzeichenanlage
<b>CEN</b>	Comité Européen de Normalisation	<b>MMI</b>	Man Machine Interface
<b>DGPS</b>	Differential Global Positioning System	<b>MOTIV</b>	Mobilität und Transport im inter-modalen Verkehr
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung	<b>MTBF</b>	Mean Time Between Failures (mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen)
<b>DK</b>	Digitale Karte	<b>MTTF</b>	Mean Time to failure (mittlere Betriebsdauer)
<b>DRIVE</b>	Dedicated Road Infrastructure for Vehicle use and safety in Europe	<b>MTTFF</b>	Mean Time To First Failure (mittlere Systemdauer bis zum ersten Ausfall)
<b>DTV</b>	Durchschnittlicher Tagesverkehr	<b>PROMETHEUS</b>	Programme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety
<b>ESP</b>	Elektronisches Stabilitätsprogramm	<b>r.v.l.</b>	rechts vor links
<b>FAS</b>	Fahrerassistenzsystem	<b>RDS/TMC</b>	Radio Data System/Traffic Message Channel
<b>FCD</b>	Floating Car Data	<b>SG</b>	Signalgeber
<b>FIPS</b>	Federal Information Processing Standard	<b>StVUnfStatG</b>	Straßenverkehrsunfallstatistik-gesetz
<b>FMEA</b>	Failure Mode and Effects Analysis (Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse)	<b>UDIS</b>	Unfalldaten-Informationssystem
<b>FR</b>	Fahrtrichtung	<b>US</b>	Unfallsituation
<b>FS</b>	Fahrstreifen	<b>VDI</b>	Verband Deutscher Ingenieure
<b>FTA</b>	Fault Tree Analysis (Fehlerbaumanalyse)	<b>VS</b>	Verkehrssituation
<b>GATS</b>	Global Automotive Telematics Standard	<b>VV</b>	Vollständige Verfügbarkeit
<b>GDF</b>	Geographical Data Format	<b>VZ</b>	Verkehrszeichen
<b>GIS</b>	Geoinformationssystem	<b>XFCD</b>	Extended Floating Car Data
<b>GM</b>	Metrische Genauigkeit	<b>ZA</b>	Aktualität
<b>GPS</b>	Global Positioning System	<b>Zif</b>	Zielführungssystem
<b>GS</b>	Semantische Genauigkeit	<b>ZV</b>	Verfügbarkeit
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications		
<b>HC</b>	Heading Control		
<b>ICA</b>	International Cartographic Association		

## Literatur

- Albus, C., Friedel, B., Nicklisch, F. und Schulz, H. (1999): *Intelligente Transport-Systeme / Fahrer-Assistenz-Systeme*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 45, S. 98-104.
- Arand, W., Kupke, P. und Schlichting, K.-D. (1983): *Kritische Situationen im Innerortsverkehr mit Kraftfahrzeugen*. Straßenverkehrstechnik, Heft 5, S. 137-145.
- Arronoff, S. (1989): *Geographic Information System: A Management Perspective*. WDL Publications.
- Aussems, T. (1999): *Positionsschätzung von Landfahrzeugen mittels Kalman-Filterung aus Satelliten- und Koppelnavigationsbeobachtungen*. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Nr. 55. Aachen Geodätisches Institut.
- Baier und Schlabbach (1976): *Linksabbiegeunfälle an Lichtsignalanlagen in Darmstadt*. Straßenverkehrstechnik, Heft 6, S. 197-204.
- Bald, S. (1991): *Grundlagen für die Anwendung der Risikoanalysen im Straßenwesen*. Dissertation im Fachbereich Wasser und Verkehr der Technischen Hochschule Darmstadt.
- Barrenscheen, J. und Eichhorn, U. (2001): *Mobilität der Zukunft*. Zentrum für Verkehr der Technischen Universität Braunschweig (Hrsg.): Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel: Möglichkeiten, Grenzen, Risiken. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 460. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 3-26.
- Bartelme, N. (1995): *Geoinformatik*. Berlin: Springer.
- Baum, H., Esser, K. und Höhenscheid, K.-J. (1998): *Volkswirtschaftliche Kosten und Nutzen des Verkehrs*. Forschungsarbeiten aus dem Straßen- und Verkehrswesen, Heft 108. Bonn: Kirschbaum.
- Beer, A. und Schmidt, M. (2000): *Funktionale Sicherheit sicherheitsrelevanter Systeme im Kfz*. VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug; Tagung Baden-Baden, 5. und 6. Oktober 2000. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Benda, H. v. (1977): *Die Skalierung der Gefährlichkeit von Verkehrssituationen. I. Teil: Ein Klassifikationschema für Verkehrssituationen aus Fahrersicht*. Forschungsprojekt 7320 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung. München: Technische Universität, Lehrstuhl für Psychologie.
- Benda, H. v. (1983): *Die Häufigkeit von Verkehrssituationen*. Forschungsprojekt 7320 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung. München: Technische Universität, Lehrstuhl für Psychologie.
- Benda, H. v., Hoyos, C. und Schaible-Rapp, A. (1983): *Klassifikation und Gefährlichkeit von Straßenverkehrssituationen*. Bericht zum Forschungsprojekt 7320/2 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung. Bergisch Gladbach.
- Berbuir, A. (1999): *Mobilität, Verkehrsverhalten und Verkehrsunfälle junger Menschen: Ansätze für die Verkehrssicherheitsarbeit von Kommunen und Verkehrsunternehmen*. Schriftenreihe für Verkehr und Technik, Heft 87. Bielefeld: Erich Schmidt.
- Bernotat, R. (1970): *Anthropotechnik in der Fahrzeugführung*. Ergonomics 13, S. 353-377.
- Bertsche, B. und Lechner, G. (1999): *Zuverlässigkeit im Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und Systemzuverlässigkeiten*. Berlin: Springer.
- Bill, R. (1999): *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*. Heidelberg: Wichmann.
- Binfet-Kull, M., Rech, B. und Meyna, A. (2001): *Definition von Sicherheits-/Zuverlässigkeitsanforderungen für Komponenten eines elektronischen Kraftfahrzeugsystems mit Hilfe der Fehlerbaumanalyse am Beispiel eines Steer-by-Wire*. Zentrum für Verkehr der Technischen Universität Braunschweig (Hrsg.): Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel: Möglichkeiten, Grenzen, Risiken. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 460. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 359-385.

- Birolini, A. (1991): *Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- BMVBW (2001): Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: *Verkehr in Zahlen 2001/2002*. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag.
- Braess, H.-H. (1986): *Steuerungen und Regelungen im Kraftfahrzeug - Eine systematische Betrachtung*. VDI-Bericht 612: Elektronik im Kraftfahrzeugbau. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 539-546.
- Braess, H.-H. und Reichart, G. (1989): *Das Automobil im Spannungsfeld zwischen funktionalen Anforderungen, Komplexität, Sicherheit und Zuverlässigkeit*. Automobil-Industrie, Heft 5, S. 579-589.
- Brenner, M., Ziegler, H., Seeling, K. und Kopperschläger, D. (1997): *Sicherheitsrisiken an Lichtsignalanlagen: Untersuchung zu Sicherheitsrisiken an LSA durch den zeit- und/oder verkehrabhängigen Einsatz von mehr als einem Steuerungsverfahren*. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen: Verkehrstechnik, Heft V44. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag.
- Brilon, W. (1997): *Sicherheit von Kreisverkehrsplätzen*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 1, S. 22-28.
- BSI (1999): Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: *IT-Grundschutzhandbuch*. Köln: Bundesanzeiger (<http://www.bsi.bund.de/gshb/>).
- Burrough, P. A. (1986): *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford: Charendon Press.
- Butz, H.-P., Heuser, F. und May, H. (1985): *Reaktorsicherheit*. Peters, O. und Meyna, A. (Hrsg.): Handbuch der Sicherheitstechnik: Sicherheit technischer Anlagen, Komponenten und Systemen (Band 1). München: Hanser, S. 157-236.
- Caspary, W. (1993): *Qualitätsaspekte beim Aufbau von Geo-Informationssystemen*. Zeitschrift für Vermessungswesen 118, Heft 8/9. Stuttgart: Konrad Wittwer, S. 444-449.
- Caspary, W. und Joos, G. (1996): *Ein Qualitätsmanagement für Geobasisdaten*. Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (Hrsg.): Das Geoinformationssystem ATKIS und seine Nutzung in Wirtschaft und Verwaltung. 3. AdV-Symposium ATKIS 29. und 30. Oktober 1996 in Koblenz, S. 169-178.
- Caspary, W. und Joos, G. (1998): *Quality Criteria and Control of GIS Databases*. Kahmen, H. Brückl, E. und Wunderlich, T. (Hrsg.): Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. Symposium at Eisenstadt/Austria, April 20-22, 1998, S. 436-441.
- Clarke, G. und Clark, D. (1995): *Lineage*. Gupta, S. und Morrison (Hrsg.): Elements of Spatial Data Quality. ICA, Elsevier Science, S. 13-30.
- Creifelds, C. (1981): *Rechtswörterbuch*. München: Beck.
- Czommer, R. (2001): *Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken*. Deutsche Geodätische Kommission: Reihe C Dissertation, Heft 535. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaft.
- Czommer, R. und Möhlenbrink, W. (1999): *Multi-Sensor Map Matching Concepts for Positioning of Road and Rail Vehicles*. International Workshop on Mobile Mapping, April 21-23, 1999, Bangkok, S. 4.4.1-4.4.6.
- DGQ 11-04 (1995): *Begriffe zum Qualitätsmanagement*. Berlin: Beuth.
- DIN 25419 (1985): *Ereignisablaufanalyse; Verfahren, graphische Symbole und Auswertung*. Berlin: Beuth.
- DIN 25424-1 (1981): *Fehlerbaumanalyse – Teil 1: Methode und Bildzeichen*. Berlin: Beuth.
- DIN 25424-2 (1990): *Fehlerbaumanalyse – Teil 2: Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes*. Berlin: Beuth.
- DIN 25448 (1990): *Ausfalleffektanalyse (Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluß-Analyse)*. Berlin: Beuth.
- DIN 40041 (1990): *Zuverlässigkeit – Begriffe*. Berlin: Beuth.

- DIN 55350-11 (1995): *Begriffe zu Qualitätsmanagement und Statistik – Teil 11: Begriffe des Qualitätsmanagements*. Berlin: Beuth.
- DIN 55350-17 (1988): *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik – Teil 17: Begriffe der Qualitätsprüfungsarten*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 8402 (1995): *Qualitätsmanagement – Begriffe*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 9000 (2000): *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth.
- DIN ENV 12656 (1999): *Geoinformation – Datenbeschreibung – Qualität*. Berlin: Beuth.
- DIN V 19250 (1994): *Leittechnik – Grundlegende Sicherheitsbetrachtungen für MSR-Schutzeinrichtungen*. Berlin: Beuth.
- DIN VDE 31000-2 (1987): *Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten technischer Erzeugnisse – Teil 2: Begriffe der Sicherheitstechnik – Grundbegriffe*. Berlin: Beuth.
- Donges, E. (1978): *Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenenmodell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 24, S. 98-112.
- Donges, E. (1982): *Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. Automobil-Industrie, Heft 2, S. 183-190.
- Donges, E. und Naab, K. (1996): *Regelsysteme zur Fahrzeugführung und -stabilisierung in der Automobiltechnik*. Automatisierungstechnik, Heft 5, S. 226-236.
- Durth, W. und Bald, S. (1997): *Risikoanalysen im Straßenwesen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 531. Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau.
- Eckert, C. (2001): *IT-Sicherheit: Konzepte, Verfahren, Protokolle*. München: Oldenbourg.
- Ehmanns, D. Wallentowitz, H., Gelau, C. und Nicklisch, F. (2000): *Zukünftige Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung*. Pischinger, S. (Hrsg.): 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik: 4.-6. Oktober 2000. Aachen.
- Erke, H. (1985): *Überprüfung des Ursachenverzeichnisses*. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft 110. Bergisch-Gladbach.
- Erke, H. und Gstalter, H. (1985): *Verkehrskonflikttechnik: Handbuch für die Durchführung und Auswertung von Erhebungen*. Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 52. Bergisch-Gladbach.
- Erke, H. und Wessel, W. (1985): *Verkehrskonfliktbeobachtung in der Verkehrserziehung*. Braunschweig: Technische Universität, Institut für Psychologie.
- Erke, H. und Zimolong, B. (1978): *Verkehrskonflikte im Innerortsbereich: Eine Untersuchung zur Verkehrskonflikt-Technik*. Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 15. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Everts, K. (1992): *Drive-I-Projekt "Driver Information Systems": Ein Handbuch mit Regeln und Spezifikationen für europäische Fahrerinformationssysteme*. Straßenverkehrstechnik, Heft 3, S. 117-127.
- Fank, M. (1996): *Einführung in das Informationsmanagement: Grundlagen, Methoden, Konzepte*. München: Oldenbourg.
- Fastenmeier, W. (1995): *Autofahrer und Verkehrssituation: Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme*. Verlag TÜV Rheinland, Köln.
- FGSV (1974): *Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen*. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- FGSV (1991): *Hinweise zur Methodik der Untersuchung von Straßenverkehrsunfällen*. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

- FGSV (1992): *Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) – Lichtzeichen für den Straßenverkehr*. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- FGSV (2000): *Begriffsbestimmungen Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb*. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- Förster, H.J. (2001): *Das Automobil, ein Lebenselixier für alte Menschen*. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Tagung Berlin, 3. und 4. Mai 2001. VDI-Bericht 1613. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 115-152.
- Frank, D. und Reichart, G. (2000): *Grenzen der Verkehrssicherheit und gesellschaftliche Akzeptanz*. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Sicherheit komplexer Verkehrssysteme. Tagung Königswinter, 25. und 26. Mai 2000. VDI-Bericht 1546. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 3-21.
- Franke, U. (1999): *Aktives Sehen in aktiven Fahrzeugen? Künstliche Intelligenz*, Heft 1, S. 31-32.
- Franke, U., Gavrilu, D., Görzig, S., Lindner, F., Paetzold, F. und Wöhler, C. (1999): *Autonomous Driving approaches Downtown*. IEEE Intelligent Systems, Vol. 13, Nr. 6.
- Fricke, H. und Pierick, K (1990): *Verkehrssicherung*. Stuttgart: Teubner.
- Friedrich, H., Hoffmann, J., Kreft, J., Semmler, C. und Witte, B. (2001): *Auf dem Weg zum intelligenten Auto - Steer-by-Wire als Basis zukünftiger Assistenzfunktionen*. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Tagung Berlin, 3. und 4. Mai 2001. VDI-Bericht 1613. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 277-296.
- Garwin, D. A. (1984): *What does Product Quality Really Mean?*. Sloan Management Review, Fall 1984, S. 25-43.
- Geduld, G. (1997): *Collision Avoidance, Adaptive Cruise Control: Two similar Applications with different Kinds of Philosophy and Safety Impact*. Proceedings on the 4th World Congress on Intelligent Transport Systems, 21-24 October 1997 - ICC Berlin, Germany. Brüssel: ITS.
- Glemser, M. (2000): *Zur Berücksichtigung der geometrischen Objektunsicherheit in der Geoinformatik*. Universität Stuttgart: Online-Publikation.
- Götting, H.-H. (2001): *Automatisiertes Fahren mit Nutzfahrzeugen*. Zentrum für Verkehr der Technischen Universität Braunschweig (Hrsg.): Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel: Möglichkeiten, Grenzen, Risiken. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 460. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 233-262.
- Gstalter, H. (1988): *Transport und Verkehr*. Frey, D., Hoyos, C. Graf und Stahlberg, D.: Angewandte Psychologie – Ein Lehrbuch. Weinheim: Psychologie Verlags Union, S. 317-337.
- Guptill, S. und Morrison, J. (1995): *Elements of Spatial Data Quality*. ICA, Elsevier Science.
- Hacker, W. (1978): *Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie: Psychische Struktur und Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Schriften zur Arbeitspsychologie, Heft 20. Bern: Huber.
- Hamberger, W., Willumeit, H.-P. und Struck, G. (1996): *Navigationsgeräte als Datenbasis für Fahrerassistenzsysteme*. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug. Tagung Baden-Baden, 12. und 13. September 1996. VDI-Bericht 1287. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 381-395.
- Handke, N. (1996): *Kombination von Untersuchungsmethoden bei Sicherheitsanalysen im Straßenverkehr*. Veröffentlichungen des Instituts für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau Universität Hannover, Heft 16.
- Hautzinger, H. (1985): *Genauigkeit der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik*. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Heft 111. Bergisch Gladbach.
- Hautzinger, H. (1993): *Dunkelziffer bei Unfällen mit Personenschaden*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Mensch und Sicherheit, Heft M 13. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag.

- Heinrich, L. (1996): *Informationsmanagement: Planung, Überwachung und Steuerung der Informationsinfrastruktur*. München: Oldenbourg.
- Hilse, H.-G. und Schneider, W. (1995): *Verkehrssicherheit: Handbuch zur Entwicklung von Konzepten*. Stuttgart: Boorberg.
- Himmelstein, G., Siebert, H.-E., Vogel, R. und Hertel, G. (2000): *Sicherheitsphilosophien Straße/Schiene – Unfälle verhindern, Folgen minimieren*. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Sicherheit komplexer Verkehrssysteme. Tagung Königswinter, 25. und 26. Mai 2000. VDI-Bericht 1546. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 79-102.
- HAV (1992): *Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen HAV*. Bonn: Kirschbaum.
- Hipp, E. und Schaller, K.-V. (2001): *Fahrerassistenzsysteme für Nutzfahrzeuge – Stand und Ausblick*. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Tagung Berlin, 3. und 4. Mai 2001. VDI-Bericht 1613. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 49-63.
- Höhenscheid, K.-J. (1999): *Ermittlung der volkswirtschaftlichen Kosten der Personenschäden im Straßenverkehr in Deutschland*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Kosten und Nutzen des Verkehrs. Symposium, 17. und 18. Februar 1998 in Freiburg, S. 71-78.
- Höpcke, W. (1980): *Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung*. Berlin: DeGruyter.
- Hülens, H. (1994): *Unfälle mit Radfahrern*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit. Heft 3, S. 107-113.
- INFRAS/IWW (1995): *Externe Effekte des Verkehrs*. Zürich, Karlsruhe.
- Innenministerium Baden-Württemberg (1996): *Verwaltungsvorschrift – Verkehrsunfall*. Neufassung vom 1.1.1996.
- ISO/TR 14825 (2000): *GDF – Geographic Data Files – Version 4.0*.
- Jensch, M., Spoerer, E. und Utzelmann, H. D. (1978): *Verkehrsverhaltenslehre*. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung Heft 20. Köln.
- Joos, G. (1996): *Qualitätsmanagement von Geo-Daten in Geo-Informationssystemen*. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben „Datenqualität in GIS“ der DFG. München: Institut für Geodäsie.
- Joos, G. (2000): *Zur Qualität von objektstrukturierten Geodaten*. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik der Universität der Bundeswehr München, Heft 66. Neubiberg.
- Juran, J. M. (1974): *Quality Control Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Juran, J. M. (1991): *Handbuch der Qualitätsplanung*. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie.
- Jürgensohn, T. (1997): *Hybride Fahrermodelle*. ZMMS Spektrum Band 4. Sinzheim: Pro Universitate Verlag.
- Kainz, W. (1995): *Logical Consistency*. Guptill, S. und Morrison (Hrsg.): Elements of Spatial Data Quality. ICA, Elsevier Science, S. 109-137.
- Käppler, W.D. und Bernotat, R. (1985): *Wirksystem Fahrer-Fahrzeug-Umwelt*. Rompe, K.: Verkehrssicherheit und Wirksystem Fahrer-Fahrzeug-Umwelt. Köln: TÜV Rheinland, S. 13-44.
- Klebelberg, D. (1982): *Verkehrspsychologie*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Klein, G. und Schweig, K.-H. (1991): *Sicherheitsbewertung von angebauten Hauptverkehrsstraßen mit vier und mehr schmalen Fahrstreifen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 604. Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau.
- König, R. (1995): *Gestaltungskriterien für Telematik-Systeme*. Straßenverkehrstechnik, Heft 2, S. 61-67.
- Kopischke, S. (2000): *Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden*. Berichte aus dem Institut für Elektrische Meßtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik der Technischen Universität Braunschweig, Band 10. Aachen: Mainz.



- Korda, C. (1999): *Quantifizierung von Kriterien für die Bewertung von Verkehrssicherheit mit Hilfe digitalisierter Videobeobachtungen*. Darmstadt: Technische Universität.
- Krüger, K., Küting, H. J. und Entenmann, V. (2001): *Optimierung der Kompetenz älterer Fahrerinnen und Fahrer durch frühzeitige Navigationshinweise und Knotenpunktinformationen*. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Tagung Berlin, 3. und 4. Mai 2001. VDI-Bericht 1613. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 153-189.
- Krupp, R. und Hundhausen, G. (1984): *Volkswirtschaftliche Bewertung von Personenschäden im Straßenverkehr*. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Kuhlmann, A. (1995): *Einführung in die Sicherheitswissenschaft*. Köln: Verlag TÜV Rheinland.
- Landespolizeidirektion Stuttgart II (1997): *Verkehrsunfallstatistik Stuttgart 1996*. Stuttgart: Landespolizeidirektion Stuttgart II – Referat Ib Verkehr.
- Laprie, J. C. (1992): *Dependability: basic concepts and terminology*. Wien: Springer.
- Legat, W. (1988): *PROMETHEUS - aus der Sicht der europäischen Verkehrspolitik*. VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug; Tagung Baden-Baden, 8. und 9. September 1988. VDI-Bericht 687. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 87-96.
- Leutzbach, W. und Papavasiliou, V. (1988): *Wahrnehmungsbedingungen und sicheres Verhalten im Straßenverkehr: Wahrnehmung in konkreten Verkehrssituationen*. Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Heft 177.
- Marburger, E.-A., Klöckner, J. und Stöcker, U. (1990): *Eine erste Abschätzung der möglichen unfallreduzierenden Wirkungen ausgewählter Maßnahmen aus dem PROMETHEUS-Projekt*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 1, S. 43-45.
- Masing, W. (1986): *Sicherheit als Qualitätsmerkmal*. Peters, O. und Meyna, A. (Hrsg.): Handbuch der Sicherheitstechnik. Band 2: Qualität, Recht, Ökonomie, Management, Human-/Sozial-Sicherheitswissenschaften, Personen- und Objektschutz, Rettungswesen, Umweltschutz, Datenschutz, Dokumentation und Information. München: Hanser.
- Meckelburg, H.J. (1989): *Methodische Entwicklung sicherheitsbezogener Mikrocomputer-Anwendungen im Kfz*. VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik: Sicherheit und Zuverlässigkeit von Kfz-Elektroniksystemen. Tagung Wolfsburg, 29. und 30. Okt. 1989. VDI-Bericht 780. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 19-33.
- Mensebach, W. (1970): *Unfallziffern typischer innerstädtischer Knotenpunkte*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 1, S. 3-21.
- Mensebach, W. (1994): *Straßenverkehrstechnik*. Düsseldorf: Werner.
- Metzler, H.G. (1998): *Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung*. Willumeit, H.-P., Kolrep, H. (Hrsg.): Wohin führen Unterstützungssysteme? Gestaltungshilfe und Assistenz in Mensch-Maschine-Systemen. ZMMS-Spektrum 5. Sinzheim: Pro Universitate Verlag, S. 206-225.
- Metzler, H.G., Grove, H.W., Mehren, H. und Zag, W (1988): *PROMETHEUS - Forschungskonzepte für Sensoren, Aktoren, Informations- und Regelsysteme sowie Systemarchitektur*. VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug. VDI-Bericht 687. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 61-85.
- Meyna, A. (1982): *Einführung in die Sicherheitstheorie: Sicherheitstechnische Analyseverfahren*. München: Hanser.
- Meyna, A. (1994): *Zuverlässigkeitsbewertung zukunftsorientierter Technologien*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
- Minderhoud, M. und Bovy, P. (1997): *Functional Categorisation of Intelligent Vehicles*. Proceedings on the 4th World Congress on Intelligent Transport Systems, 21-24 October 1997 - ICC Berlin, Germany. Brüssel: ITS.

- Mock-Hecker, R., Koch, K.-H., Zeller, M., Rösner, D., Kollbach, D. und Bartholomäi, G. (1992): *ISYS – Ein wissensbasiertes Simulationssystem zur Entwicklung und zum Test intelligenter Fahrerassistenzsysteme*. VDI-Bericht 948: Das Mensch-Maschine-System im Verkehr. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 175-188.
- Möhlenbrink, W. (1989): *Task Force European Digital Road Map*. DGON: Land Vehicle Navigation, 2. Internationales Symposium in Münster, 4.-7. Juli 1989. Köln: Verlag TÜV Rheinland, S. 403-417.
- Müller, P., Stete, G. und Topp, H. (1983): *Stadterneuerung und Verkehrssicherheit*.
- Naab, K. (1998): *ACC in Ballungsräumen*. Pischinger, S. (Hrsg.): 7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik: 5.-7. Oktober 1998. Aachen.
- Neukirchner, E.P. (1996): *Dynamisierung von autonomen Zielführungssystemen mittels aktueller Verkehrsmeldungen*. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug. Tagung Baden-Baden, 12. und 13. September 1996. VDI-Bericht 1287. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 495-502.
- Nirschl, G. und Kopf, M. (1998): *Untersuchung des Zusammenwirkens zwischen dem Fahrer und einem ACC-System in Grenzsituationen*. Willumeit, H.-P., Kolrep, H. (Hrsg.): Wohin führen Unterstützungssysteme? Gestaltungshilfe und Assistenz in Mensch-Maschine-Systemen. ZMMS-Spektrum 5. Sinzheim: Pro Universitate Verlag, S. 169-181.
- Nix, H. G. (1984): *Zuverlässigkeit – Verfügbarkeit – Sicherheit?* Regelungstechnische Praxis, Heft 8, S. 339-341.
- O'Connor, P. (1990): *Zuverlässigkeitstechnik: Grundlagen und Anwendungen*. Weinheim: VCH.
- Oberliesen, R. (1982): *Information, Daten und Signale: Geschichte technischer Informationsverarbeitung*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag.
- Oess, A. (1989): *Total quality management: Die Praxis des Qualitäts-Managements*. Wiesbaden: Gabler.
- Oppliger, R. (1997): *IT-Sicherheit: Grundlagen und Umsetzungen in der Praxis*. Braunschweig: Vieweg.
- Panik, F. (1987): *Automobiltechnik als Korrektiv menschlichen Unvermögens?* Philipp, P. (Hrsg.): Perspektiven der Verkehrssicherheitsarbeit: Stand, Spannungsfeld, Rahmenbedingungen, Zukunftsaspekte. Schriftenreihe der Daimler-Benz AG: Report 8. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 19-28.
- Pauen-Höppner, U. und Höppner, M. (1984): *Eine zellenbezogene Analyse der Verkehrsunfälle in Berlin*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 1, S. 17-26.
- Peleska, J. (1992): *Formale Methoden beim Entwurf ausfallsicherer verteilter Systeme*. Lippold, H. und Schmitz, P. (Hrsg.): Sicherheit in netzgestützten Informationssystemen: Proceedings des BIFOA-Kongresses SECUNET '92. Braunschweig: Vieweg, S. 293-307.
- Pelzer, H. (1985): *Geodätische Netze in der Landes- und Ingenieurvermessung II*. Stuttgart: Wittwer.
- Petzel, E. (1996): *Management der Informationssicherheit*. Weiden: Eurotrans-Verlag.
- Pilz, W.-D. (2000): *Effizientes Gesamtkonzept zur sicherheitsgerechten Gestaltung komplexer Systeme*. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Sicherheit komplexer Verkehrssysteme. Tagung Königswinter, 25. und 26. Mai 2000. VDI-Bericht 1546. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 23-52.
- Pfundt, K., Meewes, V. und Maier, R. (1986): *Einige Bemerkungen zur Verkehrskonflikttechnik*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 32, Heft 1, S. 39-46.
- PLANCO (1990): *Externe Kosten des Verkehrs: Schiene, Straße, Binnenschifffahrt*. Essen.
- Prätorius, G. (1992): *Das PROMETHEUS-Projekt: Technikentstehung als sozialer Prozess*. Wiesbaden: Gabler.
- Pucher, R. und Pelka, R. (1981): *Unfallraten typischer Bewegungsvorgänge an Straßenknoten*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 346. Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau.

- Rasmussen, J. (1983): *Skills, Rules and Knowledge; Signals, Signs and Symbols and Other Distinctions in Human Performance Models*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol. SMC-13, Heft 3, S. 257-266.
- Reichart, G. (1996): *Einsatz der Telekommunikation für fahrerunterstützende Systeme*. Siegle, G.: Telematik im Verkehr. Heidelberg: v. Decker, S. 193-206.
- Reichart, G. und Hipp, E. (2000): *MoTiV – Fahrerassistenzsysteme*. Ankelin, N. (Red.): Mobilitätsforschung für das 21. Jahrhundert: Verkehrsprobleme und Lösungsansätze. Köln: TÜV Energie und Umwelt, PT MVBW, S. 85-107.
- Reichart, G. (2001): *Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22 Nr. 7. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Reinhart, G., Lindemann, U. und Heinzl, J. (1996): *Qualitätsmanagement*. Berlin: Springer.
- Reissmann, G. (1980): *Die Ausgleichsrechnung: Grundlagen und Anwendungen in der Geodäsie*. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- Reister, D., Hamm, E., Panik, F und Zimdahl, W. (1988): *PROMETHEUS - Ansätze zur umfassenden Informationsfluss-Gestaltung auf allen Ebenen des Straßenverkehrs*. VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug. VDI-Bericht 687. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 1-23.
- Reiter, W. (1992): *Modellierung des Einflusses von Informationssystemen auf das Fahrerverhalten*. VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug. VDI-Bericht 948. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 189-210.
- Rühle, R. (1996): *Alternde Menschen als Verkehrsteilnehmer*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 2, S. 52-61.
- Schamberger, S. (1992): *Informationssicherheit – eine organisatorische Herausforderung*. IO Management Zeitschrift, Heft 4, S. 34-37.
- Schlott, S. (1997): *Fahrzeugnavigation: Routenplanung, Positionsbestimmung, Zielführung*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie.
- Schnabel, W. und Lohse, D. (1997): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- Schneeweiss, W. (1992): *Zuverlässigkeitstechnik – von den Komponenten zum System*. Köln: Datakontext.
- Schneider, H. (1996): *Standards in Telematik*. Siegle, G. (Hrsg.): Telematik im Verkehr. Heidelberg: v. Decker, S. 105-121.
- Schnüll, R. und Richter, T. (1994): *Sicherheitsvergleich der Knotenpunktgrundformen Kreuzung und Rechtsversatz an Straßen außerhalb bebauter Gebiete*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 683. Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau.
- Schraut, M. (2000): *Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen*. Technische Universität München: Online-Publikation.
- Siegener, W. und Lenhart, W. (1986): *Analyse von Unfalldunkelziffern*. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Heft 134. Bergisch Gladbach.
- Stall, E. (1986): *Konzepte für sichere Elektronik in Kraftfahrzeugen*. Automobil-Industrie, Heft 6, S. 779-785.
- Stanek, H., Smith, N. und Giordano, A. (1995): *Modellierung und Normierung von Datenqualität in GIS*. Dollinger, F. und Strobl, J. (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung VII. Beiträge zum GIS-Symposium vom 5.-7. Juli 1995 in Salzburg. Salzburger Geographische Materialien, Heft 22. Selbstverlag des Instituts für Geographie der Universität Salzburg, S. 265-274.
- Sturm, P. (1989): *Verkehrssicherheit an plangleichen und teilweise planfreien Knotenpunkten von Außerortsstraßen*. Darmstadt: Technische Universität.

- Theis, I. (2000): *By-Wire-Systeme im Kraftfahrzeug – Analyse der menschlichen Handlungszuverlässigkeit*. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Sicherheit komplexer Verkehrssysteme. Tagung Königswinter, 25. und 26. Mai 2000. VDI-Bericht 1546. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 259-264.
- Topp, H. (1986): *Probleme und Lösungsansätze bei städtischen Hauptstraßen*. Straße und Autobahn 32, Heft 8, S. 357-364.
- Trier, H. (1990): *Methode zur Planung von Systemsicherheit beim Einsatz von Elektronik im Kraftfahrzeug*. Automobil-Industrie, Heft 1, S. 65-72.
- Uebing, D. (1981): *Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Kraftwerkssystemen*. VDI-Gesellschaft: Technische Zuverlässigkeit – ihre Verwirklichung unter den Bedingungen der Zukunft. VDI-Bericht 395. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 135-138.
- UPI (1991): *Umweltwirkungen von Finanzinstrumenten im Verkehrsbereich*. Heidelberg.
- Vahl, A. (1998): *Interaktive Zuverlässigkeitsanalyse von Flugzeug-Systemarchitekturen*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 10 Nr. 565. Düsseldorf: VDI Verlag.
- VDI 4001-2 (1986): *Begriffsbestimmungen zum Gebrauch des VDI-Handbuches Technische Zuverlässigkeit*. Berlin: Beuth.
- VDI 4003-2 (1986): *Allgemeine Forderungen an ein Sicherungsprogramm, Klasse A; Funktionszuverlässigkeit*. Berlin: Beuth.
- VDI 4008-1 (1998): *Voraussetzungen und Anwendungsschwerpunkte von Zuverlässigkeitsanalysen*. Berlin: Beuth.
- VDI 4008-2 (1998): *Boolesches Modell*. Berlin: Beuth.
- VDI 4008-3 (1997): *Markoff-Zustandsänderungsmodelle mit endlichen Zuständen*. Berlin: Beuth.
- VDI 4008-5 (1986): *Zustandsflussdiagramm*. Berlin: Beuth.
- VDI 4008-6 (1985): *Monte-Carlo-Simulation*. Berlin: Beuth.
- VDI 4008-7 (1986): *Strukturfunktion und ihre Anwendung*. Berlin: Beuth.
- VDI 4008-8 (1984): *Erneuerungsprozesse*. Berlin: Beuth.
- VDI/VDE 3542 (1988): *Sicherheitstechnische Begriffe für Automatisierungssysteme*. Düsseldorf: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik.
- VDI/VDE 3542-4 (2000): *Sicherheitstechnische Begriffe für Automatisierungssysteme - Zuverlässigkeit und Sicherheit komplexer Systeme*. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik.
- Voß, H. (1994): *Zur Verkehrssicherheit innerörtlicher Knotenpunkte*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 2, S. 68-72.
- Voßbein, R. (1995): *Organisation sicherer Informationssysteme: Konzepte und Lösungen*. München: Oldenbourg.
- Voy, C. (1984): *Leit- und Informationssysteme im Kraftfahrzeug - Ein Beitrag zur Verbesserung des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit*. Harder, G.: Verkehrssicherheit und Verkehrsberuhigung in der Verkehrs-, Stadt- und Umweltplanung. Reihe Gemeinde, Stadt, Land, Heft 10. Hemmingen, S. 25-35.
- Voy, C., Hamm, L., Panik, F und Reister, D. (1986): *Prometheus, ein europäisches Forschungsprojekt zur Gestaltung des Straßenverkehrs der Zukunft*. VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik: Elektronik im Kraftfahrzeugbau. VDI-Bericht 612. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 1-13.
- Weigelt, H und Weiß, H. (1972): *Bewegung - Transport - Verkehr. Ein Beitrag zur Systemforschung im Verkehr*. ite-Mitteilungen 11. Hamburg. S. 301-306.
- Weilkes, M. (2000): *Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation*. Schriftenreihe Automobiltechnik 46. Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen.

- Wilke, T. (1995): *Qualitätsaspekte bei der Nutzung von Geo-Informationssystemen*. Buziek, G. (Hrsg.): GIS in Forschung und Praxis. Stuttgart: Wittwer, S. 141-154.
- Wiltshko, T. (2001): *Ein Qualitätsmodell für Informationen – Zur Beschreibung der Informationsqualität infrastrukturgestützter Fahrerassistenzsysteme*. DGON: Mobilität und Sicherheit. Tagungsband zur DGON Jahreshauptveranstaltung 2001, S. 185-195.
- Wittmann, W. (1959): *Unternehmung und unvollkommene Information*. Köln: Westdt. Verlag.
- Wojcicki, M. (1991): *Sichere Netze: Analyse, Maßnahmen, Koordination*. München: Hanser.
- Worsey, G. (1985): *Predicting Urban Accident Rates from Road and Traffic Characteristics*. ITE Journal Nr. 12, S. 37-40.
- Wu, Z. (1992): *Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen*. Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente, Nr. 45. Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Zackor, H. (1995): *Leitstrategien für Telematik-Anwendungen im Straßenverkehr*. Straßenverkehrstechnik, Heft 2, S. 57-60.
- Zackor, H. (1999): *Informationsstrategien für Telematikanwendungen im Straßenverkehr*. Straßenverkehrstechnik, Heft 4, S. 153-158.
- Zibuschka (1980): *Linksabbiegeunfälle an signalgeregelten Kreuzungen*. Straßenverkehrstechnik, Heft 3, S. 101-103.
- Zimdahl, W., Thomas, J., Schüssler, R., Häussermann, P. und Bommas, G. (1988): *PROMETHEUS – Forschungskonzepte der Fahrzeug-Fahrzeug und Fahrzeug-Strecke-Kommunikation*. VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug; Tagung Baden-Baden, 8. und 9. September 1988. VDI-Bericht 687. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 495-510.
- Zimolong, B., Erke, H. und Gstalter, H. (1978): *Feststellung und Bewertung von gefährlichen Konfliktsituationen im Innerortsverkehr: Die Verkehrskonflikttechnik als Instrument zur quantitativen Kennzeichnung von Verkehrsanlagen: Validierungsstudie im Knoteninnenbereich*. Bericht zum Forschungsprojekt 7615/2 für die Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch-Gladbach.
- Zimolong, B., Schwertfeger, W. und Erke, H. (1977): *Erhebung von Verkehrskonflikten an Knotenzufahrten*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 2, S. 51-58.