

Integration von Geoinformation und Geodaten-gestützter Positionsbestimmung in Rechnergestützte Betriebsleitsysteme des öffentlichen Personennahverkehrs

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

vorgelegt von

Roland Bettermann

aus Riedheim, Kreis Konstanz

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. W. Möhlenbrink
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. U. Martin

Tag der mündlichen Prüfung : 01.06.2006

Institut für Anwendungen
der Geodäsie im Bauwesen
Universität Stuttgart

2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Gliederung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzungen	2
1.3	Einordnung der Arbeit in den wissenschaftlichen Kontext und Stand der Technik ...	3
1.3.1	<i>Stand der Technik</i>	3
1.3.2	<i>Personennahverkehr in der Region (PNV)</i>	3
1.3.3	<i>Das Projekt RUDY</i>	3
1.4	Inhaltliche Übersicht	4
2	Begriffe und Definitionen	6
2.1	ÖPNV-Grundlagen	6
2.1.1	<i>RBL-Entwicklung mit Geodaten</i>	6
2.1.2	<i>ÖPNV-Organisation</i>	7
2.1.3	<i>Begriffe</i>	8
2.2	Georeferenz	10
2.3	Geoinformation	14
2.3.1	<i>Open GIS Entwicklung in der Geoinformatik</i>	14
2.3.2	<i>Georeferenzierungstechniken von Verkehrsnetzen des öffentlichen Verkehrs</i> .	14
2.3.3	<i>Begriffe</i>	15
2.4	Positionsbestimmung	15
2.4.1	<i>Übersicht zur Geodaten-gestützten Positionsbestimmung</i>	15
2.4.2	<i>Begriffe</i>	16
2.5	Objektdefinitionen für den ÖPNV	19
2.6	Positionsbestimmung im ÖPNV	21
3	Funktionsanalyse eines RBL und GeorBL-Realisierung	24
3.1	Anwendungs- und Anforderungsbeschreibung	24
3.1.1	<i>Anwendungsszenarien</i>	24
3.1.2	<i>Anwendungen mit Geodaten im ÖPNV und Anforderung an die Geodaten</i>	30
3.2	Funktionsanalyse	32
3.2.1	<i>Funktionenbaum</i>	32
3.2.2	<i>Elementarfunktionen</i>	34
3.2.3	<i>Verbesserungspotenzial der RBL-Stammfunktionen</i>	37
3.2.4	<i>Zusammenfassung Verbesserungspotenzial</i>	42
3.3	Praxistest: Prototypisches GeorBL für die Routenflexible Disposition	42
3.3.1	<i>Systemdesign</i>	42
3.3.2	<i>Durchführung</i>	44
3.3.3	<i>Bewertung hinsichtlich der Elementarfunktionen</i>	45
3.3.4	<i>Zusammenfassung</i>	47
4	Datenstrukturen im GeorBL	49
4.1	Existierende Geodaten-Strukturen	49
4.1.1	<i>Datenmodelle von Verkehrsstrassen</i>	49
4.1.2	<i>Datenmodelle im ÖPNV</i>	52
4.2	Datenstruktur des Prototyps des GeorBL	56
4.2.1	<i>Datenmodell</i>	56
4.2.2	<i>ÖPNV-Daten-Import</i>	57
5	Geodaten-Bereitstellung für ein prototypisches GeorBL	59
5.1	Geodatenimport aus einem Fahrgastinformationssystem	59
5.1.1	<i>Grundkarte</i>	59
5.1.2	<i>ÖPNV-Objekte</i>	60
5.1.3	<i>Fahrplan</i>	60
5.1.4	<i>Datenanpassung</i>	60

5.2	Analyse der importierten Daten.....	61
5.3	Datenaufbereitung und Neuerfassen von Geodaten für die GeoRBL.....	62
5.3.1	<i>Haltepunkte</i>	63
5.3.2	<i>Haltepunktverbindungen und Reisezeitmatrix</i>	64
5.4	Bewertung der vorliegenden Geodaten und deren Struktur.....	67
5.4.1	<i>Bewertung der Geodaten-Bereitstellung</i>	67
5.4.2	<i>Geodateninfrastruktur im ÖPNV</i>	68
6	Integration der Positionsbestimmungskomponente eines Navigationssystems ins GeoRBL.....	71
6.1	Untersuchung Verfügbarkeit der Position.....	72
6.1.1	<i>Methodik / Messung</i>	72
6.1.2	<i>Ergebnis</i>	72
6.1.3	<i>Bewertung</i>	73
6.2	Untersuchung zur Querabweichung.....	73
6.2.1	<i>Datengrundlage und Auswertestrategie</i>	73
6.2.2	<i>Ergebnis</i>	73
6.2.3	<i>Systematische Abweichungen</i>	74
6.3	Untersuchung Längsgenauigkeit.....	75
6.3.1	<i>Methodik</i>	75
6.3.2	<i>Versuchsaufbauten / Messung</i>	75
6.3.3	<i>Ergebnisse</i>	76
6.3.4	<i>Bewertung</i>	76
6.4	Praxistest für LSA-Beeinflussung und Machbarkeitsbewertung.....	77
7	Geodaten-gestützte Positionsbestimmung.....	78
7.1	Verfahrensbeschreibung.....	78
7.2	Geodaten-gestützte Positionsbestimmung auf der Schiene.....	79
7.2.1	<i>Überblick</i>	79
7.2.2	<i>Untersuchung zur Wiederholungsgenauigkeit</i>	88
7.2.3	<i>Zusammenfassung</i>	94
7.3	Geodaten-basierte Positionsbestimmung auf der Straße.....	94
7.3.1	<i>Zielsetzung</i>	94
7.3.2	<i>Methodik</i>	95
7.3.3	<i>Messaufbau</i>	96
7.3.4	<i>Messung</i>	97
7.3.5	<i>Auswertung</i>	97
7.3.6	<i>Zusammenfassung</i>	103
8	Schlussfolgerung und Ausblick.....	104
8.1	Schlussfolgerung.....	104
8.1.1	<i>Integration von Geodaten ins RBL</i>	104
8.1.2	<i>Geodaten-gestützte Positionsbestimmung</i>	104
8.2	Ausblick.....	105
8.2.1	<i>Geodaten-gestützte Positionsbestimmung</i>	105
8.2.2	<i>Motivation zur kooperativen Datennutzung in einer Verkehrsregion</i>	105
8.2.3	<i>Erweiterung VDV453</i>	105
8.2.4	<i>Ausbau des Bordrechners</i>	106

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Themenübersicht des Projektes RUDY (RUDY 2005)	4
Abbildung 1-2: Kapitelübersicht.....	5
Abbildung 2-1: Spannungsfeld zwischen Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen (BRACHER ET AL. 2004)....	7
Abbildung 2-2: Übersicht Definition eines Koordinaten-Bezugssystems	11
Abbildung 2-3: Übergeordnetes Koordinaten-Bezugssystem.....	11
Abbildung 2-4: Aktive und passive Landmarken	13
Abbildung 2-5: Übersicht der Positionsbestimmungsverfahren	16
Abbildung 2-6: Geodaten-gestützte Positionsbestimmung zur Bestimmung der Netzposition.....	18
Abbildung 2-7: Physikalische und Logische Ortung (nach VDV 2001)	21
Abbildung 3-1: Störfallstatistik (nach TRITSCHLER ET AL. 2005).....	25
Abbildung 3-2: Störfall-Szenario mit Umleitungsmaßnahme	25
Abbildung 3-3: Übersicht über Bedarfsverkehr-Projekte (nach: Kieslich 2004)	27
Abbildung 3-4: Fortsetzung eines Linienverkehrs als „Flexible Bedienungsform“ auf Vorzugsstraßennetz	29
Abbildung 3-5: Anmeldepunkte einer ÖPNV-Beschleunigung.....	30
Abbildung 3-6: Elemente eines Funktionenbaums	32
Abbildung 3-7: Funktionalitäten einer RBL-Zentrale (BETTERMANN UND KAUFMANN 2002).....	33
Abbildung 3-8: Schema eines Funktionenbaums mit Elementarfunktionen aus anderem System.....	34
Abbildung 3-9: Beispielhafte Darstellung einer schematischen Liniendarstellung in einem RBL	35
Abbildung 3-10: Exemplarische Fahrzeuganzeige auf der Basis einer Rasterkarte.....	36
Abbildung 3-11: Systemarchitektur des GeoRBL (nach TRITSCHLER UND DOBESCHINSKY 2004).....	43
Abbildung 4-1: Historie des GDF (nach VANESSEN 2002).....	50
Abbildung 4-2: Orte und Strecken des VDV-Datenmodells (nach VDV 1996)	52
Abbildung 4-3: Dienstlandschaft nach VDV453 und VDV454 (HENNINGER ET AL. 2003).....	53
Abbildung 4-4: Datenmodell für den öffentlichen Verkehr in GDF (ISO 14825 (2002)).....	54
Abbildung 4-5: ÖV-Netz Darstellung des Open.P-Datenmodells (FRIEDRICH UND PRUNDEL 2000).....	55
Abbildung 4-6: Datenmodell des FGI-Systems EFA-DIVA (nach STARK, TORLACH 2003)	55
Abbildung 4-7: Transformation von Netzdaten in Punktfolgen.....	57
Abbildung 4-8: Beispiel XML-Austauschformat Haltestelle ohne Haltebereiche und –punkte	58
Abbildung 4-9: Objektbezogene Referenz der Haltestellen und Teilstrecken	58
Abbildung 5-1: Geodatenzufluss zum GeoRBL im Projekt RUDY	59
Abbildung 5-2: Differenzen zwischen Haltepunktkoordinaten.....	61
Abbildung 5-3: Koordinatenangaben an einem Haltepunkt	62
Abbildung 5-4: Bedienbildschirm des Erfassungssystems (Simulation).....	63
Abbildung 5-5: Vorzugsstraßennetz im Gebiet Ulm-Nord (Kartenhintergrund: DING 2003)	65
Abbildung 5-6: Skizze abgeschnittener Netzteile durch Vorgabe der Abfahrtsrichtung.....	66
Abbildung 5-7: Ablaufdiagramm der Reisezeitmatrixbestimmung	66
Abbildung 5-8: Schematische Darstellung des Vorzugsstraßennetzes.....	67
Abbildung 6-1: Navigationssystem, Auslesen zweier Protokolle mit Kartenanzeige und Zielführung.....	72
Abbildung 6-2: Besonderheiten der Positionsbestimmung mit einem Navigationssystem.....	74
Abbildung 6-3: Längsansicht und Querschnitt des Messbereichs eines Lichtschrankensensors (HOLST 2004) ..	75
Abbildung 6-4: Skizze des Messaufbaus.....	76
Abbildung 7-1: Grundidee der positionsabhängigen Geodaten-gestützten Positionsbestimmung.....	78
Abbildung 7-2: Messstrecke der U9 in Stuttgart.....	80
Abbildung 7-3: Planungsunterlagen zur Ermittlung der Referenzkrümmung (WÖRNER 2000).....	82
Abbildung 7-4: Koordinatenbezugssysteme beim Messvorgang (FIRCHAU 2002).....	82
Abbildung 7-5: Richtungswinkeländerungen als Indikatoren des Krümmungswechslers (FIRCHAU 2002).....	83
Abbildung 7-6: Veränderungen der Soll-Krümmung durch den Stadtbahnaufbau	83
Abbildung 7-7: Messanordnung der INS-Plattform.....	84
Abbildung 7-8: „Messaufbau“ zur Ermittlung der Haltegenauigkeit (perspektivisch).....	85
Abbildung 7-9: Gemessenes Krümmungsband mit Soll-Krümmung (BETTERMANN 2001).....	86
Abbildung 7-10: Detail eines gemessenen Krümmungsbandes mit Soll-Krümmung (BETTERMANN 2001)	86
Abbildung 7-11: Beispiel mit hoher Anzahl von signifikanten Kurvenradien.....	87
Abbildung 7-12: Änderungen einer Position durch die Verlängerung der ausgewerteten Strecke	87
Abbildung 7-13: Koppelspule (WEBER 2002).....	88
Abbildung 7-14: Konzeptioneller Aufbau des Messsystems (WEBER 2002).....	89
Abbildung 7-15: Kalibrierung der Kreisel mit Industrieroboter (WEBER 2002).....	89
Abbildung 7-16: An der Stadtbahn montierter Korrelationsgeschwindigkeitsmesser (WEBER 2002)	90
Abbildung 7-17: Maßstabsvariation des Stadtbahnsignals vs. Korrelationsgeschwindigkeitsmesser	91
Abbildung 7-18: Vergleich der Positionen von drei Messfahrten zwischen Hedelfingen und Botnang.....	92

Abbildung 7-19: Genauigkeiten an Haltepunkten (nach WEBER 2002).....	92
Abbildung 7-20: Genauigkeiten an Koppelpulen (WEBER 2002).....	93
Abbildung 7-21: Genauigkeiten an Lichtschranken (WEBER 2002).....	93
Abbildung 7-22: Soll- Krümmungsband mit Messwerten der Linie U9.....	93
Abbildung 7-23: Funktionsprinzip der Ermittlung von Profilkonstanten	95
Abbildung 7-24: Montage der Entfernungsmessungssensoren am Heck des Fahrzeugs.....	96
Abbildung 7-25: Zusammenhang zwischen Tastrate, Größe der Profilkonstanten und Geschwindigkeit.....	96
Abbildung 7-26: Ausschnitt aus dem Referenzdatensatz (MAIER 2003).....	97
Abbildung 7-27: Montierter Beschleunigungsmesser mit Kreisel	98
Abbildung 7-28: Signal des Beschleunigungsmessers über den gesamten Streckenverlauf aller Fahrten.....	98
Abbildung 7-29: Detailansichten der Beschleunigungsprofile	98
Abbildung 7-30: Ultraschallsensor	99
Abbildung 7-31: Signalstruktur des Ultraschallsensors	99
Abbildung 7-32: Prinzip LTE (nach SCHNELL 1991).....	99
Abbildung 7-33: Bild LTE	100
Abbildung 7-34: Signalstruktur des Lasertriangulationsentfernungsmessers	100
Abbildung 7-35: Signalstruktur nach der Objektbildung	100
Abbildung 7-36: Übersicht der Profilmessung	101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Elementarfunktionen in traditionellem RBL und GeoRBL.....	6
Tabelle 3-1: Theoretisch abgeleitetes Verbesserungspotenzial einer GeoRBL	42
Tabelle 3-2: Module und Stammfunktionen mit Elementarfunktion Georeferenz beim Datenaustausch.....	45
Tabelle 3-3: Module und Stammfunktionen mit Elementarfunktion Visualisierung	46
Tabelle 3-4: Module und Stammfunktionen mit Elementarfunktion Routing	46
Tabelle 3-5: Module und Stammfunktionen mit Elementarfunktion Geodaten-gestützte Positionsbestimmung..	47
Tabelle 3-6: Bewertung der prototypisch umgesetzten Elementarfunktionen in den Modulen	48
Tabelle 3-7: Vergleich der prototypisch umgesetzten Elementarfunktionen in den Modulen	48
Tabelle 6-1: Klassifikation der Positionsgenauigkeit.....	71
Tabelle 6-2: Übersicht der Abschnitte der Teststrecke.....	73
Tabelle 6-3: Übersicht zur Quergenauigkeit der Positionsbestimmung	74
Tabelle 6-4: Ermittlung der Lagegenauigkeit eines Navigationssystems	76
Tabelle 7-1: Stationen der Haltepunkte.....	80
Tabelle 7-2: Variablenbezeichnung zur Gleichung 7-2.....	81
Tabelle 7-3: Beobachtungsdaten und deren Differenzen.....	85
Tabelle 7-4: Ergebnisse der Kreisel-Kalibrierung (WEBER 2002).....	90
Tabelle 7-5: Messwerte zu erkannten Objekten im Bereich der Ampeln	102
Tabelle 7-6: Messwerte zu erkannten Objekten im Bereich der Baumreihe.....	102

Abkürzungsverzeichnis

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems	KS	Koordinaten-System
AND	Allgemeiner Nachrichtendienst (VDV 453)	LSA	Lichtsignalanlage
ANS	Anschlussicherung (Prozessdatendienst VDV 453)	LTE	Lasertriangulationsentfernungsmesser
AUS	Fahrplanauskunft (Prozessdatendienst VDV 454)	MIF	MapInfo Format
BM	Beschleunigungsmesser	MOBILIST	Mobilität im Ballungsraum Stuttgart
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	OGC	Open GIS Consortium
CEN	Comité Européen de Normalisation	ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
DING	Donau Iller Nahverkehrsgesellschaft	PDA	Personal Digital Assistant
DIVA	Dialoggesteuertes Verkehrsmanagement- und Auskunftssystem	PNV	Personennahverkehr in der Region Forschungsinitiative des BMBF
DFI	(Dynamische) Fahrgastinformation (Prozessdatendienst VDV 453)	RBL	Rechnergestütztes Betriebsleitsystem
DGPS	Differentielles Globales Positionierungssystem	REF ANS	Referenz Anschlussicherung (Referenzdatendienst VDV 453)
DynInfo	Dynamische Fahrgastinformation / Modul des GeoRBL	REF AUS	Referenz Fahrplanauskunft (Referenzdatendienst VDV 454)
EFA	Elektronische Fahrplanauskunft	REF DFI	Referenz Fahrgastinformation (Referenzdatendienst VDV 453)
ETRS	European Terrestrial Reference System	RTK	Real Time Kinematik Differenzielles Beobachtungsverfahren mit GPS-Empfängern (online)
FGI	Fahrgastinformation	RUDY	Projekt im Rahmen des PNV: Regionale unternehmensübergreifende und dynamische Vernetzung von Auskunfts-, Betriebsleit- und Planungssystemen im ÖPNV und Taxi-gewerbe
FlexiDispo	Flexible Disposition / Modul des GeoRBL, das aus Kundennachfragen eine bedarfsgerechte Trajektorie eines Busses ermittelt	SPNV	Schienengebundener Personennahverkehr
GDF	Geographic Data File	SSB	Stuttgarter Straßenbahnen AG
GDI	Geodateninfrastruktur	SWU	Stadtwerke ULM Im Kontext dieser Arbeit stets der Geschäftsbereich Verkehr
GeoDispo	Geodaten-gestützte Disposition / Modul des GeoRBL	TF EDRM	Task Force European Digital Road Map
GeoRBL	Geodatenbasiertes Rechnergestütztes Betriebsleitsystem	UMTS	Universal Mobile Telekommunikation System
GIS	Geoinformationssystem	US	Ultraschallsensor
GML	Geographic Markup Language	VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
GPRS	General Packet Radio Service	VIS	Visualisierung (Prozessdatendienst VDV 453)
GPS	Global Positioning System Verfahren zur Positionsbestimmung mittels Satellitensignalen	VME	Versa Module Eurocard
HP	Haltepunkt	WEB	
HS	Haltestelle	WGS	World Geodetic System
IAGB	Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen	W-LAN	Wireless Local Area Network
ISO	International Standardisation Organisation	XML	Extensible Markup Language
ITRS	International Terrestrial Reference System	ZUPT	Zero Velocity Update Point
IuK	Information und Kommunikation		
KBS	Koordinaten-Bezugssystem		
KFZ	Kraftfahrzeug		

Zusammenfassung

Diese Abhandlung geht davon aus, dass die Datengrundlage eines RBL mit einem georeferenzierten Verkehrsnetz erweitert wird und somit die Grundlage für eine technologische Weiterentwicklung gelegt wird. Das Innovationspotenzial durch die Integration einiger Funktionen, die auf Geodaten basieren, und Geodaten-gestützter Positionsbestimmung in Rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL) des Öffentlichen Personennahverkehrs wird aufgezeigt und mittels prototypischer Systemaufbauten, sowohl zentralen- als auch fahrzeugseitig, verifiziert.

Die Ausgangsszenarien der Untersuchung sind das Störfallmanagement, flexible Bedienungsformen sowie das Priorisieren von Bussen an Lichtsignalanlagen. Fahrzeugseitig sind hinreichend genaue Geodaten-gestützte Positionsbestimmungsverfahren Gegenstand der Betrachtung.

Die zentralenseitigen Untersuchungen zeigen:

- Eine signifikante Verbesserung durch die Geodatenintegration ist zu erwarten, wenn das RBL eine Funktionserweiterung über den Linienverkehr hinaus erfährt.
- Der Aufbau einer Geodateninfrastruktur (GDI) ist ein wirtschaftlich kritischer Faktor, insbesondere wenn die GDI ausschließlich von Seiten des operativen Betriebes eines Verkehrsunternehmens genutzt wird.

Die fahrzeugseitigen Untersuchungen zur Geodaten-gestützten Positionsbestimmung zeigen:

- Die Integration von marktverfügbaren Komponenten mit Geodaten-gestützter Positionsbestimmung ist praktikabel, wenn die entsprechenden Geodaten bereitstehen.
- Eine Positionsbestimmung über passive Landmarken ist ein Verfahren, das technologisches Entwicklungspotenzial bietet, da eine hinreichend genaue Positionsschätzung erreicht wird.

Abstract

Integration of geo-data to improve computerized operational control systems (COCS) is the central topic of this thesis. The potential of innovation is based on the functions using geo-data e.g. geo-data-aided positioning. This potential is verified by prototyping.

The investigations are based on the scenarios of incident management, flexible forms and prioritization of Public Transport at traffic lights. Accurate geo-data-aided positioning systems are the focus of the investigation as onboard components.

Studies on the functionality in the centre of COCS confirm:

- A significant improvement was obtained using geo-data and the corresponding functional extension of the COCS within the given scenarios.
- The implementation of a geo-data-infrastructure is an economically critical issue, if the reinvestment of the costs is restricted to the operational services.

Further investigation on the integration of geo-data in vehicles to optimize the positioning showed:

- The integration of a component being on the market is feasible if correct geo-data for the public transport network is available.
- A geo-data-aided positioning by passive landmarks is an approach offering a good potential of development. The required accuracy of positioning is achieved in the defined scenarios on public transport.

1 Einleitung und Gliederung

1.1 Motivation

Im Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) sind Rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL) eine zentrale Organisationseinheit, deren technische Weiterentwicklung eine Qualitätssteigerung des ÖPNV durch verbesserte Informationsflüsse sowohl betriebsintern als auch gegenüber den Kunden bewirkt. Der Linienverkehr im ÖPNV-System, der die effektive Bündelung von Personenströmen zum Ziel hat, ist bis heute die prägende Betriebsform und im Personenbeförderungsgesetz (PBefG 2002) als Regelfall definiert. Aufbauend auf diesem linienorientierten Paradigma haben sich die Leitsysteme für den öffentlichen Nahverkehr entwickelt. Diese Systeme sind auf den Regelfall des Linienbetriebs angepasst und unterstützen diesen operationellen Betrieb bestmöglich. In Situationen, in denen jedoch ein routenflexibler Fahrzeugeinsatz ohne Linienbindung notwendig wird, sind diese Systeme nur eingeschränkt nutzbar. Diese Arbeit greift dieses Problem mit der Zielsetzung auf, die Datengrundlage des RBL mit einem georeferenzierten Verkehrsnetz zu erweitern und somit die Grundlage für eine technologische Weiterentwicklung zu legen.

Folgende Defizite eines RBL, die durch die Linienorientiertheit des ÖPNV begründbar sind, sollen durch die Integration von Geodaten-basierter Zusatzfunktionalität behoben werden:

- Beim Auftreten von Störfällen im Linienverkehr werden die Disponenten in einem klassisch ausgelegten RBL bei der Planung von Umwegen nur eingeschränkt unterstützt. Es stehen in der Regel nur vorgeplante Umwegrouten zur Verfügung. Das klassische Positionsbestimmungssystem funktioniert abseits der festgelegten Linie nicht. Dem gegenüber steht die Tatsache, dass die Betriebssteuerung bei Störfällen eine wesentliche Aufgabe des RBL ist. Die Bewertung des Nahverkehrssystems durch Fahrgäste wird durch die Qualität der Störfallbewältigung maßgeblich beeinflusst.
- Der liniengebundene ÖPNV kann im ländlichen Raum wegen der geringen Verkehrsnachfrage in vielen Fällen nicht kostendeckend operieren. Bedarfsorientierte Bedienungsformen bieten hier eine kostenoptimierte Lösungsoption „zur Sicherstellung einer ausreichenden Bedienung der Bevölkerung mit Verkehrsleistungen im öffentlichen Personennahverkehr“ (§5 ÖPNVG 1997). Eine Unterstützung dieser Bedienungsformen durch die linienorientierten Datenstrukturen eines traditionellen RBL ist nicht möglich.

Unter Berücksichtigung der Liniengebundenheit des ÖPNV haben sich Positionsbestimmungssysteme für den ÖPNV entwickelt. Sie werden im verkehrstechnischen Sprachgebrauch als Physikalische bzw. Logische Ortung bezeichnet. Sie haben den systembedingten Nachteil, dass sie nur linienbezogen die Position der Fahrzeuge bestimmen können. Die Funktionsweise ist im Kapitel 2.6 beschrieben. Folgende Defizite ergeben sich aus Sicht des RBL:

- Zum Erreichen der notwendigen Genauigkeit der Positionsbestimmung müssen aktive Bakenysteme entlang der Strecke sowohl im Straßen- als auch im schienengebundenen Verkehr installiert werden. Diese verteilte Infrastruktur ist zu pflegen.
- Die Stationierung als Datengrundlage der Logischen Ortung muss entlang jeder Linie gepflegt werden. Bei jeder Umleitung, die z.B. durch eine Umfahrung einer Baustelle notwendig wird, sind die Strecken in beiden Richtungen für jede betroffene Linie neu zu vermessen. Nutzen mehrerer Linien gleiche Straßenabschnitte, so sind sie, obwohl

es die gleiche geographische Lage betrifft, separat zu bearbeiten. Ebenso sind alle Meldepunkte von den Umwegfahrten betroffen und entsprechend nachzupflegen.

- Verlässt ein Fahrzeug das Liniennetz, führt dies bei traditionellen Positionsbestimmungssystemen zu einem Verlust der korrekten Position. Bei der Umfahrung von Baustellen kommt es zu einer Fehlanzeige der Position, bis wieder eine Bake oder eine ausreichende Anzahl von Haltestellen angefahren wird. Der Verlust der Information über die Position der Fahrzeuge ist im System ein Informationsdefizit, das der Disponent ggf. über andere Informationskanäle (z.B. Sprechfunk) aufwändig kompensieren muss.
- Das Fehlen der Positionsinformation führt auch dazu, dass auf Umwegen keine ortsspezifische Fahrgastinformation automatisiert gegeben werden kann. Haltestellenansagen müssen in der Regel von dem durch die Fahrwegänderung bereits besonders beanspruchten Personal (Fahrer oder Disponenten) zeitgerecht für den Fahrgast durchgegeben werden.

1.2 Zielsetzungen

Diese Abhandlung zeigt die nutzbringende Integration von Geodaten in einem Rechnergestützten Betriebsleitsystem des ÖPNV auf, sowohl in der RBL-Zentrale als auch im Fahrzeug. Da der funktionale Umfang eines RBL sehr weit reichend ist, werden beim praktischen Nachweis über eine prototypische Realisierung eines Geodaten-basierten RBL (GeoRBL) szenarienbasierte Schwerpunkte gesetzt. Die Integration von Geodaten in eine GeoRBL-Zentrale, die die Funktionalität zur Beseitigung der oben genannten Defizite implementiert, verlangt die Definition eines anwendungsbezogenen Datenmodells und deren praktische Bereitstellung. Aufgrund dieser Umsetzung wird eine Bewertung der Datenstruktur und der vorliegenden Datenlage vorgenommen.

Das Ziel der Integration von Geodaten in ÖPNV-Fahrzeuge wird auf die Anwendung der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung fokussiert. Dem entsprechend wird bei der prototypischen Integration eines marktverfügbaren Kfz-Navigationssystems lediglich die Komponente der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung im Rahmen dieser Arbeit dokumentiert. Die technologische Machbarkeit dieses Ansatzes wird nachgewiesen.

Um bei den klassischen Ortungstechniken des ÖPNV eine hinreichende Genauigkeit zu erhalten, wird streckenbezogene Infrastruktur (z.B. Baken) genutzt. Zur Vermeidung dieser Infrastruktur, die auch entlang des Schienennetzes des ÖPNV aufgebaut wird, soll ein technologischer Ansatz für autonome Positionsbestimmung von Personenkraftwagen auf Schienenfahrzeuge portiert und die Machbarkeit nachgewiesen werden.

Ein weiterer Ansatz zur Vermeidung der Installation von Baken (aktive Landmarken) vor Ort ist das Nutzen von Charakteristika der Strecke (passive Landmarken), die durch Sensoren erfasst werden können. Diese Technik wirkt zwar ebenfalls vorrangig entlang definierter Linien, kann aber, je nach Datengrundlage, aus der die passiven Landmarken entnommen werden, auch über das gesamte Straßennetz genutzt werden. Das Ziel liegt hier in einer Vermeidung der spezifischen Infrastruktur bei Beibehaltung der bewährten Technik des Erkennens einer Ortsidentität mit hoher Positionsbestimmungsgenauigkeit. Die experimentellen Umsetzungen konzentrieren sich auf den Aspekt der Positionsgenauigkeit. Die korrespondierende Datenbasis, die entsprechende Qualitätsmerkmale erfüllen muss, wird an diesem Punkt als gegeben oder als aus Sensordaten lernbar vorausgesetzt.

1.3 Einordnung der Arbeit in den wissenschaftlichen Kontext und Stand der Technik

Die Arbeit berührt verschiedene Fachbereiche, in denen in den letzten Jahren diverse Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten durchgeführt wurden. An dieser Stelle werden die Forschungsaktivitäten, die das gesamte RBL umfassen bzw. die Integration von Geodaten betreffen, vorgestellt.

1.3.1 Stand der Technik

Eine der Aktivitäten des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) ist die Definition eines ÖPNV-Datenmodells. Das Datenmodell umfasst auch den Dateninhalt von RBL. Im Jahre 1999 wurde der Funktionsumfang eines RBL in einer VDV-Schrift (VDV 1999/2) festgehalten. Die Standardisierung des Datenmodells wird auf europäischer Ebene im Projekt Transmodel (TRANSMODEL 2001) vorangetrieben.

Neuerungen in der RBL-Technik sind in Fachzeitschriften durch Artikel großer RBL-Hersteller beschrieben (SCHWANDNER 2001, WALDSCHOCK 2001, REUPKE 2001). Die wesentlichen Neuerungen der letzten Jahre sind beispielsweise die Einführung von GPS/DGPS, die Datenversorgung im Betriebshof über W-LAN und das Nutzen von öffentlichen Mobilfunknetzen als Kommunikationskanal für Statusmeldungen im regionalen Verkehr.

Im Rahmen des Forschungsprogramms Stadtverkehr (FOPS) des Bundesministeriums für Bauen und Wohnen (BMVBW) wurde in den letzten Jahren die Vernetzung von Rechnergestützten Betriebsleitzentralen in mehreren Projekten (FOPS 70.071/2002; FOPS 70.508/97; FOPS 70576/99) bearbeitet. Insbesondere wurden die Themenfelder Anschlusssicherung und Fahrgastlenkung untersucht. Die Forschungsaktivitäten führten zu den VDV-Empfehlungen 453 und 454 (VDV 2003/1 und VDV 2003/2), die einen Informationsaustausch von RBL untereinander und zu Informationsdiensten beschreiben.

1.3.2 Personennahverkehr in der Region (PNV)

In der Forschungsinitiative PNV des BMBF wurden zehn Projekte im Bereich des regionalen Personennahverkehrs gefördert (LITTMANN 2002). Ein Schwerpunkt war die „Entwicklung von Angeboten, die an den tatsächlichen Mobilitätsbedürfnissen der ländlichen Bevölkerung ausgerichtet sind“. Einige Projekte nutzen Geodaten. Geodaten werden auch im Planungsbe- reich verwendet. Im Projekt „Auf dem Land mobil“ wurde der Schülerverkehr eines Landkreises auf der Basis von Geodaten optimiert (KRAMPE ET AL. 2004). Im Projekt ARMONT, das dem Themencluster Personennahverkehr im Naherholungsgebiet-Tourismus zugeordnet ist, wurde ein WEB-Map Server (ARMONT 2004) installiert, mit dem optimierte Routen berechnet werden können. Einen besonderen Schwerpunkt legte das Projekt auf die Erfassung von Routen für behinderte Personen. Im Projekt IMPULS wurde ein Bedarfsverkehr etabliert, der auf der Basis der Ortsbestimmung mit GPS und einer digitalen Karte arbeitet.

1.3.3 Das Projekt RUDY

Das Projekt RUDY (Regionale unternehmensübergreifende und dynamische Vernetzung von Auskunfts-, Betriebsleit- und Planungssystemen im ÖPNV und Taxigewerbe) ist in HENNINGER ET AL. (2003) umfassend beschrieben. Die verantwortliche Koordination des Themenbereichs „Integration von Geodaten in RBL“ wurde vom Autor dieser Arbeit vorgenommen (siehe Abbildung 1-1).

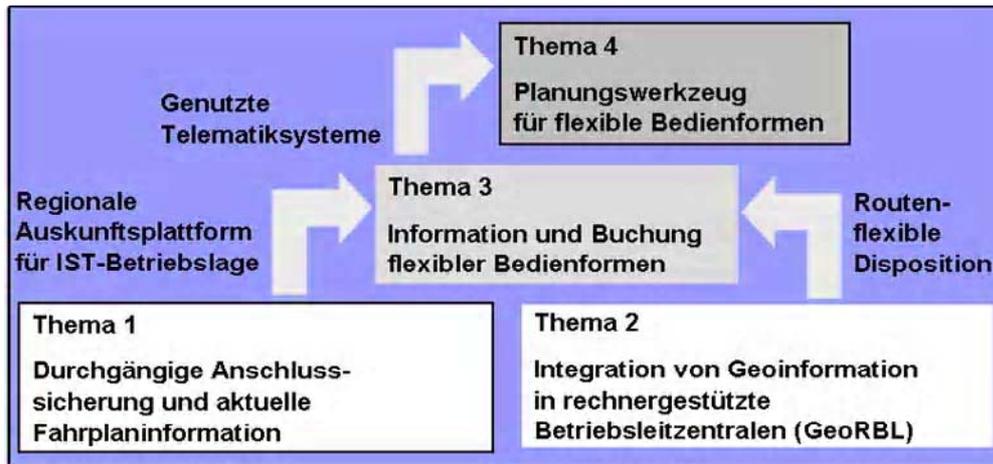


Abbildung 1-1: Themenübersicht des Projektes RUDY (RUDY 2005)

Im Projekt RUDY war die Integration von Geoinformation in ein RBL wesentlicher Projektbestandteil im Themenbereich zwei. Das Ausgangsszenario für dieses Thema beinhaltet das Störfallmanagement. Die Projektintension der praktischen Umsetzung des Störfallmanagements verbot es, die Störfallmanagement-Funktionalität in das von den Stadtwerken Ulm betriebene RBL zu integrieren. In Folge musste im Projekt ein Parallel-RBL erstellt werden, das lediglich die notwendigen projektspezifischen Funktionalitäten umsetzt. Da dieses Parallel-RBL Geodaten nutzt, wurde dafür die Bezeichnung „GeoRBL“ gewählt.

Das GeoRBL wurde auch im Themenbereich drei des Projektes RUDY angewandt. Ein Dispositionswerkzeug wurde in das GeoRBL integriert, um die Bedarfsanfragen einer flexiblen Bedienform automatisch zu koordinieren. Das System baut auf der bestehenden Kommunikationsinfrastruktur und der flexibel gestalteten Bordausstattung des Themenbereichs zwei auf.

1.4 Inhaltliche Übersicht

Als Grundlage werden im folgenden Kapitel Begriffe und Definitionen erläutert. Kapitel drei beinhaltet eine Funktionsanalyse von RBL, die zunächst das breite Spektrum einer möglichen Geodatenutzung in RBL aufzeigt. Es werden Szenarien definiert, die eine funktionale Erweiterung eines RBL beinhalten. Die prototypische Umsetzung eines RBL mit dieser Funktionalität ermöglicht die Überprüfung des theoretisch abgeleiteten Verbesserungspotenzials. Daher wird die praktische Umsetzung bereits an dieser Stelle dargestellt, wenn auch die folgenden beiden Kapitel Voraussetzung für die Umsetzung sind.

Im vierten Kapitel wird unter Berücksichtigung existierender Standards und existierender Datenquellen die Datenstruktur des GeoRBL definiert. Das Kapitel fünf umfasst den Datenimport in die definierte Datenstruktur und eine Datenanalyse. Ein Verfahren zur Erfassung von Haltepunkten und die Bereitstellung der Reisezeitmatrix für ein Vorzugsstraßennetz wird vorgestellt. Diese Daten standen nicht in ausreichender Qualität zur Verfügung. Eine Bewertung der Datenbereitstellung und der existierenden Datenstrukturen wird vorgenommen.

Die Kapitel sechs und sieben beinhalten die Abhandlung der Integration von Geodaten zur Positionsbestimmung in ÖPNV-Fahrzeuge. Das sechste Kapitel untersucht die Integration handelsüblicher Navigationssysteme in ein RBL. Die Qualität der Positionsbestimmung wird den Anforderungen gegenübergestellt. Eine Bewertung der Erfahrungen im praktischen Einsatz schließt sich an.

Positionsbestimmungssysteme, die ohne Infrastruktur zur dispositiven Positionsbestimmung entlang der Strecken auskommen und positionsabhängig eine hohe Lagegenauigkeit bieten sollen, sind Gegenstand der Untersuchungen im Kapitel sieben. Die gemeinsame Struktur der gewählten Ansätze zur Geodaten-gestützten Positionsbestimmung auf der Schiene und auf der Straße wird zunächst dargestellt. Die erste Ausprägung der Positionsbestimmung zielt auf die Anwendung in Schienenfahrzeugen des ÖPNV. Die zweite Ausprägung untersucht die Positionsbestimmung mit passiven Landmarken beim Betrieb von ÖPNV-Fahrzeugen auf der Straße. Schlussfolgerung und Ausblick sind im abschließenden Kapitel enthalten.

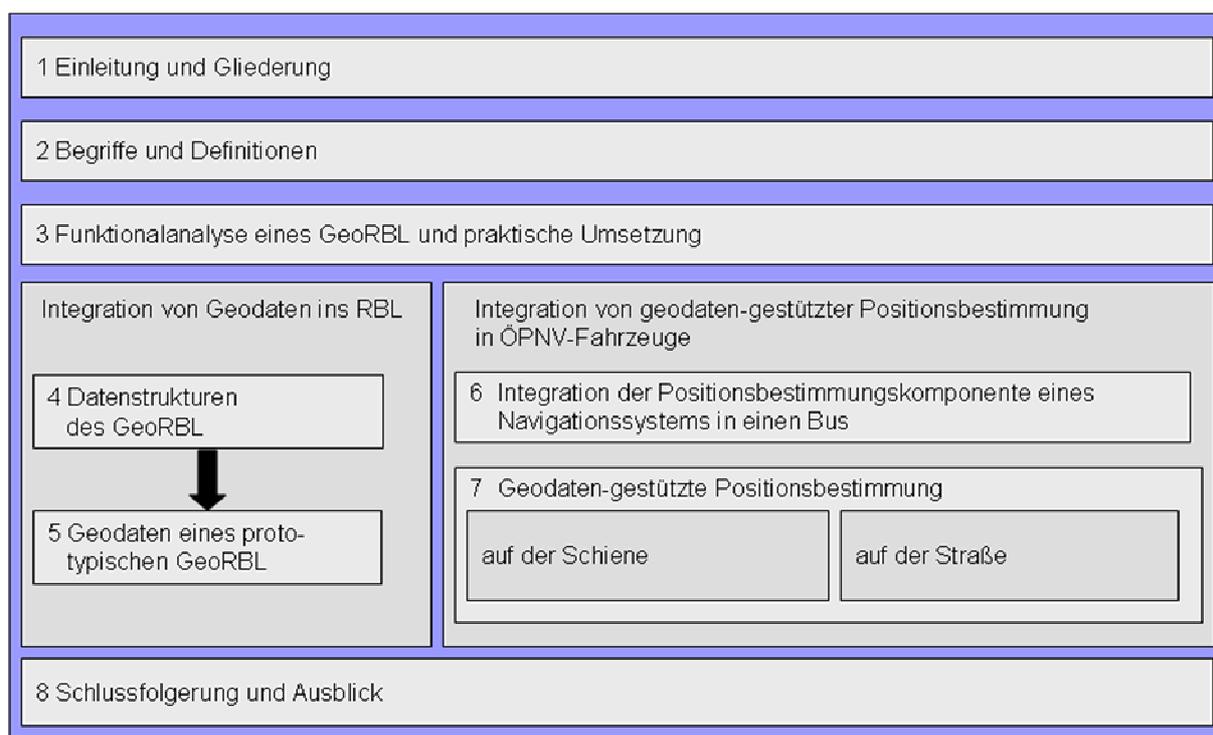


Abbildung 1-2: Kapitelübersicht

2 Begriffe und Definitionen

In diesem Kapitel werden wesentliche Begriffe und Rahmenbedingungen dieser Arbeit definiert und erläutert. Sie sind in sechs Themenbereiche gegliedert:

- ÖPNV-Grundlagen
- Georeferenz
- Geoinformation
- Objektdefinitionen für den ÖPNV
- Positionsbestimmung
- Positionsbestimmung im ÖPNV

2.1 ÖPNV-Grundlagen

2.1.1 RBL-Entwicklung mit Geodaten

In der Einführungsphase von RBL in die Verkehrsunternehmen waren diese komplexen Systeme als „stand-alone“-Systeme konzipiert. Heute gliedert sich ein RBL im Verkehrsunternehmen in das Umfeld der Informations- und Kommunikationstechnik (IuK-Technik) ein. Der VDV gibt Empfehlungen, wie die Datenstrukturen im ÖPNV aussehen sollten, um eine ggf. firmenübergreifende Kompatibilität einzelner Komponenten zu erreichen. Hinsichtlich der Nutzung von Geodaten ist in den VDV-Empfehlungen noch keine konsequente Geodaten-Integration enthalten. Es existieren jedoch Standardisierungsaktivitäten und Umsetzungen, die für die Geodatennutzung im ÖPNV entsprechende Vorschläge erarbeiten. Zumeist zielen diese Aktivitäten nicht auf den Aufbau eines operativen RBL sondern resultieren aus dem Prozess zur Erstellung von Werkzeugen im Planungsbereich.

Funktion	Traditionelles RBL (entsprechende Funktionen)	GeoRBL (Funktion siehe Kapitel 3.2.2)
Georeferenzierter Datenaustausch	➤ Adressangaben; spezielle Daten	➤ allgemeingültig; geographische Koordinaten; automatisierte Adressangaben, Datendienst zur Bereitstellung von Geodaten
Visualisierung	➤ alphanumerisch oder graphisch	➤ georeferenziert Lagerichtig, maßstäblich (zusätzliche Funktion)
Routing	➤ erfolgt nur auf Linien und definierten Umwegen	➤ erfolgt im gesamten Straßennetz (Vorzugsstraßennetz)
Positionsbestimmung	➤ Bakenortung: zuverlässig, aber nicht routenflexibel ➤ GPS-Ortung: routenflexibel, aber nicht zuverlässig	➤ Geodaten-gestützte Positionsbestimmung: zuverlässig und routenflexibel

Tabelle 2-1: Elementarfunktionen in traditionellem RBL und GeoRBL
(nach BETTERMANN UND KAUFMANN 2002)

In dieser Arbeit werden die Begriffe GeoRBL und Traditionelles RBL gegenübergestellt. Diese polarisierende Darstellung spiegelt sich in dieser klaren Trennung auf dem RBL-Markt nicht wider. In Tabelle 2-1 wird anhand der Ausprägung spezieller Funktionen (siehe Kapitel 3.2.2) eine Unterscheidung vorgenommen. Aus dieser Tabellendarstellung wird ersichtlich, dass die GeoRBL kein grundsätzlich neues System darstellt. Die Erweiterung der Funktionalität durch Funktionen, die Geodaten verwenden, kann je nach Ausprägung von einer „komfortableren“ Bedienung der Anwendung bis zur innovativen Anwendungserweiterung reichen.

2.1.2 ÖPNV-Organisation

Das Personenbeförderungsgesetz (PBefG) des Bundes wird durch die Landesgesetzgebung konkretisiert. In Baden-Württemberg existieren hierfür beispielsweise das „Gesetz über die Planung, Organisation und Gestaltung des öffentlichen Personennahverkehrs“ (ÖPNVG 1997) und die „Verordnung der Landesregierung und des Ministeriums für Umwelt und Verkehr über personenbeförderungsrechtliche Zuständigkeiten“ (PBefZuVO 1996).

Der Nahverkehrsplan ist der ordnungspolitische Rahmenplan, der nach Abstimmung mit allen relevanten Institutionen als planerische Grundlage und Genehmigungsmaßstab dient. Die Genehmigungsbehörde ist auf der Ebene der Regierungspräsidien angesiedelt. Für die Bereitstellung von gemeinwirtschaftlichen Verkehren sind als Aufgabenträger die Land- und Stadtkreise bestimmt. Der operative Betrieb dieser Verkehre wird dann durch die Verkehrsunternehmen ausgeführt.

Die Aufgabenverteilung zwischen den Aufgabenträgern und den Verkehrsunternehmen kann unterschiedlich gestaltet sein. Insbesondere in großen Städten existiert aus der Historie eine enge Beziehung zwischen dem kommunalen Verkehrsunternehmen und der entsprechenden Auftrag gebenden Dienststelle. Durch die europäische Gesetzgebung wurde diese monopolartige Stellung kommunaler Verkehrsunternehmen aufgehoben und eine Wettbewerbssituation definiert. Demgegenüber beschreibt MEHLERT (2001) die Situation, die von entsprechenden gewachsenen Strukturen ausgeht, dass „die ausreichende Verkehrsbedienung im Sinne des Personenbeförderungsgesetzes im Zweifelsfall das vom Unternehmer beantragte Angebot ist“. Diese polarisierte Darstellung charakterisiert die derzeit noch gegebene Abhängigkeit.

Das Planungs-Know-how, einschließlich der für die Planung notwendigen Datengrundlage, kann nicht ausschließlich bei Verkehrsunternehmen existieren, um eine unabhängige Ausschreibung der Transportleistung zu gewährleisten. Eine Infrastruktur zum Datenaustausch zur Vermeidung einer Redundanz der notwendigen Datenhaltung und Datenpflege wäre zweckmäßig. Das mögliche Spektrum der Aufgabenverteilung ist in der Abbildung 2-1 dargestellt.



Abbildung 2-1: Spannungsfeld zwischen Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen (BRACHER ET AL. 2004)

Die Zusammenarbeit von Aufgabenträgern und Verkehrsunternehmen kann auch im gesetzlichen Rahmen durch Verkehrskooperationen (§9 ÖPNVG) geregelt werden. In Baden-Württemberg wurde zur Koordination des regionalen Schienenverkehrs (S-Bahnen) im Raum Stuttgart der Verband Region Stuttgart als Aufgabenträger explizit ins Gesetz aufgenommen.

RBL sind traditionell Systeme, die den Fahrbetrieb optimieren sollen. Entsprechend dieser Einordnung wären RBL stets dem Verkehrsunternehmen zuzuordnen. Da jedoch RBL zunehmend auch Koordinierungsfunktionen übernehmen, sind auch Szenarien denkbar, in denen ein RBL teilweise durch einen Aufgabenträger bzw. ein Unternehmen im Auftrag des Aufgabenträgers betrieben wird.

2.1.3 Begriffe

Öffentlicher Personennahverkehr §2 (ÖPNVG 1997)

„(1) Öffentlicher Personennahverkehr im Sinne dieses Gesetzes ist die allgemein zugängliche Beförderung von Personen mit Verkehrsmitteln im Linienverkehr, die überwiegend dazu bestimmt sind, die Verkehrsnachfrage im Stadt-, Vorort- oder Regionalverkehr zu befriedigen. Das ist im Zweifel der Fall, wenn in der Mehrzahl der Beförderungsfälle eines Verkehrsmittels die gesamte Reiseweite 50 Kilometer oder die gesamte Reisezeit eine Stunde nicht übersteigt.“

„(2) Öffentlicher Personennahverkehr ist auch der Verkehr mit Taxen oder Mietwagen, der einen Verkehr nach Absatz 1 ersetzt, ergänzt oder verdichtet.“

Dieser Paragraph entspricht den Regelungen, die im §8 des PBefG enthalten sind. Der Absatz 2 ist entsprechend der neuen inhaltsgleichen Vorschrift des §8 Abs. 2 formuliert. Diese Regelung ist zur rechtlichen Einordnung alternativer Bedienungsformen für verkehrsarme Zeiten oder Beförderungsrelationen in das ÖPNVG aufgenommen worden (KROH 1996).

Aufgabe des ÖPNV § 5 (ÖPNVG 1997)

„Die Sicherstellung einer ausreichenden Bedienung der Bevölkerung mit Verkehrsleistungen im öffentlichen Personennahverkehr ist eine freiwillige Aufgabe der Daseinsvorsorge.“

Aufgabenträger §6 (ÖPNVG 1997)

„(1) Träger der freiwilligen Aufgabe nach § 5 sind mit Ausnahme der Regelung des Absatzes 2 die Stadt- und Landkreise in eigener Verantwortung. ...“

Verkehrskooperation §9 (ÖPNVG 1997)

„(1) Zur Verbesserung des öffentlichen Personennahverkehrs und zur Steigerung seiner Attraktivität, insbesondere durch die koordinierte Gestaltung des Leistungsangebots sowie durch einheitliche und nutzerfreundliche Tarife, ist mit dem Ziel einer integrierten Verkehrsgestaltung die Zusammenarbeit zwischen den Aufgabenträgern und den Verkehrsunternehmern oder zwischen Verkehrsunternehmern (Verkehrskooperation) anzustreben. Verkehrskooperation im Sinne des Satzes 1 ist insbesondere

- die tarifliche Zusammenarbeit in Form eines Übergangstarifs oder einer Durchtarifierung,
- die Bildung einer Verkehrs- oder Tarifgemeinschaft oder
- die Bildung eines Verkehrs- und Tarifverbundes.

(2) Bei der Vereinbarung einer Verkehrskooperation soll die Form gewählt werden, die unter Berücksichtigung der strukturellen Gegebenheiten im Kooperationsgebiet, der Verkehrsbedürfnisse und der Verkehrsangebote sowie des Grundsatzes der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit den größten Nutzen erwarten läßt.“

Genehmigungsbehörde

Als Genehmigungsbehörden im Sinne von §11 (1) PBefG weist die PBefZuVO (§§1+2) in Baden-Württemberg die unteren Verwaltungsbehörden sowie die Regierungspräsidien aus.

Verkehrsverbund

Eine nach §9 ÖPNV-Gesetz (ÖPNVG 1997) begründete Einrichtung oder Organ mit eigener Rechtspersönlichkeit, die nach außen anstelle der beteiligten Unternehmer (Unternehmerverbund) oder Kommunen (Kommunalverbund) handelt.

Nach KROH (1996) wird in Baden-Württemberg insbesondere diese Form der Verkehrskooperation finanziell gefördert.

Nahverkehrsplan (§11 ÖPNVG 1997)

„(1) Die Aufgabenträger nach § 6 Abs. 1 Satz 1 haben für ihr Gebiet zur Sicherung und zur Verbesserung des öffentlichen Personennahverkehrs einen Nahverkehrsplan im Sinne des § 8 Abs. 3 PBefG aufzustellen (weisungsfreie Pflichtaufgabe). ...

(3) Der Nahverkehrsplan bildet den Rahmen für die Entwicklung des öffentlichen Personennahverkehrs. Er hat mindestens zu enthalten:

- eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Einrichtungen und Strukturen sowie der Bedienung im öffentlichen Personennahverkehr;
- eine Bewertung der Bestandsaufnahme (Verkehrsanalyse);
- eine Abschätzung des im Planungszeitraum zu erwartenden Verkehrsaufkommens im motorisierten Individualverkehr und im öffentlichen Personennahverkehr (Verkehrsprognose);
- Ziele und Rahmenvorgaben für die Gestaltung des öffentlichen Personennahverkehrs.“

Linienverkehr §42 (PBefG)

„Linienverkehr ist eine zwischen bestimmten Ausgangs- und Endpunkten eingerichtete regelmäßige Verkehrsverbindung, auf der Fahrgäste an bestimmten Haltestellen ein- und aussteigen können. Er setzt nicht voraus, daß ein Fahrplan mit bestimmten Abfahrts- und Ankunftszeiten besteht oder Zwischenhaltestellen eingerichtet sind.“

Flexible Bedienungsform

Organisationsform des ÖPNV-Betriebs, die die Verkehrsnachfrage im Gegensatz zum Linienverkehr ohne exakt vorgegebene Haltepunktfolge und exakt vorgegebene Zeitpunkte bedient.

Die Flexibilisierung der Bedienungsform kann sowohl die zeitliche als auch die räumliche Fixierung betreffen. Einen Überblick über die existierenden unterschiedlichen Formen wie Rufbus, Anrufsammeltaxi, usw. gibt BUSCH ET AL (2004).

Störfall

Ein Störfall, im Sinne der Untersuchungen im Kontext des Projektes RUDY, liegt dann vor, wenn eine signifikante zeitliche Fahrplanabweichung oder eine Änderung des Routenverlaufs vorliegt und ein ÖPNV-Kunde unmittelbar betroffen sein kann.

Störfallmanagement

Das Störfallmanagement umfasst das Durchführen von Maßnahmen und das dazu notwendige Informationsmanagement zum Überführen der gestörten Betriebslage in den Normalbetrieb.

Das Störfallmanagement betrifft sowohl dispositive Maßnahmen für Fahrzeuge und Fahrpersonal als auch die Berücksichtigung der Belange der Kunden hinsichtlich ihres Beförderungswunsches und einer adäquaten Information über die Betriebslage mit ggf. möglichen Alternativen.

2.2 Georeferenz

Aufbauend auf den Grundlagendefinitionen zum Raumbezug aus dem Dokument „Spatial referencing by coordinates“ (NICOLAI 2003) des OpenGIS-Konsortiums, das weitgehend mit den Normen und Vornormen des ISO-Standards 19101 bis 19139 korrespondiert, werden zunächst Begriffe definiert, die den Raumbezug von Objekten beschreiben.

Digitaler Raum

Modell der Wirklichkeit mit georeferenzierten Objekten

Im Rahmen der Arbeit sind insbesondere Verkehrsnetze, Verknüpfungen zwischen den Verkehrsnetzen und Verkehrsmittel des öffentlichen Personennahverkehrs wesentliche Bestandteile des digitalen Raumes.

Georeferenz

Definiert den Raumbezug von Objekten

Der Raumbezug kann zum einen über Koordinaten-Bezugssysteme erfolgen, zum anderen können auch Adressen oder die direkte Zuordnung zu einem georeferenzierten Objekt den Raumbezug begründen. Beispiele für die Georeferenz:

- Geschwister-Scholl-Straße 24d, 70174 Stuttgart, Deutschland
- 9.989872° Länge, 48.987343° Breite, WGS 84
- Bake Nr. 255
- Kartenblatt TK50, 7846
- A81, Kilometer 254,500, Block 4
- Funkzelle Nr. 123

Adresssystem

System von Kenngrößen, das eine eindeutige Zuordnung eines Satzes von Kenngrößen zu einem Ort ermöglicht.

Ein gängiges Beispiel ist das postalische Adresssystem, das über die Kenngrößen Land, Postleitzahl, Straße und Hausnummer den Zustellungsort definiert. Die Kenngrößen eines Adresssystems können den Objekten eines Netzes zugeordnet werden.

Koordinatensystem (KS)

Ein Satz (mathematischer) Regeln, die beschreiben, wie Koordinaten einem Punkt zugeordnet werden (nach NICOLAI 2003).

Datum

Parameter oder ein Satz von Parametern, die den Ort des Ursprungs, die Orientierung und den Maßstab eines Koordinaten-Bezugssystems bestimmen (nach NICOLAI 2003).

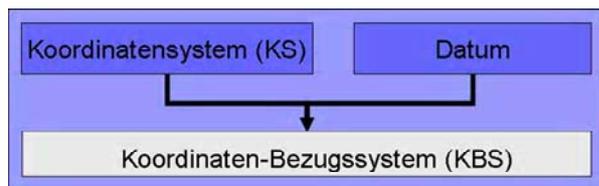


Abbildung 2-2: Übersicht Definition eines Koordinaten-Bezugssystems

Koordinaten-Bezugssystem (KBS)

Ein Koordinatensystem, das mit der realen Welt über ein Datum verknüpft ist (nach NICOLAI 2003).

Lokales Datum

Datum mit einem lokalen Bezug, das zur Festlegung eines lokalen Koordinaten-Bezugssystems / Ingenieurkoordinaten-Bezugssystems verwendet wird (nach NICOLAI 2003).

Lokales Koordinaten-Bezugssystem / Ingenieurkoordinaten-Bezugssystem

Ein Koordinaten-Bezugssystem, das mit einer kontextuellen lokalen Bedeutung definiert wurde und auch in diesem Sinne genutzt wird. Es umfasst ein Gebiet, das deutlich kleiner ist als die Erdoberfläche, oder eine bewegte Plattform mit seiner Umgebung (nach NICOLAI 2003).

Objekt Koordinaten-Bezugssystem

KBS mit einem lokalen Datum, das mit einem Objekt verknüpft ist.

Das Objekt KBS kann sowohl mehrdimensional als auch linear sein. Wichtig ist der Bezug zu einem Objekt aus dem digitalen Raum.

Übergeordnetes Koordinaten-Bezugssystem

Das Koordinaten-Bezugssystem, in das lokale KBS transformiert werden, um einen einheitlichen Bezug zu erhalten.

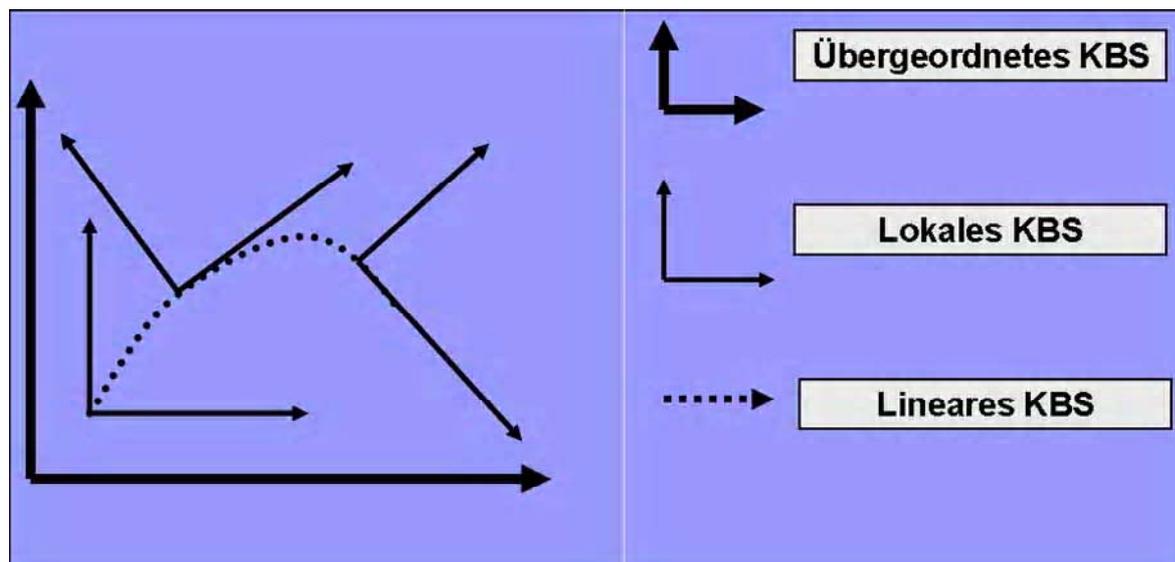


Abbildung 2-3: Übergeordnetes Koordinaten-Bezugssystem

WGS 84

World Geodetic System 1994. Geozentrisch gelagertes KBS, das von dem satellitenbasierten Positionsbestimmungssystem GPS (Global Positioning System) genutzt wird.

In der Regel wird heutzutage im Bereich der Fahrzeugnavigation das Koordinaten-Bezugssystem WGS 84 gewählt. Nähere Details sind zum Beispiel der Web-Seite www.wgs84.com zu entnehmen, die von der europäischen Flugsicherungsbehörde EUROCONTROL (2004) gestaltet wird. Da die am Markt verfügbaren standardisierten digitalen Straßenkarten ebenfalls das WGS 84-System zugrundelegen, ist keine Datumstransformation zwischen Ortungssensor und Geodatenbasis bei der gebräuchlichen Verwendung von GPS-gestützten Ortungsmodulen notwendig.

Als Besonderheit des WGS 84-Systems sei an dieser Stelle erwähnt, dass dieses globale System anhand von Referenzstationen fixiert ist, die nicht auf der eurasischen Kontinentalplatte liegen. Daher wirkt sich die globale geometrische Veränderung der Kontinentaldrift auf die WGS 84-Koordinaten in Europa aus. Dies führt zu einer Veränderung für einen Punkt in Europa ohne lokale Besonderheiten um ca. 2,5 cm/Jahr (HÖGGERL 2004). Derartige Effekte werden jedoch in der Arbeit nicht weiter vertieft. Es soll lediglich der Hinweis angeführt sein, dass ein auf Satellitenbasis gemessenes europäisches Koordinaten-Bezugssystem (ETRS) mit entsprechendem Datum definiert ist, das mit dem WGS 84-System über nachgeführte Transformationsparameter verknüpft werden kann. Das Problem der durch die Kontinentaldrift wandernden Kartenobjekte lässt sich für den Fall der Messung höherer Genauigkeiten durch eine Transformation beheben. Die Erhebung der Verkehrsnetze liegt noch nicht so lange zurück, dass eine Beeinträchtigung der Anwendungssysteme festgestellt werden kann. Ggf. können auch die Kartenprovider ihre Karten entsprechend der bekannten Transformationen der aktuellen Lage im WGS 84-System anpassen.

Lineares Koordinaten-Bezugssystem

Eindimensionales Koordinaten-Bezugssystem, das durch ein Datum entlang eines linearen Objektes, das durch eine Raumkurve repräsentiert werden kann, festgelegt ist.

Nach GRÜNDIG (2001) wird in diesem Zusammenhang auch von einem krummlinigen KS gesprochen. Ein Lineares KBS ist eine besondere Ausprägung eines Objekt-KBS.

Netz

System von verknüpften Objekten mit linearem KBS

Die Verknüpfung der Objekte ist durch eine anwendungsspezifische Topologie definiert.

Segmentierte Attribute

Ortsangabe von Informationen in einem Linearen KBS.

Zeitliche Koordinate

Entfernung von einem Ursprung einer in Intervalle geteilten Zeitachse, die als Basis eines zeitlichen Bezugssystems genutzt wird (nach NICOLAI 2003).

Zeitliches Koordinaten-Bezugssystem

Referenzsystem, gegen das die Zeit gemessen wird (nach NICOLAI 2003). Das zeitliche KBS wird durch eine „zeitliche Koordinate“ mit Datumsfestlegung definiert.

Homologe Punkte

Punkte, die in mehr als einem KBS festgelegt sind.

Homologe Punkte werden auch als Referenzpunkte oder Passpunkte bezeichnet.

Transformation

Verfahren, das über einen Satz ggf. zeitlich variabler Parameter die Umrechnung von einem KBS in ein weiteres KBS definiert.

Die Bestimmung der Transformationsparameter kann durch eine dem Verfahren angemessene Anzahl homologer Punkte für einen Zeitraum erfolgen.

Landmarke

Homologer Punkt, dessen Lage mit Zeitreferenz in einem übergeordneten KBS und in einem lokalen KBS bekannt ist oder dessen Lage mit Zeitreferenz durch Messverfahren im lokalen KGS bestimmt werden kann.

Der Begriff Landmarke (engl. landmarks) wird im Fachbereich der Navigation genutzt. Anhand dieser Landmarken lässt sich die Position und die Richtung zum Fortsetzen der weiteren Trajektorie festlegen. Landmarken sind typischerweise Objekte, die sich durch besondere Merkmale auszeichnen und somit leicht identifizieren lassen. Ein bekanntes Beispiel: Bei der Navigation von Wanderern sind „Landmarks“ besonders hervortretende topographische Objekte wie Bergspitze, Einzelbäume, Flussläufe, usw., die als Orientierungspunkte in topographischen Karten enthalten sind.



Abbildung 2-4: Aktive und passive Landmarken

Aktive Landmarke

Aktive Landmarken emittieren ein Signal. Anhand des Signals kann eine Identifikation der Landmarke erfolgen.

Passive Landmarke

Landmarke, die anhand eines Sensors oder mehrerer Sensoren erkannt werden kann.

Die Identität passiver Landmarken lässt sich über Textur, Form, Lage oder Kontext oder an einer Kombination der Kriterien bestimmen (HOCK 1999).

Landmarkeninfrastruktur

Eine Menge von Landmarken, die für eine bestimmte Anwendung verwendet werden.

In der Regel werden aktive Landmarken für eine Applikation installiert.

2.3 Geoinformation

2.3.1 Open GIS Entwicklung in der Geoinformatik

Firmen im Geschäftsfeld der Geoinformatik stehen vor dem Problem, dass potenzielle Kunden ihre Produkte nicht kaufen können, da durch fehlende Daten oder inkompatible Datenstrukturen eine Produkteinführung nicht wirtschaftlich ist. Um einen Zugang zu existierenden Datenquellen zu erleichtern und somit der Geoinformatik ein größeres Geschäftsfeld zu öffnen, wurde das Open GIS Consortium (OGC) gegründet. Nach BILL UND ZEHNER (2001) definiert das OGC seine Aufgaben folgendermaßen: „Definition einer Technologie, welche einem Anwendungsentwickler und Anwender ermöglicht, jede Art von geocodierten Daten und Geofunktionalität oder -prozess zu nutzen, welcher auf dem Netz verfügbar ist, innerhalb seiner Umgebung und seines jeweiligen individuellen und einzelnen Arbeitsablaufes.“ Das darin enthaltene Ziel der Interoperabilität unter Nutzung der Web-Technologie führt zu einer spezifizierten Kommunikation mittels „Web-Map-Servern“. Die Entwicklung zeigt deutlich den Trend zu Geodaten-Diensten, die anfragespezifisch Geodaten liefern. Die Geodaten-Dienste stellen auf Anfrage Geodaten in standardisierter Form bereit. Dazu wurde das XML-konforme Datenaustauschformat Geographic Markup Language (GML) entwickelt (OGC 2005). Auf der Basis des „Simple Feature Catalogue“, der die Modellierung von einfachen Geobjekten gestattet, existieren derzeit bereits diverse Anwendungen, die diese Technik einsetzen.

2.3.2 Georeferenzierungstechniken von Verkehrsnetzen des öffentlichen Verkehrs

Zwei Ausprägungen der Georeferenzierung sind im ÖPNV-Kontext zu unterscheiden. Die einfachere Variante sieht lediglich die Georeferenzierung der Haltestellen vor. Die zweite bildet die Teilstrecken der Linien georeferenziert ab (siehe Abbildung 4-7: Transformation von Netzdaten in Punktfolgen).

2.3.2.1 *Punktfolgen-Netz*

Dem Datenmodell, das im VDV (1996) und VDV (1999/1) beschrieben ist, liegt eine Punktfolge zu Grunde. Die Linien beinhalten unterschiedliche Routen. Die Variation des Linienweges ist in dieser Datenstruktur leicht umsetzbar. Linien können dem Bedarf entsprechend lokal angepasst werden. Eine typische Variation einer Route stellt die Verkürzung von Linien in Nebenverkehrszeiten dar. Eine weitere Routenvariation ist beispielsweise das Bedienen von Haltestellen vor Schulen in Schulzeiten. Zur bedarfsorientierten Ausgestaltung wird zusätzlich der Bedienungstakt der Linien variiert.

Punktfolgenetze sind durch gemeinsame Haltestellen topologisch vernetzt. Punktfolgenetze werden klassischerweise über schematische Graphiken dargestellt.

2.3.2.2 *Georeferenziertes Liniennetz*

Das georeferenzierte Liniennetz wird durch Liniengeometrien repräsentiert. Zwei Aspekte motivieren diese Datensicht. Zum einen erfolgt die Planung der ÖPNV-Netze heutzutage häufig auf dem georeferenzierten Straßennetz, das nicht über Punktfolgen dargestellt werden kann. Zum anderen werden bei der Ermittlung der intermodalen Fahrplanauskunft seit wenigen Jahren georeferenzierte Verkehrsnetze verwendet und durch georeferenzierte Darstellung in maßstäblichen Karten veranschaulicht.

2.3.3 Begriffe

Als Standardwerk zum Nachschlagen von Begriffen der Geoinformation in deutscher Sprache ist das Geoinformationslexikon (BILL UND ZEHNER 2001) zu sehen. Daher werden wesentliche Begriffsdefinitionen der Geoinformationstechnik im folgenden Unterkapitel aus diesem Werk entnommen und ggf. kommentiert.

Geoinformation

„Geoinformation kann als eine Ressource (Land, Arbeit, Kapital) angesehen werden. Sie ist aber auch eine Ware, die sich kaufen und verkaufen lässt. Sie stellt für eine Nation eine ähnliche Infrastruktur dar wie das Transportnetz oder das Gesundheitswesen. Ohne diese Infrastruktur funktioniert das Gesellschaftssystem nicht. Geoinformation ist ein Gut, welches bereitgestellt, verwaltet und aktuell gehalten werden muss. Geoinformation muss koordiniert werden. Es bedarf neben den eigentlichen Kerndaten auch der Bereitstellung von Metadaten. Geoinformationen haben bestimmte unikale Eigenschaften, wie z.B. Raumbezug: Alle Informationen sind räumlich verortet, sei es durch Koordinaten, Adressen, Kennziffern oder andere Raumbezugsformen- ...“ (BILL UND ZEHNER 2001).

Geodateninfrastruktur (GDI)

„... eine aus technischen, organisatorischen und rechtlichen Regelungen bestehende Bündelung von Geoinformationsressourcen, Die GDI schafft die Voraussetzung für die Wertschöpfung durch viele Nutzer in Verwaltungen sowie im kommerziellen und nichtkommerziellen Bereich. Auf ihr können sich neue Services entwickeln. Man muss also davon ausgehen, dass sich in GDI komplexe Produktionsketten etablieren werden. Informationsanbieter und Informationsnutzer treten nicht mehr direkt miteinander in Verbindung, sondern bedienen sich möglicherweise gestufter Services zur Identifikation und Aufbereitung der gewünschten Informationsprodukte“ (BILL UND ZEHNER 2001).

Die Definition der Geodateninfrastruktur weist auf die Komplexität der Verarbeitung von Geoinformation hin. Durch die Komplexität der Bereitstellung von Geoinformation wird hier explizit auf die zu erwartende Existenz von Services (Dienstleistungen) verwiesen, die die anwendungsspezifischen Geodaten zur Verfügung stellen.

2.4 **Positionsbestimmung**

2.4.1 Übersicht zur Geodaten-gestützten Positionsbestimmung

Zur Systematisierung der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung im Rahmen dieser Arbeit sollen vier Kriterien herangezogen werden:

- Geometrietyr zur Georeferenz
- Infrastruktur zur Positionsbestimmung
- Koordinatenbezugssystem der Positionsbestimmung mit ggf. notwendigen Prozessen zur Transformation in ein gemeinsames KBS mit der Datenbasis der Applikation.

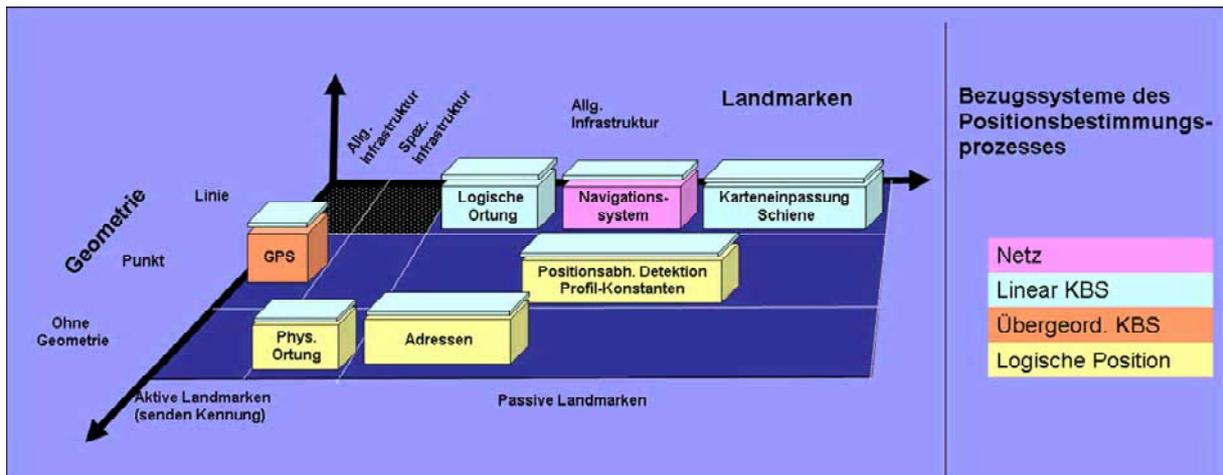


Abbildung 2-5: Übersicht der Positionsbestimmungsverfahren

Der Geometrietyp zur Georeferenz kann eine Fläche, eine Linie, ein Punkt oder auch keine Geometrie umfassen. Beispiele für eine Georeferenz ohne Geometrie ist das Adresssystem oder die Ortsidentifikation über ein aktives Signal einer Bake. Der Geometrietyp Fläche wird nicht weiter vertieft, da im Kontext dieser Arbeit davon ausgegangen wird, dass die auftretenden Flächen zur Positionsbestimmung eine geringe Ausdehnung besitzen und im Applikationskontext als punktförmig betrachtet werden können.

Die eingesetzte Infrastruktur wird in der Abbildung 2-5 in aktive und passive Landmarken unterschieden. Eine weitere Unterscheidung ist, ob die Landmarkeninfrastruktur speziell für die Positionsbestimmung erstellt wurde oder bereits aus anderem Kontext allgemein verfügbar ist. Die Wirtschaftlichkeit eines Positionsbestimmungssystems ist stets unter Einbeziehung des Aufwands zum Aufbau und Pflege der speziellen Infrastruktur zu sehen. Bei der Nutzung von passiven allgemeinen Landmarken ist der Prozess der Integration dieser Landmarken in die Datenbasis ein nicht zu vernachlässigender Bereich in der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit des Systems. Spezielle passive Landmarken bieten den Vorteil, dass sie bereits eine sensorauswertbare Identifikation beinhalten können (z.B. Barcodes).

Der dritte Aspekt, der in Abbildung 2-5 veranschaulicht wird, kennzeichnet das georeferenzierte Ergebnis des Positionsbestimmungsprozesses anhand des dort verwendeten KBS. Die ggf. anschließende Transformation in ein das applikationsspezifische lineare KBS ist über die darüber liegende flache Box angedeutet. Applikationen im ÖPNV verwenden i.d.R. lineare KBS, da zur Steuerung eines Fahrzeugs die Route des Fahrzeugs als lineares KBS beschrieben werden kann.

2.4.2 Begriffe

Position

Ort eines Objektes, der georeferenziert ist.

Netzposition

Position eines Objektes in einem Objekt-KBS eines Netzes.

Die Netzposition ist eindeutig einem linearen KBS eines Objektes zugeordnet, das aus der Menge der Elemente stammt, die ein anwendungsspezifisches Netz bilden. Beispiel: Die Position eines Fahrzeugs auf einem Straßenelement im Verkehrsnetz.

Positionsbestimmung

Verfahren zur Festlegung einer Position in einem Koordinaten-Bezugssystem.

Der Begriff Positionsbestimmung wird an dieser Stelle bewusst nicht auf die Bestimmung der Position in anwendungsspezifischen KBS eingeschränkt. Das Bestimmen der Position in einem nicht-applikationsspezifischen KBS (z.B. durch GPS im WGS84) wird auch als Ortung bezeichnet. Diese begriffliche Trennung soll herausstellen, dass noch eine Transformation notwendig ist, um in das applikationsspezifische KBS bzw. ein System von applikationsspezifischen KBS (z.B. Straßennetz) zu gelangen. Da aber in der Begriffswelt des ÖPNV der Begriff Ortung nicht derart verwendet wird, werden die Begriffe Positionsbestimmung und Ortung in dieser Arbeit synonym verwendet.

Logische Positionsbestimmung

Aussage, ob ein Objekt einem definierten abgegrenzten Raum zugeordnet ist oder nicht.

Die Zuordnung ist binär und frei von metrischen Aussagen. Die Erkennung einer Landmarke über Funksignale und die Definition der Ortsidentität mit dieser Landmarke ist ein einfacher Fall der Logischen Positionsbestimmung (siehe Physikalische Ortung im folgenden Kapitel). Hier wird durch die Annahme der Identität des Ortes bei Signalkontakt mit einer Bake, die eine Identifikation sendet, der Ort des Fahrzeuges bestimmt.

Direkte Positionsbestimmung

Positionsbestimmung in einem übergeordneten KBS unter Nutzung von Landmarken.

Bei der Satellitenortung ist anhand der empfangenen Signale die Position der Satelliten sowie die Entfernung zu den Satelliten bekannt. Daraus lässt sich die Position im übergeordneten KBS direkt ableiten.

Lokale Positionsbestimmung

Positionsbestimmung in einem lokalen KBS.

Ein Beispiel für die lokale Positionsbestimmung ist die Koppelortung.

Koppelortung

Positionsbestimmungsverfahren, das aus Relativmessungen in einem fahrzeugbezogenen Koordinaten-Bezugssystem die Position in dem lokalen KBS bestimmt, das zu einem definierten Zeitpunkt mit dem fahrzeugbezogenen KBS identisch war.

Odometrie

Über Radumdrehungsimpulszähler kann mittels der Radgröße die Strecke bestimmt werden. Durch die Differenzbildung der ermittelten Wegstrecke beider Räder einer Achse kann auch die Änderung der Orientierung von Fahrzeugen bestimmt werden (CZOMMER 2001).

Nach AUSSEMS (1999) beträgt die Genauigkeit der Streckenmessung von Odometern ca. 2%.

Inertial-Messsystem

Messsystem, das Sensoren verwendet, die unter Nutzung der Massenträgheit Beschleunigungen und Drehungen messen.

Durch eine doppelte Integration von Beschleunigungen aller Raumachsen kann unter Berücksichtigung der Komponenten der Schwerebeschleunigung die Lageveränderung eines Inertial-Messsystems bestimmt werden. Die Orientierung der Raumachsen wird durch Integration der Drehraten bestimmt.

Zerovelocity-Update-Points (ZUPT)

Punkte, an denen ein Inertial-Messsystem ruht, um die Achsorientierung und Sensorparameter prüfen zu können.

Geodaten-gestützte Positionsbestimmung (Map Matching)

Bestimmen der Netzposition durch Einpassen einer oder mehrerer Landmarken.

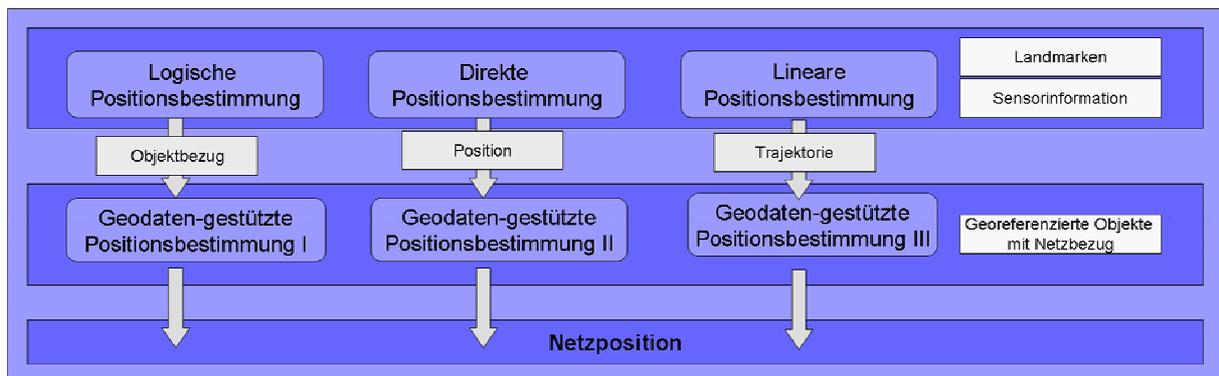


Abbildung 2-6: Geodaten-gestützte Positionsbestimmung zur Bestimmung der Netzposition

Geodaten-gestützte Positionsbestimmung I

Bestimmen der Netzposition über eine logische Zuordnung zu Objekten mit Netzbezug.

Beispiel: Logische Position eines Fahrzeugs wurde erkannt, indem die Ortsidentität mit einer Adresse erkannt wurde. Die Meldung des Standortes eines Pannenfahrzeugs hat häufig diese Struktur. Mit der Technik der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung kann nun die Adresse auf das Straßennetz abgebildet werden, sofern die Information über das Adresssystem auf das Netz abgebildet wurde.

Geodaten-gestützte Positionsbestimmung II

Bestimmen der Netzposition über einen geometrischen Vergleich im identischen KBS.

Ein Beispiel für einen einfachen geometrischen Vergleich ist die Funktion „Wähle nächstliegendestes Objekt“, die über einen Fangkreis realisiert ist. Liegt eine direkte Positionsbestimmung über GPS vor und liegen die Netzobjekte im identischen KBS vor, so kann die Geodaten-gestützte Positionsbestimmung II über eine einfache Abbildung erfolgen und anschließend die Position ins Objekt-KBS des entsprechenden Straßenelements transformieren.

Geodaten-gestützte Positionsbestimmung III

Bestimmen der Netzposition durch die Abbildung zweier linearer KBS aufeinander.

Die Information über die Netztopologie wird genutzt, um eine geeignete Kombination von Netzobjekten zu finden, die ein Lineares KBS bilden, in das die aufgezeichnete Trajektorie eingepasst werden kann. Um die Auswahl der Netzobjekte einzuschränken, wird häufig über direkte Positionsbestimmung geringerer Genauigkeit ein räumlicher Filter gebildet. Die bei-

den linearen KBS werden aufeinander abgebildet, indem identifizierbare Landmarken oder weitere Eigenschaften der Trajektorie (z.B. Krümmungsband) verglichen werden. Diese Methode bietet den Vorteil, dass Parameter von Streckenmesssensoren bei der Bestimmung der Transformationsparameter mit geschätzt werden können.

Karteneinpassung

Einpassung der mit Sensoren gemessenen Fahrzeugtrajektorie auf das im digitalen Raum erfasste Straßennetz, um die Position des Fahrzeugs im digital beschriebenen Raum zu bestimmen (nach CZOMMER 2001).

Es ist also ein Verfahren zur Positionsbestimmung in Straßennetzen durch die Verwendung von Geometrie-Information. Die Karteneinpassung ist als ein Sonderfall der lokalen Geodaten-gestützten Positionsbestimmung III zuzuordnen.

2.5 Objektdefinitionen für den ÖPNV

Berücksichtigung fanden bei der Definition dieser Begriffe diverse Datenmodelle, Standards und Standardentwürfe. Als wichtigste Quellen dienten: Transmodel 2001 (EU-Standardisierungsentwurf), ISO 19134 (Multimodal location based services), ISO 14825 (GDF), VDV 1996 und VDV 1999/1.

Haltepunkte

Orte, an denen Passagiere in Fahrzeuge einsteigen oder aussteigen.

Die Haltepunkte können als Pflichthalte (Fahrzeug muss immer halten) oder Bedarfshalte (Fahrzeug kann ohne Halt weiterfahren, wenn kein Fahrgast aus- bzw. einsteigen will) definiert werden. Bei Bus-Haltepunkten ist der Bedarfshalt der Normalfall.

Haltestelle

Eine Haltestelle besteht aus einem oder mehreren Haltepunkten und besitzt einen eindeutigen Namen.

In der Regel existiert an einer Bushaltestelle pro Fahrtrichtung ein Haltepunkt. In einer existierenden Modellvariante werden die Haltepunkte in Haltebereiche gegliedert.

Haltebereiche

Gruppen von Multimodalen Punkten innerhalb eines Multimodalen Knotens.

Teilstrecken

Durch den ÖPNV bediente Verbindungen zwischen zwei Haltepunkten, zwei Haltestellen oder auch zwischen Haltestelle und Haltepunkt.

Haltepunktverbindungen

Durch den ÖPNV bediente Verbindungen zwischen zwei Haltepunkten.

Haltepunktverbindungen sind eine Teilmenge der Teilstrecken.

Route

Eine geordnete Liste von Haltepunkten. Die Verbindung zwischen den aufeinanderfolgenden Haltepunkten ist eindeutig einer Teilstrecke zugeordnet.

Eine Route enthält keinen zeitlichen Bezug.

Linie

Eine Gruppe von Routen, die eine gemeinsame Bezeichnung haben.

Innerhalb dieser Gruppe werden häufig sogenannte Stammrouten definiert, die den Hin- und Rückweg einer Linie beschreiben.

Kurs

Eine Route, der eine Startzeit und ein Muster von Fahrzeiten zwischen den Haltepunkten zugeordnet ist.

Fahrt

Bewegung eines Fahrzeugs auf einem ihm zugewiesenen Kurs.

Trajektorie

Zeitlich geordnete Liste von Orten, die ein Fahrzeug zurücklegen soll bzw. bereits zurückgelegt hat.

Entlang einer Trajektorie kann ein lineares KBS definiert werden.

Zwischenpunkte

Orte, die den Weg entlang einer Teilstrecke definieren.

Zwischenpunkte können verschiedene Ausprägungen haben: Knotenpunkte des Verkehrsnetzes, Konturpunkte, Wegpunkte, Punkte mit Bedeutung für den ÖPNV wie zum Beispiel der Standort einer Bake.

Knoten

Objekt, das Verkehrsstrassen begrenzt.

An Knoten ist der Wechsel von Verkehrsstrassen innerhalb eines Verkehrsnetzes möglich.

Verkehrsstrasse

Lineares Objekt, das dafür vorgesehen ist, dass sich darauf Personen oder Verkehrsmittel bewegen.

Verkehrsstrassen sind in der Regel Straßenelemente (Road Elements siehe ISO14825) oder Schienelemente. Falls ein Radwegenetz explizit existiert, sind Radwege als separate Verkehrsstrassen zu erfassen.

ÖPNV- Vorzugsstraßennetz

Straßennetz mit entsprechender Netztopologie, auf dem Routen berechnet werden können, die in der Realität von Fahrzeugen des ÖPNV gefahren werden können.

Das Vorzugsstraßennetz ist abhängig vom Fahrzeugtyp. Bedarfsverkehre im ländlichen Raum verwenden in der Regel Kleinbusse, so dass die Netztopologie weitgehend mit den handelsüblichen Straßennetzen der Navigationssysteme zusammenfällt.

Konturpunkt

Ort, der die Form einer Verkehrstrasse zwischen zwei Kreuzungen festlegt.

Wegpunkt

Ort, den ein Navigationssystem nutzt, um eine Fahrzeugtrajektorie festzulegen.

2.6 Positionsbestimmung im ÖPNV

Die automatisierte Bestimmung der Fahrzeugpositionen im ÖPNV auf Straße und Schiene ist eine wichtige Grundlage im ÖPNV. Die Position ist eine wichtige Information für die Steuerung unterschiedlicher Prozesse. Die höchsten Anforderungen an die Qualität der Positionsbestimmung wird gefordert, wenn es sich um sicherungstechnische Aspekte handelt. Da in sicherungstechnischen Konzepten des Schienenverkehrs in der Regel die Technik der Positionsbestimmung inhärent ist, würde die Einbeziehung dieses Bereichs entsprechend umfangreiche Betrachtungen erfordern. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt jedoch auf den dispositiven Aufgaben des RBL und somit wird genau dieser Anwendungsbereich der Positionsbestimmung vorrangig betrachtet. Dies schließt nicht aus, dass die erreichbare Positionsgenauigkeit der dargestellten Positionsbestimmungsverfahren nicht ausreichend ist, um sie in Sicherheitskonzepte zu integrieren. Der Nachweis kann in dieser Arbeit jedoch nicht geführt werden.

Ausgehend von dem Ansatz, dass der Regelbetrieb linienbezogen verläuft, sind die Datenstrukturen der RBL linienbezogen aufgebaut. Positionsbestimmungsverfahren für RBL wurden folglich ebenfalls linienbezogen entwickelt, da hier die im Fahrzeug vorhandene Sensorik der Streckenmessung ausreichend ist. Der verwendete Begriff Ortung ist im ÖPNV gängige Terminologie, die an dieser Stelle übernommen wird und mit dem Begriff Positionsbestimmung synonym gesetzt wird.

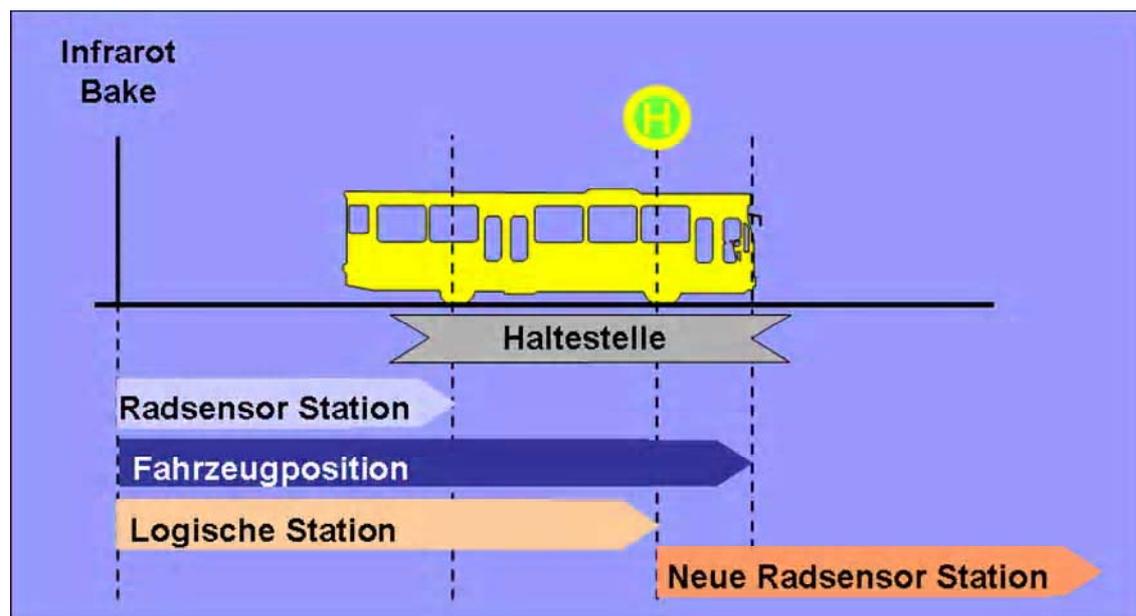


Abbildung 2-7: Physikalische und Logische Ortung (nach VDV 2001)

Physikalische Ortung

Lineare Positionsbestimmung mittels einer aktiven Landmarke (Bake), die dem Fahrzeug seine Identifikation und ggf. Ortsinformation übermittelt.

Die Physikalische Ortung entspricht einer Logischen Positionsbestimmung, bei der die Lageidentität mit einer aktiven Bake zu einer direkten Zuordnung des Orts auf der Linie führt.

Da der Fehler der Streckenmessung mit zunehmender Distanz größer wird, ist es notwendig, die Streckenmessung in bestimmten Intervallen zu stützen. Die Korrektur der Streckenmessung ist bei der Physikalischen Ortung durch ein Bakensystem realisiert. Beim Passieren einer Bake wird die korrekte Kilometrierung für die entsprechende Linie an das Fahrzeug gesendet. Die straßenseitige Infrastruktur der Baken wird in der Regel über Akkubetrieb mit der Option der Aufladung über Solarzellen versehen.

Logische Ortung

Lineare Positionsbestimmung, die aus gemessenen Haltepunkt-Positionen und den entsprechenden Wegdifferenzen durch den Vergleich mit gespeicherten Haltepunktabständen die Position ermittelt. Die Logische Ortung basiert auf einem linearen KBS.

Die logische Ortung enthält zwei Positionsbestimmungsverfahren. Beiden Verfahren gemeinsam sind die Messung der Strecke entlang einer Linie und die Untergliederung der Streckenmessung an Haltepunkten. Mittels der Haltstellen-Feststellbremse oder des Türöffnungssignals wird erkannt, ob sich das Fahrzeug an einer Haltestelle befindet.

Das erste Verfahren prüft anhand der gemessenen Strecke, ob die Position im Toleranzbereich um einen Haltepunkt liegt. Ist dies der Fall, so kann das Sollmaß der Strecke für diesen Haltepunkt zur Korrektur verwendet werden. In obigen Kontext ist dieses Verfahren als eine positionsabhängige Detektion einer Landmarke einzuordnen.

Das zweite Verfahren identifiziert den Haltepunkt aus dem Muster der Wegdifferenzen zwischen den bereits angefahrenen Haltepunkten und dem erfassten digitalen Raum. Somit kann das System, auch wenn z.B. durch einen Umweg die Ortung der Haltestelle außerhalb des Toleranzbereichs liegt, nach einigen Halten wieder auf der Linie aufsetzen. Das RBL-System der Stuttgarter Straßenbahnen AG verwendet zum Beispiel eine Folge von fünf Haltepunkten für diesen Abgleich. Dieses Verfahren ist der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung III zuzuordnen, bei der zwei lineare Systeme entsprechend der Logik der Haltestellenfolge optimiert aufeinander abgebildet werden.

Satellitenbasierte Positionsbestimmung

Positionsbestimmung anhand von Messungen zu Satelliten

Das vorwiegend genutzte satellitenbasierte Positionsbestimmungsverfahren ist das Global Positioning System (GPS), das durch das amerikanische Verteidigungsministerium betrieben wird. In Zukunft soll das europäische Galileo Projekt eine ähnliche Funktionalität bereitstellen.

Die Ortungsverfahren GPS und DGPS sind in der Literatur hinreichend beschrieben (z.B. MANSFELD 2004, BAUER 2003) und werden als bekannt vorausgesetzt. Die Steigerung der Genauigkeit der satelliten-gestützten Verfahren durch die Differenzbildung mit einer stationären Messstation beim Einsatz im ÖPNV ist naheliegend, da ein Kommunikationskanal zum Fahrzeug bereits vorhanden ist. Die Untersuchungen, ob GPS/DGPS den Genauigkeitsanfor-

derungen des ÖPNV entspricht, wurden im Wesentlichen in der Zeit vorgenommen, in der die Differenzbildung einen wesentlichen Genauigkeitssprung erlaubte. Die für die eine ungenauere Positionsbestimmung verantwortliche Selected Availability (SA) ist seit Mai 2000 vom US-Militär abgeschaltet. Die Differenzbildung bewirkt heutzutage eine etwas zuverlässigere Ortung. Eine Steigerung der Genauigkeit der Positionsbestimmung durch DGPS ist noch signifikant, für viele Anwendungen jedoch nicht mehr notwendig.

In MACHALEK 1999 wird die Genauigkeit in der Untersuchung eines RBL-Herstellers in Bezug zu verschiedenen Anwendungen dargestellt. Der Genauigkeitsbereich liegt hier je nach Integration des DGPS mit weiterer Ortungssensorik zwischen 10 und 50 Metern. Ein Feldtest in Bochum erbachte eine Genauigkeit von ± 5 m in 95% der Ortungsfälle. Die Genauigkeit von ca. 5 Metern für ein DGPS System wird auch in REUPKE (1998) als erreicht bezeichnet. Gleichzeitig beschreibt dieser Artikel, dass 5 Meter die Anforderung eines Verkehrsunternehmens an die Ortungsgenauigkeit für Busse in der RBL-Anwendung ist.

Durch den Ausbau des GPS-Systems und die Entwicklung in der Signaltechnik konnte in den letzten Jahren ein deutlicher Anstieg der Verfügbarkeit von Satelliten verzeichnet werden. Dadurch, dass nun auch schwächere z.T. reflektierte Signale mit aufgenommen werden können, besteht beispielsweise die Möglichkeit, dass in einem Wald GPS-Messungen mit hinreichender Genauigkeit erfolgen können.

Die Vorteile der GPS/DGPS-Ortung, die verbesserte GPS-Empfangstechnik und auf dieser Technik basierende Referenzsysteme haben dazu geführt, dass in diversen RBL neueren Datums GPS als Ortungssensor in den Straßen-Fahrzeugen enthalten ist (REUPKE 2001, INIT 2004). Eine umgesetzte Funktionalität zeigt die GPS-Position des Fahrzeugs auf einer Karte an, sobald der Linienweg verlassen wird. Auch wird GPS/DGPS bereits genutzt, um in Kombination mit einem integrierten Ortungsmodul (Kombination mit logischer Ortung) die Baken für die LSA-Beeinflussung zu ersetzen.

GPS/DGPS liefert im Wesentlichen Koordinaten im Referenzsystem WGS 84. Wie in MACHALEK (1999) ausgeführt wird dieses Ortungsverfahren erst dann interessant, wenn es durch andere Sensoren gestützt wird. Auch REUPKE (2001) weist darauf hin, dass die hohe Genauigkeit, die zur Priorisierung der LSA für den ÖPNV notwendig ist, nur über eine Kombination mit der Logischen Ortung erreicht werden kann. Darüber hinaus ist in jedem Fall noch der Schritt zu vollziehen, dass diese Ortsangabe in den Objektkontext der Anwendung transferiert wird. Konkret bedeutet dies, dass der Ort auf der gegebenen Soll-Trajektorie des Fahrzeugs zugeordnet wird. Die hier genannten Fachberichte dokumentieren, dass das Positionsbestimmungssystem GPS nicht die Gesamtheit der Anforderungen einer Fahrzeugortung für ein RBL erfüllt. Die in der Praxis implementierten Positionsbestimmungssysteme beinhalten stets komplexere Positionsbestimmungsmethoden als die Nutzung einer einzelnen aktuellen GPS-Koordinate.

3 Funktionsanalyse eines RBL und GeoRBL-Realisierung

Das Anwendungsspektrum eines RBL wird durch die Beschreibung einiger wichtigen Funktionalitäten beschrieben. Deren Anforderungen an den Geodatenbestand in einem GeoRBL und für die Geodaten-gestützte Positionsbestimmung werden beschrieben. Eine weitgehend vollständige Darstellung der RBL-Funktionalität wird anschließend durch einen Funktionsbaum vorgenommen. Anhand dieses Funktionsbaums wird durch die Definition von Elementarfunktionen, die der Funktionalität von GIS-Systemen entnommen ist, und deren potentielle Integration in den RBL-Funktionenbaum die Grundlage geschaffen, um den Einfluss der Integration von GIS-Funktionalität ins RBL abzuschätzen. Daraus wird das Innovationspotenzial abgeleitet und bewertet, das durch die Ergebnisse der prototypischen Umsetzung eines GeoRBL validiert wird.

3.1 Anwendungs- und Anforderungsbeschreibung

3.1.1 Anwendungsszenarien

Die bereits in der Motivation (Kapitel 1.1) skizzierten Szenarien werden weiter ausgeführt. Sie sind an aktuellen Problemstellungen orientiert und sollen den Rahmen für die Funktionalitäten bilden, die speziell durch das GeoRBL unterstützt werden sollen. In den ersten zwei Szenarien ist das Thema der routenflexiblen Disposition der Kerninhalt. Das dritte Szenario befasst sich mit der Priorisierung von Lichtsignalanlagen für den ÖPNV und zielt auf das Thema der autonomen Positionsbestimmung ohne spezielle streckenseitige Infrastruktur.

Das Unterscheidungskriterium der ersten beiden Anwendungsszenarien ist der Ausgangszustand der disponierten Fahrt. Im ersten Fall ist es der Regelbetrieb des Linienverkehrs, der über das Ereignis eines Störfalls beeinflusst wird. Im zweiten Szenario wird im Rahmen einer flexiblen Bedienungsform beim Ereignis der Buchung eines Mobilitätswunsches ein Kurs erstellt bzw. angepasst. In beiden Fällen muss der Fahrer des Fahrzeugs über seinen neuen bzw. geänderten Routenverlauf informiert werden. Ein Fahrerassistenzsystem, das das Finden der Route unterstützt, z.B. durch ein Navigationssystem, ist insbesondere für Fahrer mit begrenzter Ortskenntnis vorteilhaft.

Die Anforderungen an die Ortungsgenauigkeit in einem RBL werden in der Literatur (ALBERT (1999), BLIC (1999), REUPKE (1998)) aus der Diskussion der Einführung der Positionsbestimmung über GPS/DGPS mit 5 Metern angegeben. Es wird dabei allerdings keine Aussage dazu gemacht, welches Genauigkeitsmaß (Toleranz oder Standardabweichung) konkret mit diesem Zahlenwert verbunden ist.

3.1.1.1 *Störfallmanagement*

Das Störfallmanagement ist ein wesentlicher Bestandteil der Funktionalität eines RBL. Ausgehend von der permanenten Überwachung des Ist-Zustandes können Abweichungen/Störungen von der geplanten Betriebslage erkannt und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

In einer Untersuchung im Rahmen des Projektes RUDY wurden von DOBESCHINSKY UND TRITSCHLER (2003) die Störungen und die darauf folgenden Dispositionsmaßnahmen im Jahr 2001 im Bereich der Stadtwerke Ulm erfasst und kategorisiert. Eine Datenbasis von 1939 Störungen an 365 Tagen liegt vor. Es ergibt sich ein Tagesschnitt von 5,3 Störfällen in einem Bereich von 0 bis 16 Vorkommnissen. Einen Großteil der als Störung definierten Vorfälle, die

in der Leitstelle ankamen, waren rein technischer Natur und hatten keine unmittelbaren Auswirkungen auf Fahrgäste oder den Fahrzeugumlauf. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurde zur Untersuchung eine Teilmenge von 325 Störfällen definiert.

Lediglich 20 % dieser Fälle hatten keine aktive Disposition zur Folge und es kam zu Verspätungen. In 64 % der Fälle wurden Kurse vollständig oder teilweise gestrichen. Bei der Dispositionsmaßnahme Kurswende, die in 2 % der Fälle angewandt wurde, wendet das Fahrzeug und bedient einen Kurs der Gegenrichtung. Das Ergreifen der Maßnahmen Umleitung (10 %) und Schienenersatzverkehr (4 %) ist jeweils mit der Definition eines neuen Fahrweges für einen Bus mit Fahrgästen verbunden. 14 % der Maßnahmen führten zu einer Änderung des Fahrweges, bei der Fahrgäste einen geänderten Linienverlauf erlebten.

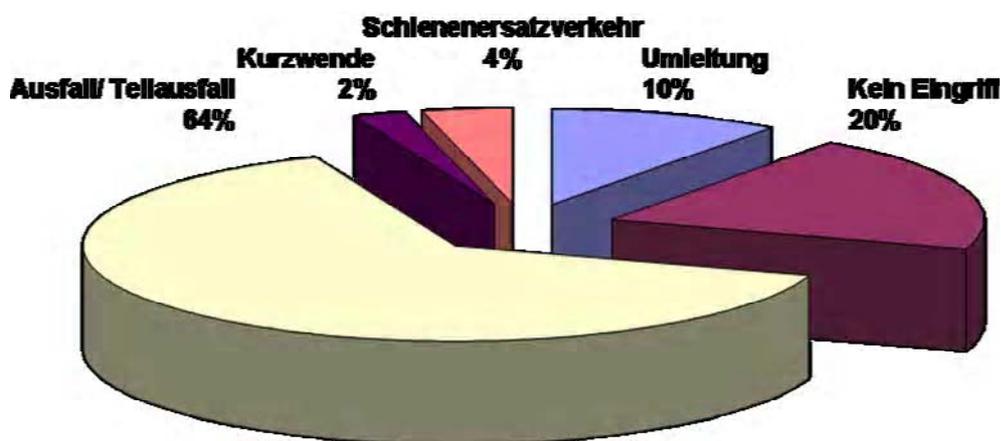


Abbildung 3-1: Störfallstatistik (nach TRITSCHLER ET AL. 2005)

Die Untersuchung bestätigt, dass die Veränderung des Linienweges eine Maßnahme ist, die im Störfallmanagement einsetzbar ist und genutzt wird. Die Disposition der Fahrzeuge kann in zwei Klassen geteilt werden, zum einen die Einsatzfahrten vom Depot oder Kursende (i.d.R. Endhaltestelle) zum Beginn des neuen Kurses, zum anderen die Umleitungsfahrten, die mit Fahrgästen im Fahrzeug durchgeführt werden. In beiden Fällen wird der Fahrweg der Fahrzeuge geändert. Der Disponent nutzt derzeit seinen Erfahrungsschatz und ggf. Fahrzeiten aus dem Fahrplan, um für die räumliche Entfernung eines neu definierten Fahrweges die Fahrzeit abzuschätzen, die mit den zeitlichen Rahmenbedingungen des Fahrplans, der Umlaufplanung und der Fahrerdisposition abzugleichen ist.

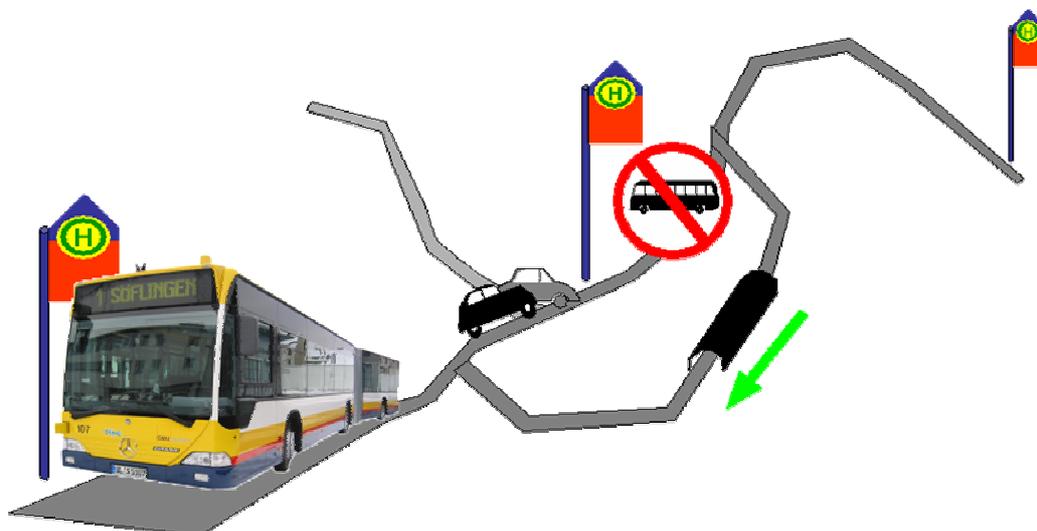


Abbildung 3-2: Störfall-Szenario mit Umleitungsmaßnahme

Anhand folgender Ablaufbeschreibung, die auf einem Störfall beruht, wie er in Abbildung 3-2 zu sehen ist, sollen derzeit technische Hemmnisse sowie Anforderungen an eine GeoRBL aufgezeigt werden. Im Verlauf einer Linie hat sich ein Störfall ereignet. Der Disponent nutzt eine parallele Straßenverbindung aus, um den Bus umzuleiten. Dabei ergeben sich Informationsanforderungen, die unter Verwendung konventioneller RBL-Technik allein durch den Erfahrungsschatz und aktives Nachfragen des Disponenten abgedeckt werden müssen.

Die Zuordnung des Störfalls zu den betroffenen Linien hat zu erfolgen. Somit besteht die Anforderung, dass sowohl der Störfall als auch der Linienweg für ein GeoRBL geocodiert sein muss.

Mögliche Umleitungsrouten müssen gegeneinander abgewogen werden. Dazu besteht die Anforderung, dass eine Anzeige der Umleitungstrecken visualisiert werden soll. Erfolgt dies auf der Basis einer Kartendarstellung, so ist die Fähigkeit des Disponenten zur Karteninterpretation zu nutzen.

Aus dem dem Störfall-Management zugrunde liegenden Regelbetrieb ergibt sich die Forderung, dass die Routen aller Busse durch die Angabe der Haltepunkte und der Teilstrecken beschrieben sein müssen.

Sofern keine Umwegrouten vorliegen, müssen diese ermittelt werden. Bei einer automatisierten Unterstützung erfordert dies ein digitales Straßennetz, das die speziellen Fahrbeziehungen von ÖPNV-Fahrzeugen berücksichtigt. Durch einen Routing-Algorithmus kann der Fahrweg bestimmt oder die interaktive Festlegung der Umwegroute unterstützt werden.

Da ein Straßennetz mit ÖPNV-Fahrbeziehungen nicht marktverfügbar ist, bestimmt der Disponent interaktiv die Umwegroute. Anhand seiner Ortskenntnisse kann der Disponent entscheiden, ob die anhand von Wegpunkten beschriebene Route für einen Bus befahrbar ist. Diese Interaktion durch den Disponenten schließt nicht nur die Passierbarkeit der gewählten Straßenelemente mit ein, sondern auch die Abbiegevorgänge entlang der Trasse. Da der Disponent ohnehin die maßgebliche Instanz der Wegdefinition ist, können die Forderungen nach einem korrektem ÖPNV-Straßennetz und einem adäquatem Routing-Algorithmus durch die interaktive Festlegung teilweise kompensiert werden. Zur Unterstützung des Disponenten können jedoch Straßen, die für den Busverkehr nicht geeignet sind, im Vorfeld entnommen werden. Das so entstandene Busvorzugsstraßennetz kann auch mit Warnhinweisen versehen werden, wenn durch die Disposition das Passieren eines Straßenabschnittes für Busse gewählt wird, der für den Fahrzeugtyp nicht freigegeben wurde.

Die Fahrzeiten für potenzielle Umwegrouten werden abgeschätzt. Hierzu ist eine Reisezeitschätzung auf dem Straßennetz vorzunehmen. Für den ungestörten Verkehrsfluss können zuverlässige Reisezeitschätzungen auf digitalen Straßennetzen vorgenommen werden. Insbesondere bei Störfällen, die den Verkehrsfluss erheblich beeinflussen, wären aktuelle Verkehrsinformationen zur Reisezeitbestimmung hilfreich. Diese liegen jedoch im kommunalen Bereich selten vor.

Die durch die Umwegroute betroffenen Haltepunkte sind für die Fahrgastauskunft zu bestimmen. Der Abstand der Lage der Haltepunkte zur Trasse sollte einen definierten Grenzwert nicht überschreiten, da die Haltepunkte, die entlang einer Umleitung und dem nicht mehr bedienten Linienabschnitt liegen, durch eine Bufferanalyse ermittelt werden. Die Anforderung, die im Projekt konkret gestellt wurde, verlangt, dass die Position der Haltepunkte innerhalb von 10 Metern neben der Trasse liegt. Mit dieser Forderung wird die Lage der Haltepunkte in

Relation zum vorliegenden Straßendatensatz definiert. Daher ist ggf. auch der Straßendatensatz nachzuarbeiten, wenn z.B. ein Haltepunkt auf einem Vorhof einer Schule liegt und folglich die geographisch korrekte Lage des Haltepunktes eine Berücksichtigung des Haltepunktes entlang der Straße nicht ermöglicht. Es ist außerdem notwendig, die Haltepunkte mit der Information zu versehen, auf welcher Straßenseite sie sich befinden. Eine adäquate Forderung ist, dass die Abfahrtsrichtung der Busse (Azimut) an jedem Haltepunkt anzugeben ist. Diese Richtungsangabe eignet sich auch zur kartographischen Darstellung der Haltepunkte.

Dem Fahrer der Fahrzeuge ist über Sprechfunk die Umleitungsstrecke mitzuteilen. Es ist über kontrollierten Dialog sicherzustellen, dass der Fahrer die Anweisung richtig verstanden hat.

Folgt der Fahrer der Umleitungsstrecke, so liefern linienorientierte Positionsbestimmungsverfahren keine korrekte Position mehr. Ein autonomes linienunabhängiges Positionsbestimmungssystem ist zu implementieren.

Die Verfolgung des Fahrzeugs auf dem Umweg kann über die konventionelle Positionsbestimmungstechnik nicht erfolgen, da die Strecken der Umleitung in der Regel für die logische Ortung nicht vermessen sind. Es ist vom Disponenten zu beachten, dass die Fahrzeugposition ggf. in der Anzeige eine bestimmte Zeit lang falsch angezeigt wird. Über entsprechende Technik kann der Disponent die Fahrgäste im Fahrzeug und an Haltestellen über Lautsprecher informieren.

3.1.1.2 Routenflexible Bedienungsformen im Bedarfsverkehr

In ländlichen Gebieten sind wegen der generell geringen Verkehrsnachfrage, die darüber hinaus noch zeitlich und räumlich stark variiert, Linienverkehre häufig nicht wirtschaftlich (BUSCH ET AL 2004). Eine höhere Wirtschaftlichkeit wird in diesen Fällen von flexiblen Bedienformen erwartet. Die unterschiedlichen Ausprägungen wie Anrufsammeltaxi, Linienbandverkehr, Rufbus, usw. haben die Charakteristik, dass sie nicht auf definierten Linien fahren, sondern geeignete Kurse wählen, um dem Bedarf möglichst wirtschaftlich gerecht zu werden. MEHLERT (2001) zeigt einige Projekte auf, in denen flexible Betriebsformen eingeführt wurden.

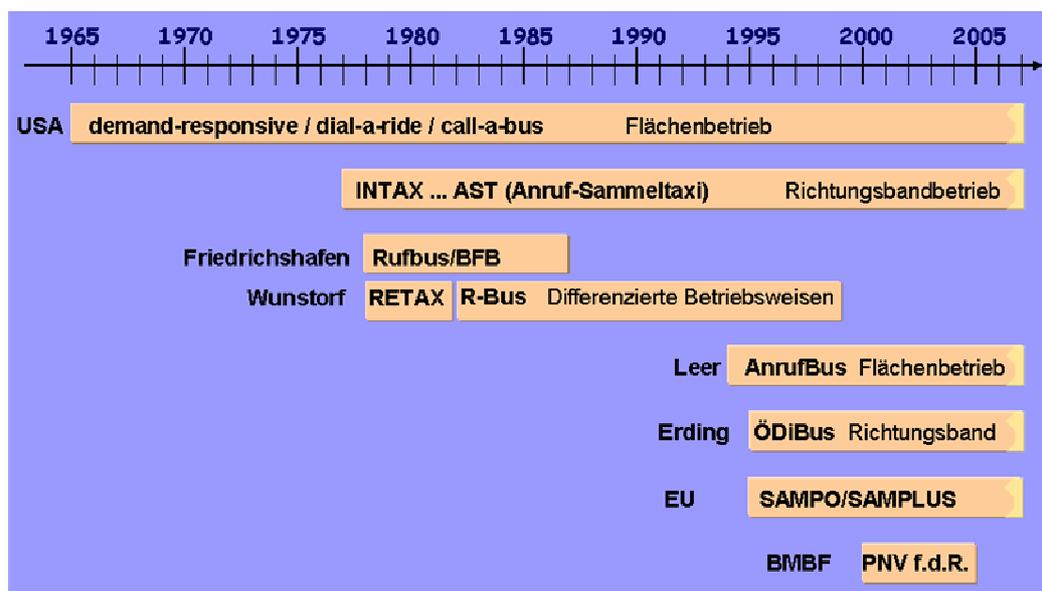


Abbildung 3-3: Übersicht über Bedarfsverkehr-Projekte (nach: Kieslich 2004)

Kieslich (2000) beschreibt u.a. in seiner Veröffentlichung „Betriebsleitsystem im ÖPNV des ländlichen Raumes“ die Leittechnik für Bedarfsverkehre. Bereits die ersten Inbetriebnahmen wie der Rufbus in Friedrichshafen (siehe Abbildung 3-3) weisen eine Funktionalarchitektur (Ortung, Kommunikation Fahrzeug-Zentrale, Tourenoptimierung, ...) auf, die in der Entwicklung der Systeme weitgehend unverändert geblieben ist. Die technologische Weiterentwicklung von Hardware, Software und insbesondere Kommunikationstechnik lassen jedoch andere Systemarchitekturen zu. Insbesondere sind die Marktfelder, die Bedarfsverkehre abdecken können, heutzutage klarer abgegrenzt.

Die Anforderungen und Hemmnisse eines traditionellen RBL sollen am konkreten Beispiel der Flexiblen Bedienform des Projektes Rudy erläutert werden. In der Region nördlich von Ulm soll in zwei Gebieten ein bedarfsorientierter Linienbandverkehr eingerichtet werden, der über die Internet-Plattform der Elektronischen Fahrplanauskunft (EFA) und ein Call-Center gebucht werden kann. Im Anschluss an den regulären Linienverkehr sollen Linienbusse mit einem Rahmenfahrplan noch zusätzliche Beförderungsanfragen in einem Korridor bedienen. Über eine automatisierte Disposition sollen für die entsprechenden Kundenwünsche die Routen geändert werden.

Für den Betrieb der flexiblen Bedienform sind umfangreiche Rahmenbedingungen zu beachten. Betriebliche Parameter ergeben sich aus den Bereitstellungszeiträumen der Fahrzeuge und der Personalverfügbarkeit, ggf. eines Rahmenfahrplans und insbesondere der Zeiträume, die offen gehalten werden, um kurzfristige Buchungen noch annehmen zu können. Durch den projektspezifischen Rahmen können diese Parameter, die einen wesentlichen Einfluss auf die Disposition haben, unberücksichtigt bleiben.

Die automatisierte Disposition arbeitet mit Zeitrelationen und nicht mit metrischen Entfernungen oder Georeferenzen. Grundlage für die automatische Disposition einer Buchung ist eine berechnete Reisezeitmatrix zwischen allen Haltepunkten des Bedienungsgebiets (GUBLER UND SCHEFFLER 2002). Verkehrsnetz-Daten mit der entsprechenden Attributierung (ÖPNV-Vorzugsstraßennetz) stellen unter Verwendung eines Routing-Algorithmus die Verknüpfung zwischen Raum und Zeit bereit. Die berechnete Route muss gewährleisten, dass alle berechneten Verbindungen von den eingesetzten Fahrzeugtypen in Realität zu befahren sind. Die Routen sind anhand von Wegpunkten zu beschreiben.

Es ist ein Vorzugsstraßennetz mit Abbiegerestriktionen zu definieren. Alle nicht passierbaren und nicht notwendigen Straßenelemente können dem Netz entnommen werden. Der Routing-Algorithmus muss die ggf. fahrzeugspezifischen Restriktionen berücksichtigen können und die Abfahrtsrichtung an Haltepunkten beachten.

Die Positionsbestimmung der Fahrzeuge ist für die Berücksichtigung von kurzfristigen Buchungen zwingend notwendig. Ebenso wird die Positionsbestimmung dazu genutzt, den Fahrtverlauf der Route zu überwachen und entsprechende Informationsangaben für Fahrer und Fahrgast automatisiert darzustellen. Eine Ermittlung der Übereinstimmung der Lage und Richtung eines Haltepunktes in der Datenbank mit der aktuellen Fahrzeugposition muss möglich sein. Diese erfordert eine Lagegenauigkeit von ca. 10-15 Metern.

Es wird eine linienunabhängige Positionsbestimmung favorisiert, da sich die Linie selbst im Verlauf einer Fahrt noch ändern kann. Konkret wird im Projekt die Positionsbestimmungskomponente eines Navigationssystems eingesetzt.

Die Zielführung über ein Navigationssystem soll den Fahrer dabei unterstützen, die durch die Buchung vorgegebene und ggf. ungewohnte Route im Bedarfsverkehr zu finden. Das Navigationssystem wird daher von der Zentrale mit entsprechenden Wegpunkten versorgt, die eine für den Bus befahrbare Route gewährleisten.

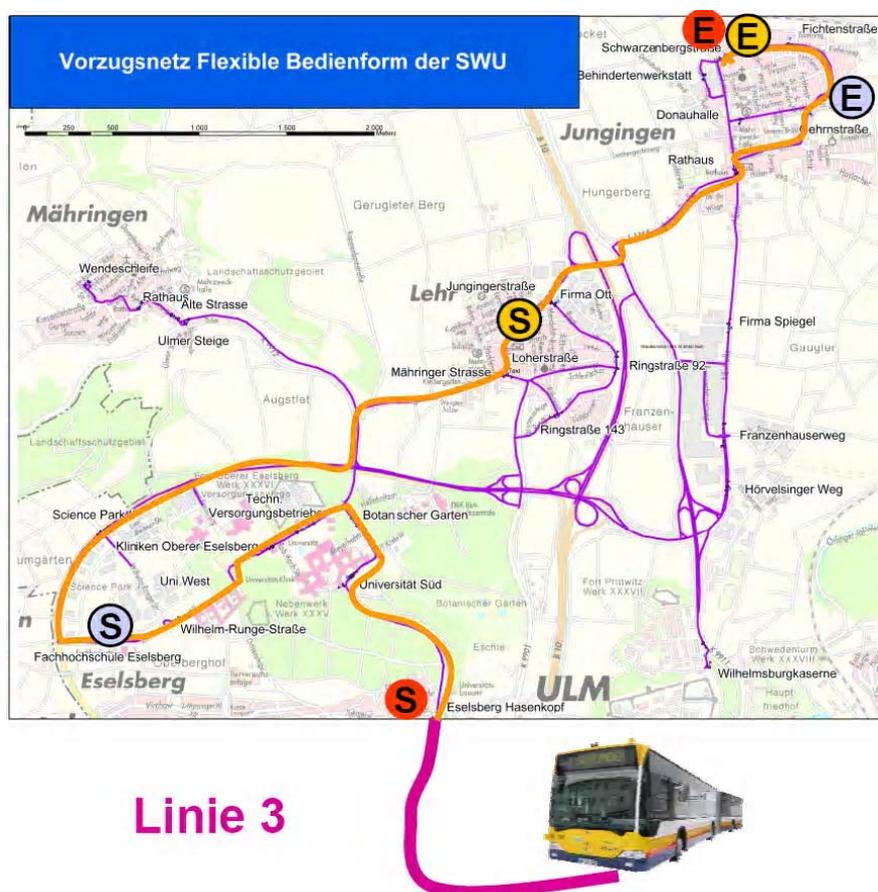


Abbildung 3-4: Fortsetzung eines Linienverkehrs als „Flexible Bedienungsform“ auf Vorzugsstraßennetz (Kartengrundlage: DING 2003)

3.1.1.3 Szenario zur Priorisierung des ÖPNV an Lichtsignalanlagen

Eine Verkürzung der Reisezeit ist nach der VDV (1997) ein wichtiges Kriterium, um die Attraktivität des ÖPNV zu steigern. Durch die Beschleunigung des ÖPNV kann sowohl die Reisezeit des ÖPNV als auch seine Pünktlichkeit gesteigert und somit auch die Anschlusssicherung positiv beeinflusst werden (VDV 2001). Eine Vielzahl von Beschleunigungsverfahren wird in VDV (2001) beschrieben. Diesem Szenario soll jedoch die effektive Methode der Priorisierung des ÖPNV an Lichtsignalanlagen (LSA) als einem Vertreter der Beschleunigungsmaßnahmen zugrunde gelegt werden. In VDV 2001 ist das Beispiel einer konsequenten Implementierung entlang einer Linie in München dokumentiert. Sie bewirkt 15 % Reisezeitersparnis für den Kunden und brachte darüber hinaus noch betriebliches Optimierungspotenzial mit sich.

Die Bevorzugung des ÖPNV lässt sich aus der Argumentation heraus rechtfertigen, dass der Besetzungsgrad der Fahrzeuge des ÖPNV höher ist als in Fahrzeugen des Individualverkehrs. Durch die Bevorzugung des ÖPNV lässt sich somit auch eine Steigerung des Durchsatzes an LSA erreichen. Dies bedarf jedoch auch einer optimierten Regelung der LSA, die rechtzeitig beim Eintreffen des Fahrzeugs an der LSA eine Grünphase beeinflusst und unmittelbar nach Verlassen des Kreuzungsbereichs den Schaltungsverlauf der LSA wieder freigibt.

Die Zuverlässigkeit und die metrische Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems des Fahrzeugs bei der Beeinflussung von Lichtsignalanlagen spielen eine herausragende Rolle. In der klassischen Positionsbestimmungsmethode (siehe Kapitel 2.6) wird straßenseitige Infrastruktur aufgebaut, um eine hinreichende Positionsbestimmungsgenauigkeit zu erreichen. Neuere Ansätze verwenden bereits DGPS in Kombination mit Bewegungssensoren, um eine bordautonome Positionsbestimmung mit hinreichender Genauigkeit zur Steuerung der LSA zu erreichen. Die bordautonome Geodaten-gestützte Positionsbestimmung hat jedoch den Vorteil, unabhängig von den Empfangsbedingungen des GPS mit gleichbleibender Qualität verfügbar zu sein.

Zur Steuerung der LSA finden in der Regel drei ortsabhängige Kommunikationsvorgänge von Fahrzeug und LSA statt. Bei der Voranmeldung und bei der Anmeldung des Fahrzeugs an der LSA ist die Genauigkeitsanforderung an die Positionsbestimmung von ca. 10 Metern (RAMM 2003) erforderlich. Die Abmeldung von der LSA sollte dagegen eine Genauigkeit von ca. 3 Metern (VDV 2001) aufweisen, damit der Kreuzungsrechner die Umlaufzeiten möglichst schnell unbeeinflusst von der ÖPNV-Priorisierung optimiert regeln kann.

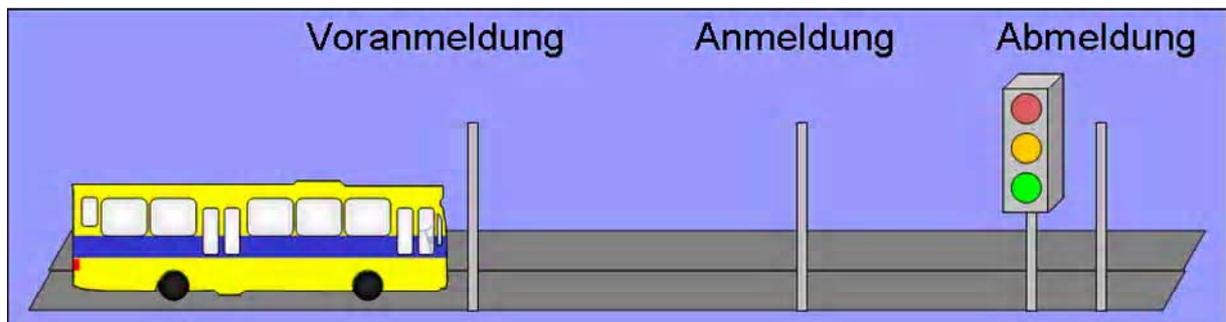


Abbildung 3-5: Anmeldepunkte einer ÖPNV-Beschleunigung

Die Verwaltung der Meldepunkte erfolgt beim Verfahren der Physikalischen Ortung über eine linienbezogene Festlegung. Eine georeferenzierte Verwaltung der Meldpunkte ist unabhängig vom Linienbezug. Eine Vervielfachung eines Meldepunkts mit der Anzahl der Routen einer Linie oder bei temporären Änderungen der Routen ist nun nicht mehr notwendig.

3.1.2 Anwendungen mit Geodaten im ÖPNV und Anforderung an die Geodaten

Bereits heute werden im ÖPNV Geodaten eingesetzt. Dieser Abschnitt soll die wichtigsten Anwendungen skizzieren, um die Erweiterung des RBL mit Geodaten an den Kontext der Unternehmensdatenstruktur anknüpfen zu können.

3.1.2.1 Planung des ÖPNV-Systems

Für die Aufgabenträger der öffentlichen Hand ist eine gesicherte Planung des ÖPNV-Systems eine politisch bedeutsame Aufgabe. Die Integration von Geodaten und GIS-Techniken in den Bereich der Planung fand in den letzten Jahren statt. Diese Entwicklung wurde von entsprechenden Forschungsprojekten (GERDING ET AL. 2003) begleitet. Die in diesen Projekten angewandten Geodaten im ÖPNV entsprechen in der Regel dem höheren Abstraktionsgrad der Planung und begrenzen sich auf Haltestellen und deren linienbezogenen Verbindungen, die mit einem Taktfahrplan korrespondieren. Der aktuelle Trend in der Verkehrsplanung, über eine mikroskopische Abbildung mittels Agenten den Verkehr zu simulieren (SCHWARZE, TALAAT 2004), bietet die Option, auch eine feinere Auflösung der ÖPNV-Netzes zu integrieren. Derzeit sind jedoch die Arbeiten noch nicht so weit fortgeschritten, dass hier ein Nutzen

aus der verfeinerten Georeferenzierung der Haltestellen auf Haltepunkte gezogen werden könnte. Die in der Praxis eingesetzten Planungswerkzeuge besitzen ebenfalls Schnittstellen zum Geodatenimport (PTV 2005).

Viele Parameter für die Planung des öffentlichen Verkehrs sind ortsbezogen. Die Verkehrsnachfrage, die ja auch in Prognosen bei der Planung der Verkehrslinien einzubeziehen ist, hängt von bodenordnerischen Planungen ab. Demographische Entwicklungen von Stadtteilen sowie die Ansiedlung von Industrie und Gewerbe beeinflussen einerseits die Verkehrsnachfrage. Sie werden aber auch andererseits durch ein entsprechendes Verkehrsangebot motiviert.

In vielen Fällen ist die Abstraktionsebene der Haltestelle für die Planung ausreichend. Die Lagegenauigkeit der Haltestelle wird in der Regel deutlich kleiner als 100 Meter sein. Ein geocodierter Linienverlauf ist nicht zwingend notwendig, wird aber in modernen Planungssystemen auf der Basis von marktgängigen digitalen Straßenkarten realisiert.

3.1.2.2 Fahrgastauskunft

Zur Steigerung der Attraktivität des ÖPNV wurde in den letzten Jahren die elektronische Fahrplanauskunft eingeführt. Bereits 1988 wurden über BTX-Technik und ab 1998 über Internet-Technik in Stuttgart durch den VVS Fahrplanauskunftssysteme eingeführt und ausgebaut. Die intermodale Fahrplanauskunft, die unterschiedliche Verkehrsmodi zur Berechnung einer optimierten Reisekette nutzt, war in den letzten Jahren ein Meilenstein in der Weiterentwicklung des Systems. Im Forschungsprojekt MOBILIST wurde dieser Ausbau begleitet und unter anderem der Aufwand für die Erfassung von Geodaten für die intermodale Auskunft in STARK UND TORLACH (2003) untersucht. Die Erfassung der Haltestellen ist weit fortgeschritten. Über einen Datenprovider werden Daten aus der Quelle, Haltestellen des ÖPNV mit Angabe des Bedienungstaktes, zur Standortplanung vermarktet (DDS 2005).

Die Lagequalität der Haltepunkte für Systeme zur Fahrgastauskunft muss der Anforderung entsprechen, dass ein Fahrgast sich im Bereich der Haltestelle anhand einer kartenähnlichen Darstellung zurechtfindet. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass ein Fahrgast zunächst anhand der Karteninformation den Straßenabschnitt suchen wird, in dem die Haltestelle verzeichnet ist. Die Minimalanforderung könnte also eine straßenabschnittgenaue Lagebestimmung der Haltestellen sein, an der noch erkenntlich sein sollte, ob die Haltestelle in Kreuzungsnähe oder eher in der Mitte des Straßenelements liegt. Diese Anforderung ist jedoch in der Praxis deutlich präzisiert. Voraussetzung ist jedoch die topologisch korrekte Lage auf dem entsprechenden Straßenelement. Die straßenseitengenaue Lage eines Haltepunktes ergibt sich aus Sicht des Fahrgastes an einer Haltestelle implizit durch die Angabe der Endhaltestelle seiner ausgewählten Linie. Die Lage von Haltepunkten, sofern diese Modellierungsstufe überhaupt als notwendig erachtet wird, kann 30 Meter oder noch mehr betragen, ohne dass die darauf aufbauende Funktionalität gefährdet ist.

3.1.2.3 Anschlusssicherung zwischen Verkehrsunternehmen

Der Datenaustausch zur Anschlusssicherung wurde in den Projekten DELFI und FOPS (BLIC 2001) vorangetrieben und bereits in Unternehmen umgesetzt. Im Projekt RUDY wurde die VDV-Schnittstelle 453 weiterentwickelt. Als Informationen mit optionalem Geodaten-Bezug werden Daten von Haltestellen und Fahrzeugen ausgetauscht. Die ausgetauschten Daten stammen aus den angeschlossenen Fahrplaninformationssystemen.

3.1.2.4 Positionsabhängige Bordrechneranzeige

Die Lagegenauigkeit, die für die Fahrerunterstützung beim Befahren der Route gefordert wird, ist auf wenige Meter zu definieren. Beim geplanten Bordsystem wird die Anzeige für den Fahrer bei der Annäherung an eine Haltestelle automatisch verändert. Informationen über das Erreichen und die Abfahrt von der Haltestelle werden an die Zentrale automatisch gemeldet. Die Haltepunktkoordinaten konnten aus der Erfassung für die Fahrgastinformation nicht mit hinreichender Sicherheit übernommen werden. Die Lagegenauigkeit der Haltepunkte muss innerhalb von +/- 15 Metern liegen.

3.2 Funktionsanalyse

3.2.1 Funktionsbaum

Die Funktionalität eines Systems lässt sich durch Teilfunktionen, die in einer Baumstruktur gegliedert sind, beschreiben. Die Funktionen weisen entsprechend der Verzweigung der einzelnen Äste unterschiedliche Komplexitäten auf. Mit dem Begriff Elementarfunktionen werden die Funktionen beschrieben, die im Rahmen des modellierten Komplexitätsgrades nicht weiter untergliedert werden. Als Wurzelfunktion wird die Ausgangsfunktion bezeichnet, die das System beschreibt. Im Rahmen dieser Arbeit werden als Stammfunktionen die Funktionen definiert, die unmittelbar der Wurzelfunktion nachgeordnet sind.

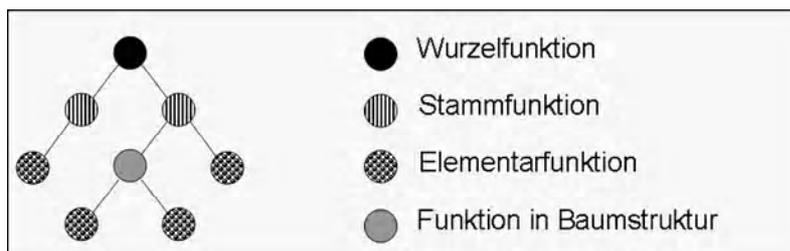
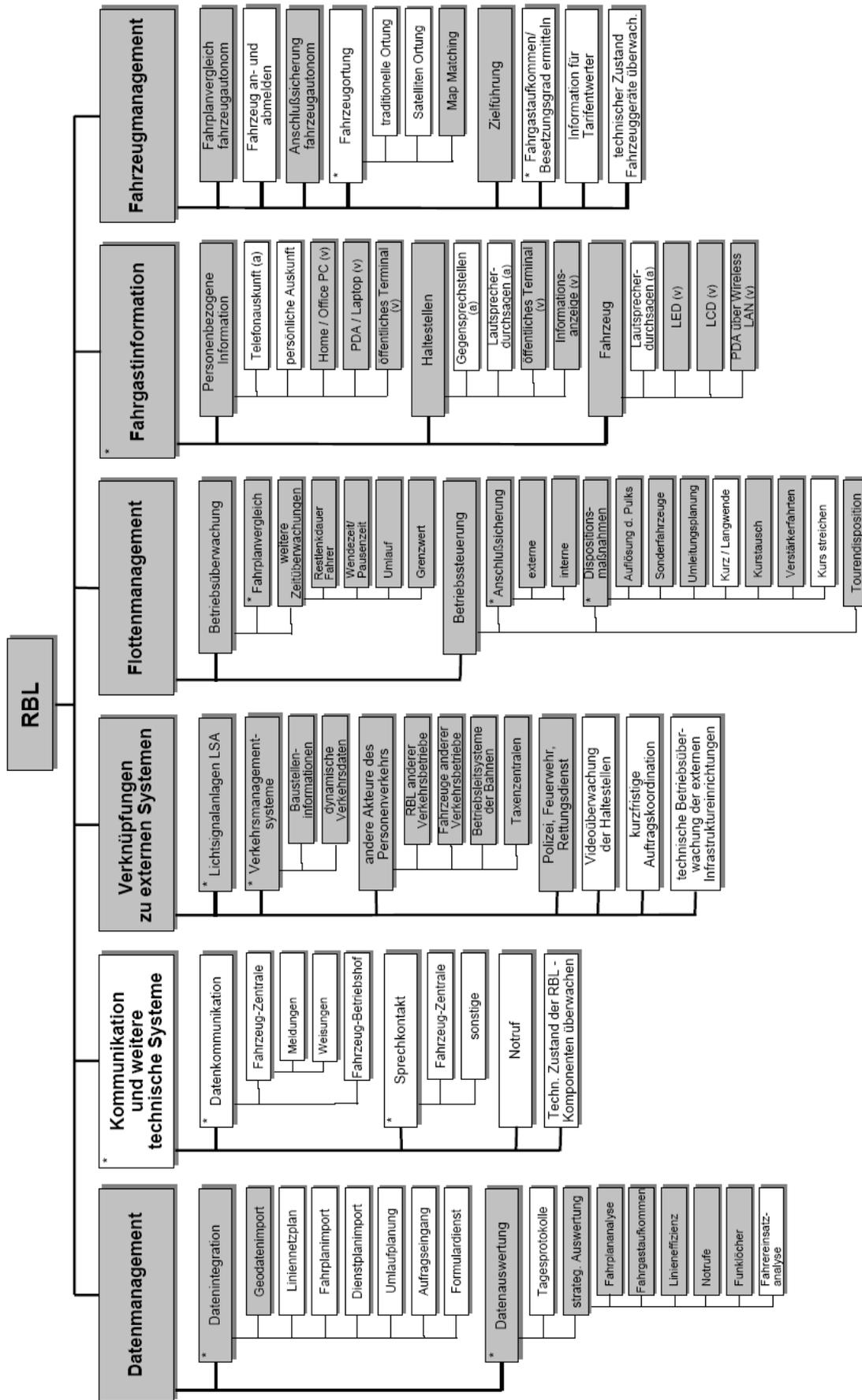


Abbildung 3-6: Elemente eines Funktionsbaums

Durch die Aufstellung eines Funktionsbaumes wurde der funktionale Umfang traditioneller RBL beschrieben (BETTERMANN UND KAUFMANN 2002 / siehe Abbildung 3-7). Die Funktionen wurden der Literatur entnommen. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der VDV-Schrift 422 (VDV 1999/2) zu, in der die grundsätzlichen Anforderungen an Automatisierungs- und Leitsysteme dargestellt sind. Auf Basis einer Literaturrecherche wurde mit den im Projekt RUDY beteiligten Systembetreibern, den Stadtwerken Ulm (SWU) und RAB (Regionalverkehr Alb-Bodensee) sowie den RBL-Herstellern INIT und Siemens der Funktionsbaum erstellt, das Ergebnis diskutiert, sukzessive optimiert und verifiziert.

Der Funktionsbaum bleibt relativ abstrakt, um ihn übersichtlich zu halten. Die Beschreibung der einzelnen Funktionen in Abbildung 3-7 ist wegen der kompakten Darstellung verkürzt, so dass die entsprechende Funktion aus der Beschreibung interpretiert werden muss (z.B. Kommunikation mit Taxiunternehmen). Um die Menge der RBL-Funktionen zu kennzeichnen, die Geodaten nutzen und somit das Potenzial bieten, durch Integration von GIS-Funktionalität beeinflusst zu werden, sind diese grau unterlegt. Die betrachteten GIS-Funktionen (siehe Abbildung 3-8), die im Funktionsbaum des RBL als Elementarfunktionen integriert werden, sind im folgenden Abschnitt erläutert. Die Ebene der Elementarfunktionen mit GIS-Funktionalität ist in der Abbildung 3-7 nicht enthalten.



Anmerkungen: Die mit * gekennzeichneten Funktionen sind klassische Funktion gemäß VDV. Die RBL-Funktionen, die Funktionen von Geoinformationssystemen verwenden können sind grau gefärbt.

Abbildung 3-7: Funktionalitäten einer RBL-Zentrale (BETTERMANN UND KAUFMANN 2002)

Zur Verdeutlichung des genutzten Begriffs der Elementarfunktion soll die Abbildung 3-8 dienen. Die Funktionenbäume von GIS und RBL werden gekoppelt, indem Funktionen aus dem GIS als Elementarfunktion im RBL-Funktionsbaum integriert werden. Die Entwicklung im Bereich der Geoinformatik stellt Techniken zur Verfügung, die unterstützt von der Tatsache, dass Basisdaten von Verkehrsnetzen auf dem Datenmarkt vorhanden sind, eine gewinnbringende Integration versprechen. Aus der Funktionalität von Geoinformationssystemen wird eine Teilmenge betrachtet, die im Funktionenbaum des RBL als Elementarfunktionen (siehe folgendes Kapitel) auftreten.

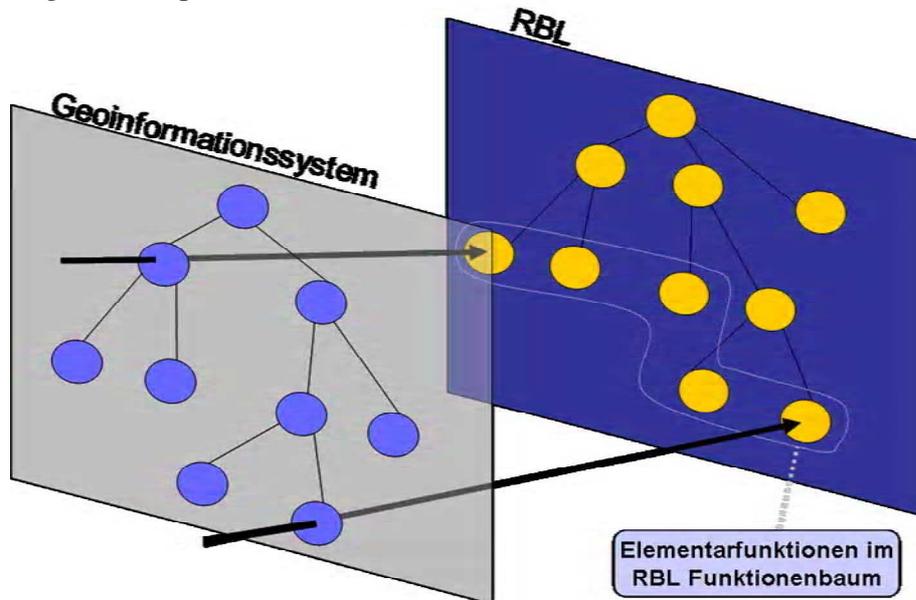


Abbildung 3-8: Schema eines Funktionenbaums mit Elementarfunktionen aus anderem System

Auf Teilfunktionen des RBL reduziert sollen die Nutzung aktueller Techniken der Geoinformatik und die daraufhin möglichen Verbesserungen dargestellt werden. Ein RBL, das die Integration von georeferenzierten Verkehrsnetzen nutzt, soll im Folgenden als GeoRBL bezeichnet werden. Als Gegenpol des GeoRBL wird das traditionelle RBL dargestellt, das auf der Basis linearer Positionsbestimmung und Datenhaltung operiert. Mischformen treten derzeit durchaus in der Praxis auf.

3.2.2 Elementarfunktionen

Folgenden GIS-Funktionen, die im RBL-Funktionsbaum als Elementarfunktionen zu integrieren sind, werden als Bewertungsgrundlage für eine Beeinflussung der Funktionalität einer RBL festgelegt:

- Georeferenzierter Datenaustausch,
- Visualisierung,
- Routing und
- Positionsbestimmung.

Diese Funktionen bilden die Basis der Gegenüberstellung eines GeoRBL mit einem traditionellen RBL (Tabelle 2-1). Sie können eine Qualitätssteigerung in den komplexeren Funktionen bewirken, die sie enthalten. Die Funktionen setzen die Verfügbarkeit von Geodaten voraus.

3.2.2.1 Georeferenzierter Datenaustausch

Beim georeferenzierten Datenaustausch können raumbezogene Positionsdaten vergleichsweise einfach zwischen den RBL-Komponenten sowie zwischen externen Systemen und dem RBL als Koordinatenangaben ausgetauscht werden. Eine wichtige Voraussetzung ist der Bezug auf ein einheitliches Koordinatenbezugssystem wie beispielsweise das WGS 84. Diese Daten können zum Beispiel durch Fahrzeuge mit Navigationshilfe (Rettungshubschrauber, Taxi, ...) einfach interpretiert werden. Durch die Verfügbarkeit von allgemein interpretierbaren Ortsangaben über Koordinaten kann eine Information mit eindeutiger Georeferenz übermittelt werden und mit entsprechenden Hilfsmitteln schneller genutzt werden (z.B. zur Visualisierung auf einer Karte).

Der Bezug auf ein Straßennetz ist bereits komplexer. Hier sind grundsätzlich zwei Verfahrensweisen zu unterscheiden: Liegt ein gemeinsames Referenznetz vor, so ist eine Positionsangabe im Netz (Netzposition), falls eine eindeutige Zuordnung zur gleichen Versionsnummer erfolgt, durch die Übermittlung der segmentierten Attributierung möglich. Sollte sich die Referenz auf ein anderes Straßennetz beziehen, stehen Referenzierungstechniken bereit. In HUMMELSHEIM (2003) wird ein Hilfsmittel vorgestellt, das in 95% der Fälle eine Zuordnung ermöglicht.

Die Bereitstellung von Geodaten mit Koordinatenbezug kann heutzutage durch standardisierte Datendienste erfolgen. Diese Dienste können genutzt werden, um eine Geodateninfrastruktur (GDI) aufzubauen. Die GDI kann sowohl betriebsintern als auch unternehmensübergreifend vorteilhaft eingesetzt werden.

3.2.2.2 Georeferenzierte Visualisierung

Ursprünglich waren Geo-Informationen in einer Betriebsleitzentrale in der Form von analogen Karten vorhanden. Zur Visualisierung der aktuellen Betriebslage wurden Graphiken entwickelt (siehe Abbildung 3-9), die aufbauend auf der topologisch korrekten Folge der Haltestellen einer Linie die Abweichungen vom Soll-Fahrplan darstellen. Dem gegenüber kann durch die georeferenzierte Visualisierung (siehe Abbildung 3-10) das aktuelle Betriebsgeschehen auf einem Monitor lagerichtig auf einer Karte maßstäblich dargestellt werden. Somit kann das GeoRBL die dem Menschen eigene kognitive räumliche Wahrnehmung nutzen und den Disponenten bei der Entscheidungsfindung unterstützen.

Linie 5

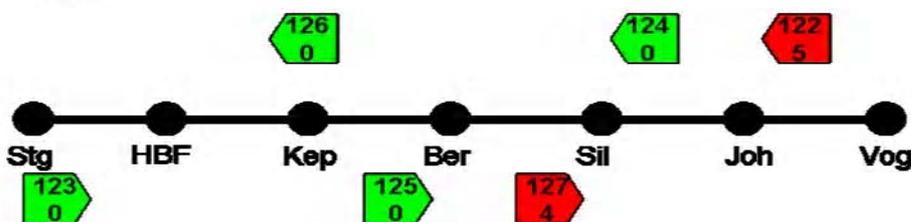


Abbildung 3-9: Beispielhafte Darstellung einer schematischen Liniendarstellung in einem RBL

Erst in neuerer Zeit werden kartenbasierte Anzeigen in die RBL integriert. Sie dienen beim Einsatz von Fahrzeugen, die mit dem satellitengestützten Positionsbestimmungssystem ausgestattet sind, zur Anzeige der Fahrzeugstandorte. Verwendung findet dabei unter anderem die aus dem Speditionswesen bekannte Technik des Einblendens von Symbolen auf einer gescannten analogen Karte (Rasterkarte), die georeferenziert wurde.

Kosten oder einer Kombination aus diesen Kriterien definiert sein. In das Routing kann die aktuelle Verkehrslage mit einbezogen werden, sofern Daten verfügbar sind.

Anzumerken ist, dass für das Routing ein topologisches Netzwerk, wie es auch durch das Liniennetz eines traditionellen RBL gegeben ist, ausreichend ist. Bei Störfällen sowie bei routenflexiblen Bedienformen wird die Beste-Wege-Suche allerdings auf dem Vorzugsstraßennetz durchgeführt und besitzt somit eine größere Lösungsmenge.

3.2.2.4 Geodaten-gestützte Positionsbestimmung

Der Vorteil der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung liegt in der Verfügbarkeit der Positionsbestimmung in einem anwendungsspezifischen Koordinatenbezugssystem, ohne dass die Voraussetzungen für den Satellitenempfang des GPS gegeben sein müssen. Der Ort des Fahrzeugs ist konsistent mit dem Modell der für die Positionsbestimmung genutzten Verkehrswege und somit auch im entsprechenden Kartenbild.

Die Kontrolle von disponierten Sonderfahrzeugen bzw. Linienfahrten mit geändertem Fahrweg ist mit dem System möglich. Diese Positionsbestimmung erfordert keine straßenseitige Infrastruktur. Die Vorteile einer Geodaten-gestützten Positionsbestimmung sind die flächendeckende Verfügbarkeit, hohe Positionsgenauigkeit im digitalen Straßennetz und hohe Zuverlässigkeit.

3.2.3 Verbesserungspotenzial der RBL-Stammfunktionen

Die Funktionalität eines RBL wurde entsprechend der Architektur in die sechs Stammfunktionen Kommunikation, Datenmanagement, Verknüpfungen zu anderen Systemen, Flottenmanagement, Fahrgastinformation und Fahrzeugmanagement gegliedert. Diese Stammfunktionen setzen sich aus Teilfunktionen zusammen, wie sie in Abbildung 3-7 in der Struktur eines Funktionsbaumes veranschaulicht sind. Dieses Kapitel beschreibt die Stammfunktionen und schätzt das Verbesserungspotenzial der Stammfunktionen durch die darin verwendeten Geodaten-nutzenden Elementarfunktionen (siehe Tabelle 2-1) ab.

3.2.3.1 Datenmanagement

Allgemeine Beschreibung der Stammfunktion

In der Stammfunktion Datenmanagement sind alle Datenströme zusammengefasst, die betriebsintern mit dem RBL ausgetauscht werden. Im Blick auf die Geodatenverwendung innerhalb des Verkehrsunternehmens ist der Austausch von Geodaten, die anderweitig im Verkehrsunternehmen eingesetzt werden, natürlich die wichtigste Funktionalität.

Verbesserung durch Verwendung der Elementarfunktionen

Prinzipiell kann das Datenmanagement durch die Elementarfunktion „georeferenzierter Datenaustausch“ verbessert werden. Beispielhaft sollen zwei Anwendungen genannt werden, die Geodaten verwenden und die durch das Nutzen von Geodatenaustauschstandards die Kosten für die Datenbereitstellung positiv beeinflussen könnten. In Planungsprogrammen ist Geoinformation heute ein integraler Bestandteil. Die statistische Auswertung von Verkehrsdaten, die durch das RBL aufgezeichnet wurden, wird mit geographischer Referenz aufbereitet.

3.2.3.2 *Kommunikation & technische Systeme*

Allgemeine Beschreibung der Stammfunktion

Die Kommunikationsfunktionalität spielt in der Entwicklung eines RBL eine entscheidende Rolle. Die historische Entwicklung der RBL lässt sich an der Entwicklung der Kommunikationskomponenten zunächst festmachen, da die datentechnische Weiterverarbeitung der Information erst später einsetzte. Nach JANECKE (1999) wurde zunächst der Verkehrsablauf vor Ort überwacht und gesteuert. Erst mit der Einführung der Funktechnik wurden Einrichtungen geschaffen, die das Betriebsgeschehen zentral steuern konnten. Mit der Einführung der elektronischen Datenverarbeitung und im Weiteren mit dem Datenfunk wurde die Basis geschaffen, Bordrechner der Fahrzeugflotten über eine Zentrale miteinander zu vernetzen. Die Entwicklung der Kommunikationswege wird hier in den nächsten Jahren weitere Entwicklungsschübe mit sich bringen. Drei wesentliche Techniken sind hier GPRS / UMTS, Digitaler Rundfunk und Wireless-LAN. Heutzutage sind in den Ballungsgebieten Betriebsfunk-Lösungen die Regel, da sie sich trotz der Investition in ein eigenes Kommunikationssystem als die rentabelste Lösung darstellen.

Verbesserung durch Verwendung der Elementarfunktionen

Ein direkter Einfluss der Elementarfunktionen auf diese Stammfunktion existiert nicht. Sowohl Übertragungskapazität als auch Übertragungskosten sind jedoch indirekt durch die Übermittlung von Geodaten betroffen.

3.2.3.3 *Verknüpfung zu externen Systemen*

Allgemeine Beschreibung der Stammfunktion

Das RBL kommuniziert mit den externen Systemen, die im Funktionsbaum genannt sind. Ortsspezifisch ist diese Liste gegebenenfalls mit externen Systemen zu erweitern, die ebenfalls Geodaten nutzen.

Lichtsignalanlagen

Die Attraktivität des ÖPNV ist unmittelbar mit der Reisegeschwindigkeit des Fahrgastes verknüpft. In Ballungsgebieten bieten beeinflussbare Lichtsignalanlagen (LSA) die Möglichkeit, die Wartezeiten vor den LSA für ÖPNV-Fahrzeuge signifikant zu verkürzen oder sogar aufzuheben. Neben den Vorteilen für den Fahrgast führen diese Beschleunigungen auch zu Ersparnissen für den Betrieb der Fahrzeuge. Diese Technik ist bereits für den Linienbetrieb mit der konventionellen Positionsbestimmungstechnik entwickelt und funktioniert gewinnbringend.

Die Priorisierung der Lichtsignalanlage erfordert eine besonders hohe Positionsgenauigkeit. Diese lässt sich in traditioneller RBL-Technik durch das Aufstellen von zusätzlichen Baken vor den entsprechenden ampelgeregelten Knotenpunkten realisieren. Die Kommunikationsanlage zu den Infrarotbaken ist jedoch relativ teuer und auf lediglich eine Verkehrsregion abgestimmt. Eine Investition in die Physikalische Ortung für Regionalbusse lohnt sich insbesondere dann nicht, wenn mehrere Systeme installiert werden müssten, da die Städte in der Region unterschiedliche Ausrüster ihrer LSA-Beeinflussungssysteme haben. Ein LSA-Beeinflussungssystem, das mit einer einfachen Kommunikation zum LSA-Rechner auskommt und die geforderte Positionsgenauigkeit mit einem alternativen Positionsbestimmungsverfahren gewährleistet, wäre zu bevorzugen.

Verkehrsmanagementsysteme

Verkehrsmanagementsysteme stellen Informationen über die Verkehrslage des motorisierten Individualverkehrs zur Verfügung. Diese Systeme können gewinnbringend mit einem RBL gekoppelt werden. Beispielsweise können Baustelleninformationssysteme, wie sie in einigen Bundesländern aber auch bereits bei Kommunen existieren oder im Aufbau sind, zu erwartende oder existierende Störungen für den Betriebsablauf anzeigen.

Andere Akteure des ÖPNV

Mit RBL von Verkehrsbetrieben, die in der gleichen Verkehrsregion tätig sind, können Daten ausgetauscht werden. Insbesondere die Anschlusssicherung ist hier ein Thema, an dem in den letzten Jahren intensiv gearbeitet wurde und zu dem Lösungsvorschläge vorliegen (VDV 2003/1 und VDV 2003/2).

Verbesserung durch Verwendung der Elementarfunktionen

Bei der Verknüpfung zu externen Systemen ist der georeferenzierte Datenaustausch eine wichtige Funktion, da über die Georeferenz nicht nur die Parameter der linearen Positionsbestimmung bekannt sind. Über Adress-Matching bzw. die entsprechenden inversen Funktionen können aus entsprechenden Datensätzen auch Adressen zur Weitergabe erzeugt werden.

Die Verwaltung der Meldepunkte für eine LSA-Beeinflussung auf der Basis von Geodaten erscheint darüber hinaus vorteilhaft (SCHOLLMAYER ET AL. 2004). Durch georeferenzierte Meldepunkte kann ggf. auf proprietäre Bakensysteme verzichtet werden und die Positionsbestimmung durch Systeme ersetzt werden, die eine hinreichende Positionsgenauigkeit liefern.

3.2.3.4 Flottenmanagement

Allgemeine Beschreibung der Stammfunktion

Das Flottenmanagement wird in die beiden Funktionen Betriebsüberwachung und Betriebssteuerung unterteilt.

Betriebsüberwachung

Der Soll-Ist-Vergleich ist die bedeutendste Funktion der Betriebsüberwachung. Eine zeitnahe Information mit Zeitstempel über die Position der Fahrzeuge in der Zentrale ist hierzu Voraussetzung. Die sachgerechte Visualisierung des Soll-Ist-Vergleichs ist die maßgebliche Entscheidungsgrundlage für den Disponenten.

Betriebssteuerung

Ins traditionelle RBL können Umwegrouten für Störfallschwerpunkte eingepflegt werden. Sobald jedoch das Verlassen des Liniennetzes einschließlich der geplanten Umwegrouten erfolgt, ist es die Aufgabe des Disponenten, die entsprechenden Fahrhinweise dem Fahrer über Sprechfunk mitzuteilen. Die Ermittlung einer möglichen Umwegroute über eine Routing-Funktion in einem ÖPNV-Vorzugsstraßennetz eröffnet bei entsprechender weiterer technischer Unterstützung Vorteile. Die Disposition mittels Tourenplanung ist eine Sonderfunktion, die in einer klassischen RBL nicht vorkommt, da für den damit verbundenen Bedarfsverkehr in der Regel kein Fahrplan erstellt wird. Die Koordinierung von Ersatzfahrzeugen bei technischen oder betrieblichen Störungen ist ein wichtiger Aspekt.

Verbesserung durch Verwendung der Elementarfunktionen

Für die Betriebsüberwachung ist eine wesentliche qualitätssteigernde Elementarfunktion die georeferenzierte Visualisierung. Der Disponent erhält neben der klassischen alphanumeri-

schen und graphischen Darstellungen eine lagerichtige und maßstabstreue Sicht auf die Betriebslage, die ihn bei der Bewertung der Situation unterstützt.

Durch die konventionellen Positionsbestimmungstechniken Logische und Physikalische Ortung ist eine korrekte Positionsbestimmung außerhalb des Linienwegs, z.B. im Falle einer Umleitung, nicht möglich. In modernen RBL wird daher für diese Fälle die fahrzeugautonome satellitenbasierte Positionsbestimmung über GPS bzw. DGPS eingesetzt, die in erster Linie über die visuelle Darstellung ausgewertet wird.

Die Betriebssteuerung erfährt eine bedeutende Qualitätssteigerung und eine Funktionserweiterung durch die Funktionen der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung und des Routing. Durch die Kombination der beiden Funktionen ist es möglich, Fahrzeuge automatisiert zu disponieren und zu überwachen. Da die Geodaten-gestützte Positionsbestimmung im Bereich des Vorzugsstraßennetzes, das dem Routing zugrunde liegt, flächendeckend funktioniert, kann das Fahrzeug auch während des neuen Kurses in der RBL kontinuierlich überwacht werden.

Bedarfsverkehre sind eine Bedienungsform des öffentlichen Personennahverkehrs, die in den kommenden Jahren häufiger genutzt werden könnten. Hemmnisse sind unter anderem rechtliche Barrieren des Konzessionsrechtes sowie die Wirtschaftlichkeit, da die Bedienung in Schwachlastzeiten und -gebieten eingesetzt wird. Durch diese mögliche Erweiterung der RBL um die flexible Bedienungsform kann die Nutzung von Geodaten als zwingend notwendig gewertet werden.

3.2.3.5 Fahrgastinformation

Allgemeine Beschreibung der Stammfunktion

Die steigenden Komfort- und Beförderungsansprüche der Fahrgäste beinhalten auch die Forderung nach umfassender Information über den Reiseweg. Die Fahrgastinformation (FGI) wird funktional in personenbezogene FGI, FGI an Haltestellen und FGI in Fahrzeugen aufgeteilt. Dabei ist sowohl die Informationsversorgung vor der Fahrt (Pre-Trip-Information) als auch während der Reise (On-Trip-Information) an den Haltestellen und in den Fahrzeugen zu gewährleisten. Die Zufriedenheit der Kunden ist nach KIESLING (2000) von der Fahrgastinformation abhängig.

Der Informationsfluss während der Reise wird durch dynamische Fahrgastanzeigen an den Haltestellen unterstützt. Dieser infrastrukturintensive, aber auch prestigefördernde Informationskanal wird hauptsächlich an hochfrequentierten Verkehrsknoten installiert.

Bei der Reiseplanung werden heutzutage in der Regel computergestützte Auskunftssysteme, insbesondere auch internetbasierte Systeme eingesetzt. Über die Entwicklung der intermodalen Auskunft ist in den letzten Jahren die Nutzung von Geoinformation in die Auskunftssysteme integriert worden. STARK UND TORLACH (2003) berichten über den entsprechenden Erfassungsaufwand, der zur Einführung dieser Systeme betrieben wurde und noch weiter zur Verbesserung und Aktualisierung des Systems betrieben werden muss. Die Entwicklungstendenz geht dahin, aktuelle Betriebslagen in die Auskunftssysteme mit einzubeziehen. Hier ist das RBL als Informationszentrale zu integrieren. Das RBL kann über geeignete Schnittstellen (VDV 2003/1) Informationsdiensten die notwendige Information über ein Abonnementverfahren standardisiert zur Verfügung stellen.

Insbesondere hat die Sicherung von Anschlussfahrten einen hohen Stellenwert in RBL. Sollte jedoch ein Anschluss nicht erreicht werden, so wird angestrebt, aus dem RBL heraus den Kunden darüber zu informieren und ggf. Alternativen zum Erreichen des Ziels anzubieten. Informationsdienste, die im Rahmen von Forschungsprojekten installiert wurden, bieten bereits heute die Möglichkeit, dass die vom RBL bereitgestellte Information dazu genutzt wird, um Pendler über SMS über ihre genutzten Linien aktuell zu informieren.

Verbesserung durch Verwendung der Elementarfunktionen

Die Fahrgastinformation kann durch die Kopplung mit einem RBL, das georeferenzierte Informationen zur Verfügung stellt, eine Qualitätssteigerung erfahren. Diese Erkenntnis wird heute auch bereits praktisch für Fahrgastinformationssysteme umgesetzt. Die Mitteilung von Änderungen der Geodaten von Haltestellenobjekten ist eine wesentliche Option, die durch Georeferenzieren Datenaustausch möglich wird. Möglich wird damit die Darstellung von Linienänderungen oder die Verlegung von Haltestellen bzw. Haltepunkten.

Durch eine Positionsbestimmung in einem übergeordneten Koordinatenbezugssystem (z.B. WGS 84) kann über Datenübertragung innerhalb des Fahrzeuges den Reisenden die aktuelle Position bereitgestellt werden. Der Fahrgast kann mit entsprechender Technik diese Information z.B. in ein Location based Service im Fahrzeug nutzen, um personalisierte ortbezogene Informationen abzurufen.

3.2.3.6 Fahrzeugmanagement

Allgemeine Beschreibung der Stammfunktion

Die Fahrzeugpositionsbestimmung im ÖPNV wurde weitgehend in Kapitel 2.6 beschrieben.

Der Fahrer hat neben dem Führen des Fahrzeugs auf der Straße weitere Aufgaben. Im Sinne einer Entlastung der Fahrer zum Zweck der Konzentration auf die eigentliche Fahraufgabe können verschiedenen Funktionen durch technische Komponenten den Fahrer unterstützen oder ggf. diese Aufgabe abnehmen.

Assistenzfunktionen für den Fahrer sind heutzutage realisiert im Bereich der Fahrgastinformation (z.B. bei der Anzeige des nächsten Haltes). Es wurden auch bereits Zielführungssysteme in Bussen getestet und funktional positiv bewertet, um beispielsweise Fahrer, die kurzfristig einen Dienst in einer ihnen ungewohnten Umgebung zugewiesen bekamen, zu unterstützen.

Aus dem Bereich des Individualverkehrs sind weitere Assistenzfunktionen in der Entwicklung, die ggf. auch Fahrzeugführer im ÖPNV gewinnbringend unterstützen können. Geschwindigkeitsassistentz, Kreuzungsassistentz, Hinweis auf Unfallschwerpunkte und Verbrauchsassistentz sind Funktionen, die unter Nutzung von Geodaten in Forschungsprojekten getestet wurden.

Verbesserung durch Verwendung der Elementarfunktionen

Durch die Geodaten-gestützte Positionsbestimmung, die georeferenzierte Visualisierung und das Routing im Fahrzeug wird die Zielführung möglich. Die Visualisierung umfasst dabei nicht nur das georeferenzierte Kartenbild, sondern auch die symbolisierten Fahrempfehlungen für das Manöver an der folgenden Kreuzung. Das Routing ist implizit in Navigationssystemen enthalten, da im Falle eines Abkommens von der vorgegebenen Route automatisch eine Rückführung auf den Weg zum folgenden Wegpunkt erfolgt. Die Geodaten-gestützte Positionsbe-

stimmung kann als eigenständige Elementarfunktion beim Gebrauch eines Zielführungssystems genutzt werden, um die Position zu ermitteln, die an die Zentrale übertragen wird. Diese Positionsbestimmungstechnik funktioniert flächendeckend.

3.2.4 Zusammenfassung Verbesserungspotenzial

Tabelle 3-1 beinhaltet eine Zusammenfassung der im vorigen Kapitel verbal bewerteten Stammfunktionen anhand der verwendeten Elementarfunktionen. In der Zusammenstellung die positive Bewertung in zwei Stufen klassifiziert. Die erste Stufe (+) fasst qualitative Verbesserungen gegenüber einem traditionellen RBL zusammen. Die zweite Stufe enthält die Verbesserungen, die darüber hinaus dann zum Zuge kommen, wenn die Funktionalität einer traditionellen RBL um Funktionalitäten erweitert wird, die in den Anwendungsszenarien (siehe Kapitel 3.1.1) erforderlich sind. Die Stammfunktionen mit dem größten Verbesserungspotenzial sind das Flottenmanagement und das Fahrzeugmanagement.

GeoRBL				
Elementarfunktion Stammfunktion	Georeferenzierter Datenaustausch	Georeferenzierte Visualisierung	Routing	Geodaten-gestützte Positionsbestimmung
Kommunikation	-	-	-	-
Datenmanagement	+	-	-	-
Verknüpfung mit externen Systemen	+	-	-	-
Flottenmanagement	+	++	++	++
Fahrgastinformation	++	+	-	+
Fahrzeugmanagement	+	++	++	++
Anmerkungen: - keine Verbesserung + Qualitative Verbesserung gegenüber traditionellem RBL ++ Verbesserung bei funktionaler Erweiterung im Störfallmanagement, bei der LSA-Beeinflussung und dem Routenflexiblen Betrieb.				

Tabelle 3-1: Theoretisch abgeleitetes Verbesserungspotenzial einer GeoRBL

3.3 Praxistest: Prototypisches GeoRBL für die Routenflexible Disposition

Zur Verifikation des bisher theoretisch hergeleiteten Verbesserungspotenzials sollen die Elementarfunktionen georeferenzierte Visualisierung, Routing und Geodaten-gestützte Positionsbestimmung anhand der beschriebenen Szenarien für das Flottenmanagement und das Fahrzeugmanagement in einem prototypisch realisierten GeoRBL experimentell umgesetzt werden.

Nach dem Aufzeigen der Verknüpfungen der Module mit den definierten Elementarfunktionen werden die in die Praxis ermittelten Vorteile der einzelnen Module dargestellt. Die Module sind auch den Stammfunktionen zugeordnet, um eine Vergleichbarkeit der Aussage ableiten zu können.

3.3.1 Systemdesign

Die Systemarchitektur des prototypischen GeoRBL umfasst neun Module. Das Kernmodul „GeoRBL“ (1) beinhaltet das technische Datenmanagement. Das Modul „RBL SWU“ (2)

beinhaltet den Import der Soll-Daten (Fahrplan) aus der SWU-RBL. Parallel zum Import der Soll-Daten ist der Abgleich mit den zu importierenden Geodaten des Fahrgastinformationssystems zu sehen. Das Störfallmanagement bedarf jedoch einer Simulation des Betriebszustands, da in möglichst realitätsnahen Szenarien fiktive Störungen definiert werden und ab diesem Zeitpunkt der reale Verlauf ohnehin nicht mehr mit dem Szenarienmodell übereinstimmen kann.

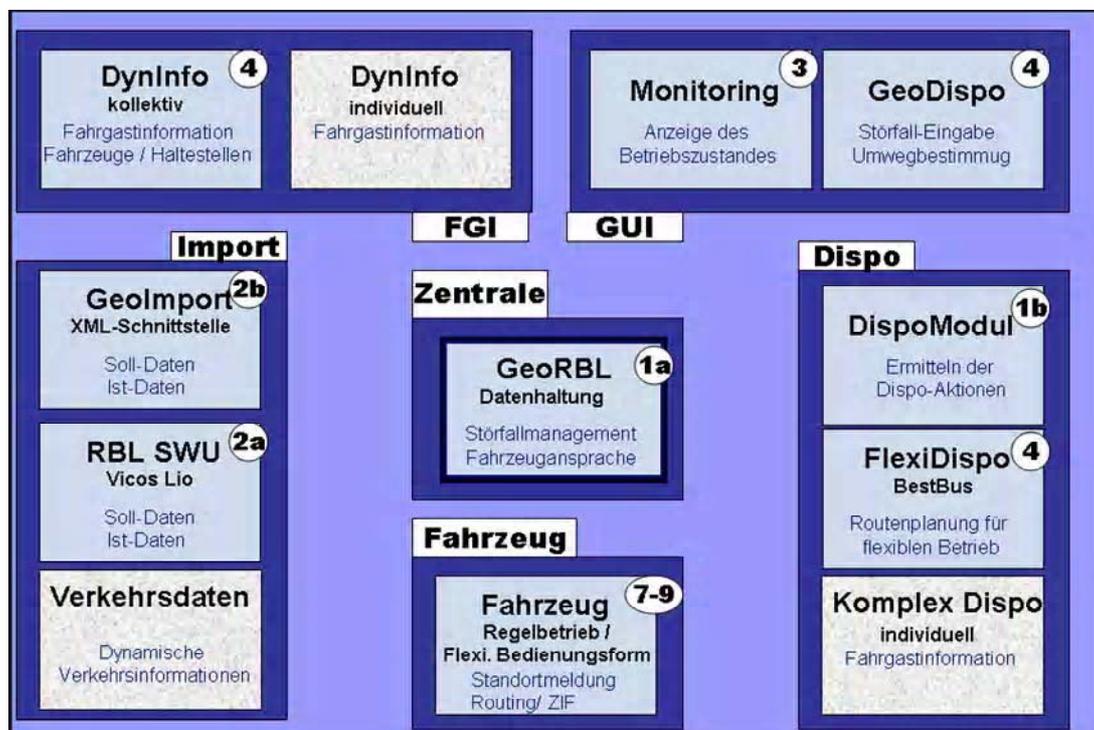


Abbildung 3-11: Systemarchitektur des GeoRBL (nach TRITSCHLER UND DOBESCHINSKY 2004)

Das Modul Monitoring (3) ist in der Lage, den aktuellen Betriebsstand anzuzeigen. Es ist somit Bestandteil der Betriebsüberwachung und deshalb der Stammfunktion Flottenmanagement zuzuordnen. Die Elementarfunktion der Visualisierung wird vorrangig zu bewerten sein. Daneben spielt natürlich der Aspekt einer zuverlässigen Positionsbestimmung eine wesentliche Rolle.

Das Modul GeoDispo (4) fällt in den Bereich der Stammfunktion Flottenmanagement. Als ein Teil des Betriebsmanagements umfasst es den Ablauf der Störfallbearbeitung. Auf der Basis des Moduls Monitoring steht dem Disponenten ein Kartenbild auf dem Monitor zur Verfügung, in dem er interaktiv den Betriebsablauf beeinflussen kann. Die Elementarfunktion des Routing ist hier ein wesentlicher Bestandteil der Funktionalität. Darüber hinaus spielt der georeferenzierte Datenaustausch zum Fahrzeug eine wesentliche Rolle.

Das Modul FlexiDispo (5) stellt die Schnittstelle zur internetbasierten Buchung einer flexiblen Bedienungsform dar, die in einem elektronischen Fahrplanauskunftssystem integriert ist. An dieser Schnittstelle sind die Fahrzeiten und Fahrwegbeschreibungen aller Haltepunktverbindungen im Bedienungsgebiet bereitzustellen. Das Modul DynInfo (6) dient der Information der Fahrgäste im Bereich des Störfallmanagements und ist der Stammfunktion Fahrgastinformation zuzuordnen. Die Elementarfunktion der Visualisierung könnte an dieser Stelle eine Rolle spielen. Dieses Thema ist jedoch im Projekt nicht vertieft worden. Im Weiteren wird dieses Modul von den Untersuchungen ausgeklammert.

Die Module sieben bis neun betreffen die Kommunikation mit dem Fahrzeug und die Integration eines Navigationssystems als Nutzeroberfläche für den Fahrer. Dabei werden der Regelbetrieb, der Störfallbetrieb und der Betrieb in der flexiblen Bedienungsform unterschieden. Die Elementarfunktion der georeferenzierten Datenübertragung ist natürlich wechselseitig von Bedeutung.

Weiteres realisiertes Modul, welches jedoch nicht in der Übersicht enthalten ist, setzt die LSA-Beeinflussung auf der Basis der georeferenzierten Positionsbestimmung um. Die Umsetzung dieser Funktionalität folgt dem Szenario das in den Kapiteln 3.1.1.3 und 6.4 näher beschrieben ist.

3.3.2 Durchführung

3.3.2.1 SWU RBL (Datenimport)

Im Modul 2 erfolgte die Initialisierung der Datengrundlage des GeoRBL. Zum einen erfolgte hier die Eingabe des Linienbetriebs. Es wurden aber auch die Vorzugsstraßennetze der Geodatenbasis bereitgestellt, die über die Routing-Funktion die Raum-Zeit-Transformation vornehmen konnten, die zum Erstellen der Reisezeitmatrix und der Fahrzeug-Soll-Trajektorien erforderlich war.

3.3.2.2 Monitoring

Die Darstellung der ÖPNV-Flotte auf einer georeferenzierten Bildschirm-Karte ist eine ergänzende Sicht, die im derzeit eingesetzten RBL der SWU nicht verfügbar ist. Diese georeferenzierte Sicht ist mittlerweile von den meisten RBL-Herstellern auf Wunsch lieferbar. Der Vorteil der kartographischen Darstellung ist jedoch projektbezogen umzusetzen. Die prinzipielle Fähigkeit des Menschen, die räumliche Kognition zu nutzen und zu trainieren, um in Entscheidungsprozessen seinen Erfahrungsschatz besser abrufen zu können, ist im Projektkontext aufzuzeigen. Dieses Modul realisiert die Elementarfunktion der Visualisierung.

Über das Feature einer flächenhaft verfügbaren georeferenzierten Ortung oder Positionsbestimmung wird durch die Anzeige der Fahrzeuge das große Defizit behoben, dass die Fahrzeuge im Falle einer Umleitung aus der Sicht des RBL herausfallen.

Die in der GIS-Technik üblichen Darstellungstechniken wie das „fractal zooming“ (Anpassen der Informationsdichte an den Darstellungsmaßstab) erlauben dem Disponenten, sich rasch einen Überblick über die Situation zu verschaffen.

Durch das Monitoring werden die Geodaten des GeoRBL sichtbar. Daher ist es zwingend notwendig, dieses Modul in das GeoRBL einzuführen. Der Monitor ist die Plattform für die interaktive Bearbeitungsoberfläche (Graphical User Interface (GUI)) der GeoDispo, die im Folgenden beschrieben wird. Die Systemperformance des eingesetzten GIS-Systems konnte die Anforderungen an die Bildwiederholungsfrequenz nicht voll erfüllen. Das Projektziel konnte jedoch auch mit dieser Einschränkung erreicht werden.

3.3.2.3 GeoDispo

Eine durchgehende Unterstützung in der Umwegplanung ist bei traditionellen RBL-Systemen mit liniengebundener Logischer oder Physikalischer Ortung nur möglich, wenn die Umwegrouten vorgeplant und entsprechend vermessen wurden oder die Metrierung der Umleitung aus bestehenden Kursen möglich war. Die im Rahmen der GeoRBL vorgestellte Umwegpla-

nung ist daher innovativ, weil eine durchgehende funktionale Einbindung der Überwachungs- und Steuerungsfunktionen von kurzfristigen Planungen möglich ist. Dies resultiert sowohl aus der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung als auch aus der netzweiten Option der Definition der Fahrzeugtrajektorien durch das Routing.

Die intuitive Planung von Umwegen, die durch das Eingeben von Wegpunkten auf der visualisierten Karte iterativ erfolgen kann, wurde als ein wesentlicher Vorteil des Systems erkannt. Noch wichtiger wurde die Bewertung von vorgeschlagenen Umwegen auf Basis der visualisierten Karte beurteilt.

3.3.2.4 Fahrzeug

Die Übermittlung der kurzfristig geplanten (Umweg-)Route an den Fahrer in Fahrzeugen, die mit einem Navigationssystem ausgerüstet sind, ist ein weiterer Vorteil. Durch die Übertragung von Koordinaten der kurzfristigen Planung, z.B. eine Umwegstrecke, kann im Fahrzeug der Weg unmittelbar angezeigt und so der Fahrer auf dem Weg zum Ziel effektiv unterstützt werden.

3.3.3 Bewertung hinsichtlich der Elementarfunktionen

Aus den Darstellungen der Stammfunktionen mit dem theoretisch ermittelten Verbesserungspotenzial aus dem Kapitel 3.2 und der Darstellung der praktischen Umsetzung Module im Kapitel 3.3.2 wird eine tabellarische Zusammenfassung des in der Praxis umgesetzten Verbesserungspotenzials dargestellt.

3.3.3.1 Georeferenz beim Datenaustausch

Module	Stammfunktionen
<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeug Regelbetrieb • Fahrzeug Störfall • Fahrzeug Flexible Bedienung • Fahrzeug LSA Beeinflussung 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugmanagement • Datenmanagement

Tabelle 3-2: Module und Stammfunktionen mit Elementarfunktion Georeferenz beim Datenaustausch

Die Georeferenz beim Datenaustausch wird im Praxistest selbstverständlich bei der Kommunikation mit dem Fahrzeug genutzt. Systembedingt können ja bei der Ausprägung dieser GeorBL die Koordinaten des Bezugssystems direkt übertragen werden, da im Fahrzeug mit dem Navigationssystem eine Standardkomponente zur Verfügung steht, die diese Eingabe direkt verwerten kann. Der Vorteil der optionalen Nutzung von Standardkomponenten zur Erfassung als auch zur Auswertung ist für die Stammfunktion positiv zu werten. Ein sehr spezieller Punkt ist die Option der GeorBL, die Meldepunkte für die LSA-Beeinflussung georeferenziert zu verwalten und damit das Datenmanagement dieser Objektart zu erleichtern.

3.3.3.2 Visualisierung

Das Modul Monitor, das die Kartensicht mit der Anzeige der Fahrzeugflotte präsentierte, wurde mit den einfachen Bedienungsfunktionen der Kartenausschnittwahl und Objektsuche bei der Präsentation von den Praktikern befürwortend aufgenommen. Die Tatsache, dass dieses Modul bereits auch kommerziell verfügbar ist, unterstreicht das Verbesserungspotenzial durch diese Elementarfunktion für die Betriebsüberwachung.

Module	Stammfunktionen
<ul style="list-style-type: none"> • Monitor • GeoDispo • Fahrzeug 	<ul style="list-style-type: none"> • Flottenmanagement <ul style="list-style-type: none"> - Betriebsüberwachung - Betriebsmanagement • Fahrzeugmanagement

Tabelle 3-3: Module und Stammfunktionen mit Elementarfunktion Visualisierung

Das Modul der GeoDispo setzt dem Modul Monitor auf und dient zur Generierung neuer Umfahrungen sowie als Entscheidungsgrundlage für die Umwegbewertung.

Die Visualisierung der Zielführungsinformation über Monitor im Fahrzeug ist eine Standardfunktion, die positiv bewertet wurde. Die Funktionalität der Zielführung trägt den wesentlichen Anteil der funktionalen Verbesserung, die Umsetzung der Bedienung und Informationsanzeige auf einem graphischen Monitor wird jedoch vom Betrachter als angenehmer Komfort empfunden.

3.3.3.3 Routing

Module	Stammfunktionen
<ul style="list-style-type: none"> • Import Modul 2 / Geodatenaufbereitung • GeoDispo /FlexiDispo 	<ul style="list-style-type: none"> • Datenmanagement • Flottenmanagement • Fahrzeugmanagement

Tabelle 3-4: Module und Stammfunktionen mit Elementarfunktion Routing

Im Rahmen des Störfallmanagements (Modul GeoDispo) konnte bei der Planung eines Umweges der Routingalgorithmus vorteilhaft eingesetzt werden. Der Disponent braucht interaktiv nur wenige Punkte vorzugeben. Der Algorithmus setzt diese Vorgabe in eine voraussichtlich benötigte Reisezeit um. Diese komfortable graphische Festlegung einer Umwegroute bei der im Hintergrund der Routingalgorithmus eine zusammenhängende befahrbare Fahrzeugroute bildet, wurde sehr positiv bewertet.

Im Rahmen der Diskussion mit den Anwendern wurde diese auf der Routingfähigkeit des GeoRBL basierte Funktion als gutes Werkzeug zur szenarienbasierten Planung des Störfallmanagements gesehen. Die Ausbildung bzw. das Training von Disponenten für Störfallsituationen über szenarienbasierte Vorgaben an diesem auf einem Testsystem installierten Werkzeug wurde gewünscht.

Durch den Routingalgorithmus in Kombination mit dem Vorzugsstraßennetz existiert die Option der funktionalen Erweiterung eines RBL zur Integration kurzfristiger Fahrten wie z.B. flexible Bedienformen oder weitere Bedarfsverkehre. Das Flottenmanagement wird insbesondere dahingehend vorteilhaft erweitert, dass die kurzfristig geplanten Verkehre unmittelbar in der RBL überwacht werden können.

Das Routing wird in der Datenaufbereitung für das Modul FlexiDispo verwendet. Wegen der Systemperformance und der Tatsache, dass keine zeitnahe Pflege des Vorzugsstraßennetzes mit aktueller Verkehrsinformation vorgesehen ist, wurde im Projekt die Reisezeitmatrix aller möglichen Haltepunktverbindungen über den Routingalgorithmus vorab bestimmt. Damit konnte die Transformation von räumlicher Distanz in einen zeitlichen Widerstand erfolgen.

Beim Datenimport wurden Teilstrecken zur Definition des Liniennetzes ebenfalls mit Hilfe des Routingalgorithmus bestimmt. Diese Vorgehensweise automatisiert die Datenerhebung

weitgehend, da mit einem hohen Prozentsatz die Teilstrecken zwischen zwei benachbarten Haltepunkten eindeutig über einen Routingalgorithmus bestimmbar sind.

3.3.3.4 Geodaten-gestützte Positionsbestimmung

Im Kapitel 6 sind Untersuchungen zu der eingesetzten Geodaten-gestützten Komponente zur Positionsbestimmung enthalten. Als Repräsentant dieser Technik wurde ein Navigationssystem verwendet, das über eine Schnittstelle Informationen über den aktuellen Ort sowie Steuerungsoptionen beinhaltet.

Module	Stammfunktionen
<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugmanagement • GeoDispo / FlexiDispo 	<ul style="list-style-type: none"> • Externe Systeme / LSA • Flottenmanagement • Fahrzeugmanagement / Zielführung

Tabelle 3-5: Module und Stammfunktionen mit Elementarfunktion Geodaten-gestützte Positionsbestimmung

Der herausgehobene Vorteil der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung ist die flächendeckende und zuverlässige Verfügbarkeit der Positionsinformation. Aufbauend auf dieser Kernkomponente wurde die Dispositionsfunktion sowohl im Störfallmanagement als auch bei der flexiblen Bedienform in der umgesetzten Form ermöglicht. Von diesem Vorteil sind im Wesentlichen die Module GeoDispo, FlexiDispo und Fahrzeugmanagement beeinflusst.

Die automatisierte Fahrgastanzeige, die nun auch auf den disponierten Umwegrouten zur Verfügung stand, wurde ebenfalls erst durch die zuverlässige Positionsbestimmung abseits der Linie möglich.

Die Geodaten-gestützte Positionsbestimmung konnte auch im Fahrzeug beim Detektieren von Meldepunkten zur Beeinflussung der Lichtsignalanlagen genutzt werden. Diese autonome Positionsbestimmungsmethode führt dazu, dass alle derartig ausgerüsteten Fahrzeuge prinzipiell an der LSA-Priorisierung teilnehmen können. Dieser Vorteil könnte im Projektkontext insbesondere auf den in Ulm eingesetzten Regionalverkehr wirken, der derzeit unter anderem wegen der fehlenden physikalischen Ortungskomponente nicht an der Priorisierung teilnehmen kann.

Der Einsatz der Komponente zur Positionsbestimmung eines Navigationssystems ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten im Kontext der RBL zunächst kritisch zu bewerten. Ohne die im Forschungsprojekt genutzte Gesamtfunktionalität des Systems mit Zielführung und Informationsmonitor für den Fahrer lässt sich der finanzielle Aufwand wahrscheinlich nicht rechtfertigen. Die Geodaten-gestützte Positionsbestimmung ist auch Grundlage für die Zielführungsfunktionalität. Konkrete Probleme ergaben sich aus folgenden Punkten:

- Die Aktualität der Datengrundlage
- Unterschiedliche Datengrundlage zwischen Zentrale und Fahrzeug
- Unterschiedliche Routing-Algorithmen in Zentrale und Fahrzeug.

3.3.4 Zusammenfassung

In der Tabelle 3-6 wurden die Bewertung aus dem Praxistest als Matrix zusammengefasst. Ausgehend von den eingesetzten Elementarfunktionen wurde die daraus ableitbare positive Bewertung einzelner Module den Stammfunktionen zugeordnet. Somit ist ein Vergleich mit Tabelle 3-1 möglich.

Elementarfunktion				Modul	Funktionen	Stammfunktion
Georef. Datenaustausch	Visualisierung	Routing	Positionsbestimmung			
		X		Import Mod. 2	Geodatenaufbereitung	Datenmanagement
X				Fahrzeug	LSA	Datenmanagement
			X	Fahrzeug	LSA	Externe Systeme
		X	X	FlexiDisp	Betriebsmanagement	Flottenmanagement
	X			Monitor	Betriebsüberwachung	Flottenmanagement
	X	X	X	GeoDispo	Betriebsmanagement	Flottenmanagement
			X	Dyninfo	Ansage der Haltestelle	Fahrgastinfo.-systeme
X	X			Fahrzeug	Regelbetrieb	Fahrzeugmanagement
X	X	X	X	Fahrzeug	Regelbetrieb Störfall Flexible Bedienung	Fahrzeugmanagement
			X	Fahrzeug	Zielführung	Fahrzeugmanagement
		X		GeoDispo		Fahrzeugmanagement

Tabelle 3-6: Nutzen der prototypisch umgesetzten Elementarfunktionen in den Modulen

Durch den Praxistest konnte ein großer Teil des theoretisch ermittelten Verbesserungspotenzials durch die Nutzung von Geodaten bestätigt werden. In Tabelle 3-7 sind die Felder mit roter Schrift gekennzeichnet, in denen das theoretische Potenzial der Nutzung von geodatenbasierten Elementarfunktionen durch die Bewertung der prototypischen Umsetzung bestätigt oder erkannt wurde. Das herausragende Verbesserungspotenzial ist im Bereich der Betriebssteuerung zu sehen. Dabei ist anzumerken, dass die Vorteile des Flottenmanagements erst dann signifikant werden, wenn das RBL die Funktionen routenflexibler Bedienungsformen bzw. ein routenflexibles Störfallmanagement einsetzt.

Elementarfunktion / Stammfunktion	Georeferenzierter Datenaustausch	Georeferezierte Visualisierung	Routing	Geodaten-gestützte Positionsbestimmung
Kommunikation	-	-	-	-
Datenmanagement	+	-	-	-
Verknüpfung mit externen Systemen	+	-	-	-
Flottenmanagement	+	++	++	++
Fahrgastinformation	++	+	-	+
Fahrzeugmanagement	+	++	++	++

Anmerkungen:
 - keine Verbesserung
 + Qualitative Verbesserung gegenüber traditionellem RBL
 ++ Verbesserung bei Funktionaler Erweiterung im Störfallmanagement, LSA Beeinflussung und Routenflexiblen Betrieb.

Tabelle 3-7: Vergleich der prototypisch umgesetzten Elementarfunktionen in den Modulen

4 Datenstrukturen im GeoRBL

Zur prototypischen Realisierung eines GeoRBL für das Störfallmanagement und routenflexible Bedienungsformen ist die Datenstruktur des GeoRBL festzulegen. Ein Datenformat für den Datenaustausch ist zu definieren, um den Import existierender Geodaten des ÖPNV zu ermöglichen.

Zur Festlegung der Datenstruktur werden existierende Datenstrukturen von allgemeinen Verkehrsnetzen und ÖPNV-Daten ermittelt und dargestellt. Nach einer Analyse der Anforderung, die durch die Anwendung der flexiblen Bedienungsform und des Störfallmanagements gegeben ist, erfolgt die konkrete Definition der Datenstruktur. Das im Rahmen des Projektes RUDY entwickelte Austauschformat für Geodaten wird skizziert. Abschließend wird unter Berücksichtigung der laufenden Entwicklung von Datenformat und Datendiensten eine Schnittstellenerweiterung vorgeschlagen, die den Aufbau einer Geodateninfrastruktur in einer Verkehrsregion unterstützt.

4.1 Existierende Geodaten-Strukturen

Die Zweckmäßigkeit und der Wunsch der Anwender, die Datenstrukturen im ÖPNV zu standardisieren, wurden durch diverse Projekte auf EU-Ebene realisiert. Das Projekt TRANSMODEL erarbeitete einen europäischen Normungsvorschlag (TRANSMODEL 2001). Auch in den USA existiert ein nationaler Standard für den ÖPNV (NTCIP 2002 / DoT 2003). In Deutschland sind die Vorgaben des VDV maßgebend. Durchaus konform zu existierenden Standards haben Produktentwicklungen eigenständiger Datenstrukturen entwickelt. Die ausgewählten Beispiele sollen lediglich eine Vertreterfunktion für verschiedene Entwicklungsursprünge übernehmen und ergeben kein vollständiges Bild der existierenden Datenstrukturen aller Anwendungsapplikationen im ÖPNV.

Das vom VDV empfohlene Datenmodell gilt als Maßstab für alle Anbieter von RBL-Software und -Hardware in Deutschland. Da jedoch im VDV-Modell Geodaten derzeit nur unzureichend abgebildet werden, existieren auf dem Markt entsprechende Ergänzungen. Die folgende Liste der Anwendungsmodelle ist nicht vollständig, soll aber Entwicklungen einzelner Interessensgruppen darstellen. Der Schwerpunkt der Darstellung wird auf die Strukturierung von Geodaten reduziert.

4.1.1 Datenmodelle von Verkehrsstrassen

Verkehrsnetzdaten stellen die Basis für jegliche Informationssysteme in der Verkehrsinformatik dar. Auf ihrer Basis können unterschiedlichste Anwendungen aufgebaut werden. Die Verkehrsnetze, die im Rahmen der Bereitstellung von Geoinformation für Navigationsgeräte entstanden sind, stellen heute einen Quasi-Standard für Anwendungen in der Verkehrsinformationstechnik dar. Sie werden in diesem Kapitel zunächst erläutert. Die Entwicklung der amtlichen Straßendaten soll darauf folgend dargestellt werden. Eine Betrachtung von multimodalen Verkehrsnetzen soll eine Entwicklungstendenz aufzeigen, die insbesondere für die Information für Auskunftssysteme des öffentlichen Verkehrs von Interesse ist.

4.1.1.1 GDF

Es existieren Geodatenbestände für Navigationssysteme, die dem Standard ISO/FDIS 14825 Geographic Data Files (GDF) entsprechen. Sie sind heutzutage die Grundlage vieler Verkehrsstelematik-Systeme. Darüber hinaus haben sich die Verkehrsplanung und die Verkehrsstelematik ebenfalls dieser Daten bedient, so dass man von einem Defakto-Standard für Verkehrsanwendungen in Europa reden kann. Preisliche Vorteile der GDF-Daten, wie in STARK (2001) dargestellt, haben ihren Anteil zur Verbreitung der GDF-Daten beigetragen.

Beginnend in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts wurde im Projekt DEMETER eine Spezifikation erarbeitet, die als GDF 1.0 dem EU-Projekt der Task Force European Digital Roadmap zur Verfügung stand. In unterschiedlichen Regionen wurden bis zu drei Testerfassungen vorgenommen und im Rahmen des Benchmark-Tests miteinander verglichen (BETTERMANN 1998). Im Laufe des Folgeprojektes EDRM2 ergaben sich wesentliche Erweiterungen im Datenmodell wie z.B. die Einführung der „Segmented Attributes“. Die daraufhin entstandene Version 2.2 des GDF wurde der CEN als Standardisierungsvorschlag eingereicht (MÖHLENBRINK 1992). Mit der Version 3.0 erreichte der GDF den Status eines Europäischen Pre-Standards, der direkt in die nun beginnende internationale Normierung durch das ISO TC204 einfluss. Im Jahr 2002 wurde mit der Version GDF 4.0 der Status einer internationalen Norm erreicht.

Zeit	Projektrahmen / Gremien	Inhaltlicher Fortschritt	Standardisierungsfortschritt
1986 1990	DEMETER	Beginn der Definition des Datenformats	GDF 1.0
1993	TFEDRM, PANDORA, CARMINAT	Test von GDF 1.0 Abgleich des konzeptionellen Datenmodells mit anderen Standards	GDF 2.0
	EDRM2 CEN TC 278	Integration der Testergebnisse in den Standard	GDF 2.1 GDF 2.2
1996 1997	ISO TC204	Start der Globalisierung Europäische Vornorm Implementierung im Markt	GDF 3.0
2001 2002	NextMap	Internationale Norm Vorbereitung der Weiterentwicklung der Geodaten für ADAS-Systeme	GDF 4.0 ISO 14825 „ XGDF “

Abbildung 4-1: Historie des GDF (nach VANESSEN 2002)

Über die Funktionalität der Navigationssysteme hinausgehend wurden bzw. werden zur Steigerung der Verkehrssicherheit und des Komforts so genannte „Advanced Driver Assistance Systems“ (ADAS) entwickelt. Einige dieser Systeme benötigen eine digitale Karte höherer Güte als bisher verfügbar. Im EU-Projekt NextMap (LÖWENAU ET.AL. 2002) wurden die Anforderungen an Geodaten für ADAS-Anwendungen bestimmt. Die kommerziellen Lieferanten stellen sich darauf ein, Karten dieser Genauigkeitsklasse und Inhaltsdichte bei Bedarf erfassen und liefern zu können. Die in der Abbildung 4-1 als XGDF bezeichnete Version soll die standardkonforme Weiterentwicklung der Geodatenbestände für ADAS beinhalten.

4.1.1.2 Öffentliche Straßennetzdaten

Die Öffentliche Hand besitzt durch den Aufbau digitaler Datenbestände der Landesvermessung und des Straßenbaus ebenfalls digitale Karten des Straßennetzes. Da die Daten der Landesvermessung dem gesetzlichen Auftrag entsprechend keine verkehrsflussrelevanten Verkehrsdaten besitzen, können diese Daten nicht den inhaltlichen Anforderungen für Navi-

gationssysteme entsprechen. Für den Aufbau eines deutschlandweiten konsistenten Datensatzes, entsprechend diesen Anforderungen, müssten wegen der föderalen Struktur die lieferbaren Daten jedes Bundeslandes analysiert, homogenisiert und entsprechend der im Bundesland durchgeführten Aktualisierungsfrequenz gepflegt werden. Die Aktualisierungsrate der ATKIS-Daten betrug zu Beginn des Aufbaus der kommerziellen Daten fünf Jahre. Es gibt aber interessante Entwicklungstendenzen festzustellen, die im Folgenden am Beispiel Baden-Württemberg kurz zusammengefasst werden sollen.

Der Datenbestand, der nach der ATKIS-Spezifikation erstellt wurde, enthält in der erreichten Ausbauphase alle Verkehrswege. Die Vollständigkeit der Geometrie der Verkehrswege ist gegenüber dem GDF als hochwertiger einzuschätzen. Hierzu trägt insbesondere die Tatsache bei, dass Feld- und Forstwege in den Daten enthalten sind. Ein wesentliches Qualitätsdefizit der ATKIS-Daten gegenüber den GDF-Daten ist in den letzten Jahren durch die themenspezifische Verkürzung der Aktualisierungsfrequenz von fünf Jahren formal entfallen. Durch die so genannte Spitzenaktualisierung, die für den Bereich der Verkehrswege nur noch 3 Monate umfassen soll, ist ein wesentliches Hindernis der Nutzung der amtlichen Geometriedaten für das Straßennetz entfallen (VON LOM 1998). Hier kooperiert die Vermessungsverwaltung in Baden-Württemberg mit der Straßenbauverwaltung im Bereich des klassifizierten Straßennetzes. Die ATKIS-Daten besitzen keine Informationen über den Verkehrsfluss auf den Straßen.

Traditionell sind Straßeninformationsbanken entsprechend ihrer frühen EDV-technischen Umsetzung in Datenbanken ohne Geodaten konzipiert. Die Geometrie von ATKIS-Daten ist in Baden-Württemberg den Straßenabschnitten zugrunde gelegt. Die Gliederung des Straßennetzes in eigentumsspezifische und regionale Zuständigkeiten verhindert, dass ein homogenes funktionales Straßennetz gebildet werden kann. Dies ist jedoch ein wesentliches Hemmnis für den Einsatz als Datengrundlage in einer Verkehrsregion.

4.1.1.3 Multimodale Verkehrsnetze / Kommunale Verkehrsnetze

Der ÖPNV ist in der Regel in multimodale Reiseketten eingebunden, da der Weg zu den Haltestellen zu berücksichtigen ist und das öffentliche Verkehrssystem in Ballungsgebieten häufig ohnehin die beiden Verkehrsmodi Bus- und Straßenbahn umfasst. Die Abbildung von multimodalen Verkehrsnetzen in einen Modellraum wird derzeit durch den Normierungsvorgang im ISO /TC 211 vorangetrieben.

HASELBERGER UND FIBY (2004) stellen das Konzept eines Verkehrsbezugssystems vor, das in Wien im Rahmen des Projektes „VEMA-Verkehrsmanagement Region Wien“ umgesetzt werden soll. Das Verkehrsbezugssystem beinhaltet einen Trassengraphen, der als multimodales Bezugssystem implementiert und gewartet werden soll.

In Verkehrsverbänden werden derzeit auf der Basis von kommerziellen GDF-Straßennetzen weitere Verkehrsmodus-spezifische Netze aufgebaut. Es werden ÖPNV-Linien geocodiert. Dabei sind beispielsweise Schienenverbindungen zu ergänzen. Es werden auch notwendigerweise Wegverbindungen für Fußgänger ergänzt, die die Verbindung von Straßennetz zu Haltepunkten modellieren.

Neuere Spezifikationen berücksichtigen die Notwendigkeit des Datenaustausches zwischen Verkehrsunternehmen zum Zwecke der Anschlusssicherung (VDV 2003). Die Idee einer Kommunikationsplattform für den ÖPNV wird bereits in VDV (1997) aufgenommen. Ein Vertiefen dieses Aspekts erfolgt in Kapitel 5.4.2 dieser Arbeit.

Die Schnittstellen VDV453 und VDV454 sehen ein weites Spektrum des Informationsaustausches zwischen RBL-Zentralen und Fahrgastauskunftssystemen vor. Derzeit wird allerdings von einer bekannten Lage der Haltestellen und einem bekannten Linienverlauf ausgegangen. In den Referenzdiensten ist nicht die Übertragung der Lage der Haltestellen und Haltepunkte enthalten.

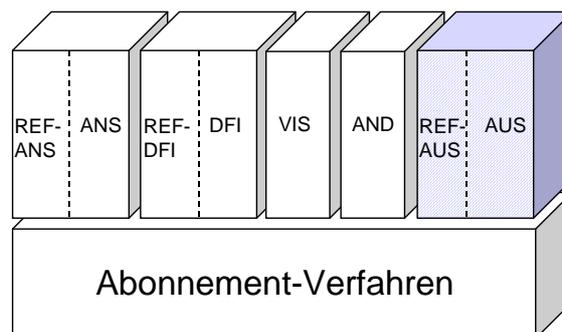


Abbildung 4-3: Dienstlandschaft nach VDV453 und VDV454 (HENNINGER ET AL. 2003)

Umleitungswege sind bereits auch in der Schnittstelle enthalten. Sie werden jedoch topologisch über die Folge der nun zu passierenden Haltestellen angegeben. Hier kommt die traditionelle Vorgehensweise zum Ausdruck, Umleitungen über das bestehende Liniennetz umzuleiten. Eine georeferenzierte Repräsentation der Teilstrecken und definierter Umwegrouten ist in der Schnittstelle nicht vorgesehen.

Der VIS-Dienst zur Visualisierung beinhaltet bereits geographische Koordinaten, die auf einer Karte angezeigt werden können. Sofern die Daten vorhanden sind, wie zum Beispiel im Fahrgastinformationssystem, kann die Betriebslage auf diesen Daten dargestellt werden. Sollten diese Daten allerdings nicht verfügbar sein, bietet sich die in Abbildung 3-10 dargestellte hybride GIS-Technik an, um die Betriebslage kartographisch darzustellen.

4.1.2.2 Geoinformationssysteme (*Transportation Object Model*)

Die Firma ESRI bietet neben den klassischen GIS-Produkten in ihrer Verkaufspalette auch Daten bzw. Datenserver an. Diese Entwicklung lässt sich daraus ableiten, dass die Nutzung von GIS-Systemen eng mit der Datenbeschaffung für die GIS-Applikation verknüpft ist. Das Vorliegen eines gepflegten Datenbestandes im ursprünglichen GIS-Format kann ein entscheidendes Verkaufsargument darstellen. Im Rahmen der Entwicklung der Geodatabase wurden auch Datenmodelle für Verkehrswege entwickelt. ESRI selbst stellt die UNETRANS-Datenstruktur zur Verfügung, die an die US-amerikanischen Standards angelehnt ist.

Eine Transformation von GDF-Daten soll ebenfalls möglich sein. Aufbauend auf diesem Modell wurde eine Fachebene für den öffentlichen Personennahverkehr von der Universität Aalborg entwickelt. Diese Datenstruktur ist direkt in ein GIS eingebunden. Die Anwendung wird durch entsprechende Werkzeuge der GIS-Umgebung ergänzt.

4.1.2.3 GDF-Datenstruktur

Der GDF-Standard ist aus seiner Historie heraus für Anwendungen im motorisierten Individualverkehr entwickelt worden. Die Darstellung von Bahn und Nahverkehr ist jedoch bereits für graphische Darstellung verwendet. Ein geschlossenes topologisches Netz für den ÖPNV-Busverkehr ist in der Realisierung durch die Kartenerfassungsfirmen nicht gegeben.

Im Rahmen des Projektes STORM wurde der Öffentliche Personennahverkehr in einem Objektthema „Public transport“ (ISO14825 2002) modelliert. Dieses Datenmodell stellt zunächst eine gestufte Modellierung der Haltestellen („Stop Area“) mit Haltepunkten („Stop Points“) vor. Die Haltepunkte werden indirekt über Routen („Routes“) der Linie zugeordnet. Die Routen setzen sich aus sogenannten „Route Links“ zusammen. Diese sind über eine Relation mit den Straßenelementen, die die Basis des Wegenetzes des MIV bilden, verbunden.

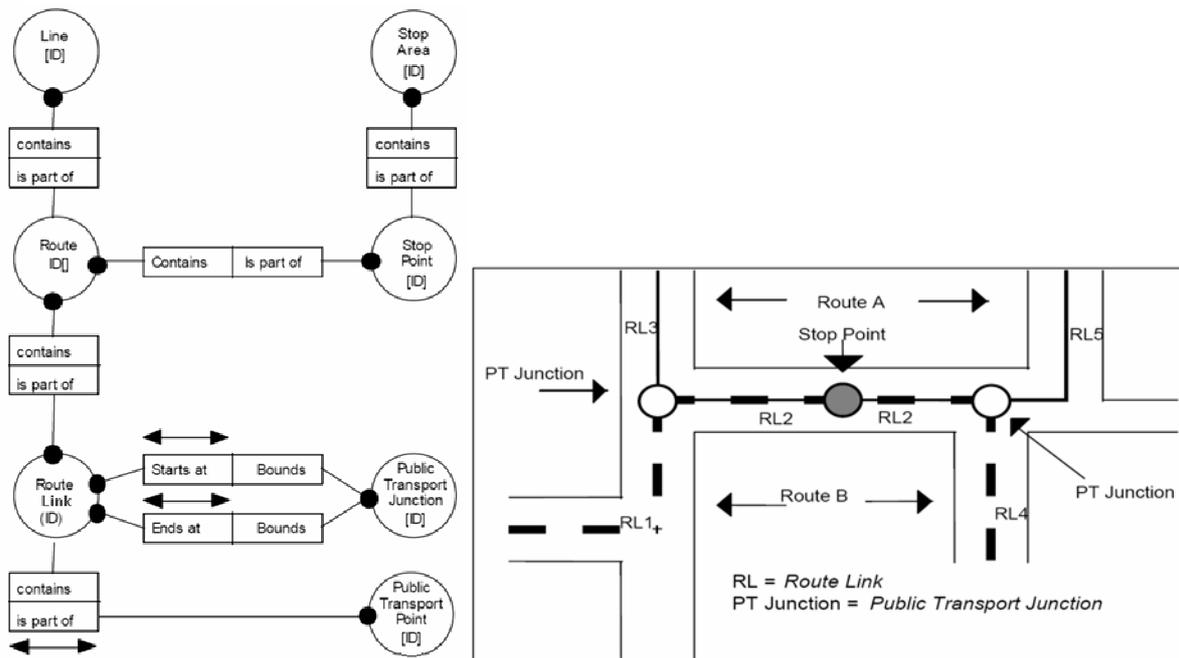


Abbildung 4-4: Datenmodell für den öffentlichen Verkehr in GDF (ISO 14825 (2002))

Die Struktur des GDF erlaubt, multimodale Verkehrsnetze im Datenbestand abzubilden. Beispielsweise ist in der Definition über das Attribut „Form of Way“ vorgesehen, Straßen als „Fußgängerzonen“ in den Datensatz einzupflegen. Ein Fußgängeretz aus den erfassten Grunddaten aufzubauen, wie es beispielsweise KOLBE (2002) vorsieht, ist jedoch als sehr aufwendig einzustufen. Als etwas weniger komplex ist das Radwegenetz einzuordnen. Anhand der vorhandenen Daten wird ein Großteil eines fahrradbefahrbaren Netzes aus den Daten ableitbar sein. Aber die Vollständigkeit und Korrektheit ist aufwendig zu überprüfen und ggf. nachzuarbeiten. Die GDF Struktur des Verkehrsnetzes wird in der Praxis genutzt. Die ÖPVN Modellierung des GDF ist in Deutschland in der Praxis nicht im Einsatz.

4.1.2.4 Planungssysteme (Open.P)

In einer Kooperation der beiden Karlsruher Firmen PTV und INIT wurde ein offenes Datenmodell entwickelt, das auf dem VDV-Standard sowie den internationalen Standards der EU (TRANSMODEL) und der USA (TCIP) aufbaut. FRIEDRICH UND PRUNDEL (2000) beschreiben ein umfassendes Anwendungsgebiet von Open.P, das die Datenbereiche Kalender, Fahrzeuge, geographische Netzdaten, ÖV-Netz, Linienetz, Fahrplan, Umlauf und Dienste (Personal) berücksichtigt.

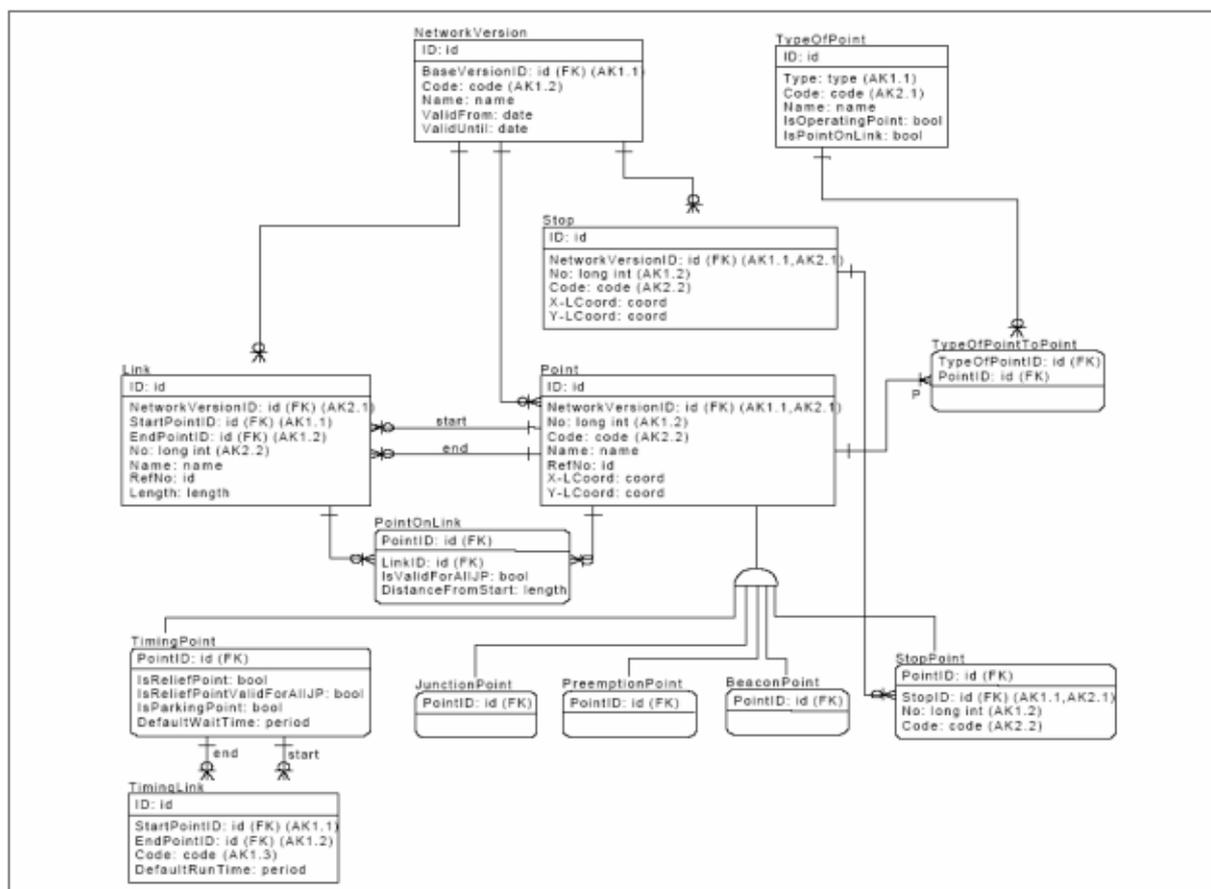


Abbildung 4-5: ÖV-Netz Darstellung des Open.P-Datenmodells (FRIEDRICH UND PRUNDEL 2000)

Das Datenmodell findet Anwendung in einem von INIT und PTV entwickelten Fahr- und Dienstplanungssystem. Von der Firma PTV existiert in einer neueren Entwicklung die Verknüpfung zum Produkt VISUM. Dieses Produkt bietet auch die Möglichkeit, Verkehrsnetze, darunter auch das ÖPNV-Netz, zu modellieren.

4.1.2.5 Fahrgastinformation (EFA-DIVA)

Die Firma Mentz DV erstellt Software für den ÖPNV. Ein wichtiges Produkt ist die elektronische Fahrplan-Auskunft. Im Rahmen der Weiterentwicklung zu einem intermodalen Routensuch-Programm war es notwendig, die ÖPNV-Daten mit den Daten des Verkehrsnetzes (GDF-kompatibel) zu verknüpfen. Auf der Basis dieses Werkzeuges konnten nun durch Verkehrsverbünde Datenbestände aufgebaut werden, die den Anforderungen des intermodalen Routings genügen. Ein Programm zur Anzeige wurde entwickelt, um dem Kunden die von ihm angefragte intermodale Route georeferenziert darzustellen.



Abbildung 4-6: Datenmodell des FGI-Systems EFA-DIVA (nach STARK, TORLACH 2003)

Das DIVA-Datenmodell geht von einem dreistufigen Haltestellenmodell aus. Dabei wird eine Haltestelle in Haltebereiche und Steige (Haltepunkte) gegliedert. Steige sind im multimodalen Sinne als Ort zu verstehen, an dem das Verkehrsmittel gewechselt wird oder an dem ein Um-

steigebauwerk betreten wird. Für den Begriff des Steiges werden die Worte Mast, Haltepunkt und Zugangspunkt synonym verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird vorrangig der Begriff Haltepunkt (siehe Kapitel 2.4) konform zum VDV-Datenmodell verwendet. Haltebereiche sind zur Modellierung von Umsteigezeiten innerhalb eines Bauwerkes eingeführt worden.

4.2 Datenstruktur des Prototyps des GeoRBL

4.2.1 Datenmodell

Das Erstellen der Datenstruktur für eine prototypische GeoRBL erfolgte im Rahmen des Projektes RUDY. Im Projektrahmen mussten wirtschaftlich die gegebenen Ziele der Umsetzung eines Störungsmanagementsystems und einer Flexiblen Bedienform erreicht werden. Daher wurde die Geodatenstruktur existierender Systeme weitgehend angehalten und gegebenenfalls applikationsspezifisch optimiert. Es wurde festgestellt, dass die Datenstrukturen der in der Region aus der FGI stammenden Geodaten (siehe Kap. 4.1.2.5) den Anforderungen des Prototyps entsprechen und sogar darüber hinausgehen. Daher wurden Teile dieser Datenstruktur verwandt. Die Fahrplandaten wurden aus dem RBL der SWU übernommen und direkt in einer Tabellenstruktur bereitgestellt. Diese VDV-konforme Datenstruktur konnte zum Abgleich der Geodaten mit dem Fahrplan genutzt werden.

Für die Daten des Busvorzugsstraßennetzes stand ein Straßennetz der Firma PTV bereit, das für das Routing von PKW ausgelegt ist. Die Straßenelemente lagen in einem gängigen GIS-Austauschformat vor, so dass die Daten in das am Institut existierende GIS-System leicht übernommen werden konnten.

Zur Verwaltung und Anzeige der Geodaten im GeoRBL und zur Routenberechnung wurde das System ArcGIS in der Version 8.3 genutzt. Zu Beginn der Projektlaufzeit wurde dieses modern konzipierte GIS als System auf dem Markt eingeführt und im Laufe der Projektzeit mit diversen Upgrades und Servicepacks zu einem stabilen Anwendungssystem. Leider wurde die anfangs in Aussicht gestellte Portierung der „Extention Network Analyst“ mit der entsprechenden Routing-Funktionalität der alten Version nicht in den ersten drei Jahren vollzogen. Im standardmäßig implementierten „Utility Network Analyst“ ist in der Routensuchfunktion die Berücksichtigung von Abbiegeverböten nicht möglich.

Die Geodaten können in ArcGIS in so genannten Geodatabases abgespeichert werden. Die Besonderheit dieses Datenformates ist, dass die Geometrie-Informationen gemeinsam mit den Sachdaten in einer relationalen Datenbank gespeichert werden. In der Tabellendarstellung der Dateninhalte der modellierten ÖV-Objekte sollen lediglich die Attribute dargestellt werden, die Sachdaten enthalten. Weitere Attribute zur Organisation der Geodatabase sowie die Geometrie der Objekte werden nicht aufgeführt. Es folgt eine Beschreibung der Objekttypen des Datenmodells. Die konkrete Beschreibung der Objekttypen ist in der Anlage zu dieser Arbeit dokumentiert.

4.2.1.1 Haltestellen

In den Anwendungsgebieten des Projektes RUDY ist der Regelfall, dass für Busse eine Haltestelle ein bis zwei Haltepunkte umfasst. Entsprechend dem VDV-Modell erfolgt eine Untergliederung einer Haltestelle lediglich durch Haltepunkte. Haltebereiche wie sie in der Ursprungsdatenquelle enthalten sind, konnten bei der Konvertierung entfallen.

4.2.1.2 Teilstrecken

Die Teilstrecken enthalten die Information, um ein topologisches Netz der Haltepunktverbindungen zu generieren. Teilstrecken können auch aus einem Routing-Algorithmus direkt aus dem Busvorzugsstraßennetz als Punktfolgen generiert werden. Die Teilstrecken enthalten auch die Information, die notwendig ist, um fahrzeugspezifische Routen zusammenzustellen. Die Routen bestanden aus Waypoints, die so ausgewählt waren, dass sie durch das eingesetzte Navigationssystem genutzt und korrekt interpretiert werden konnten.

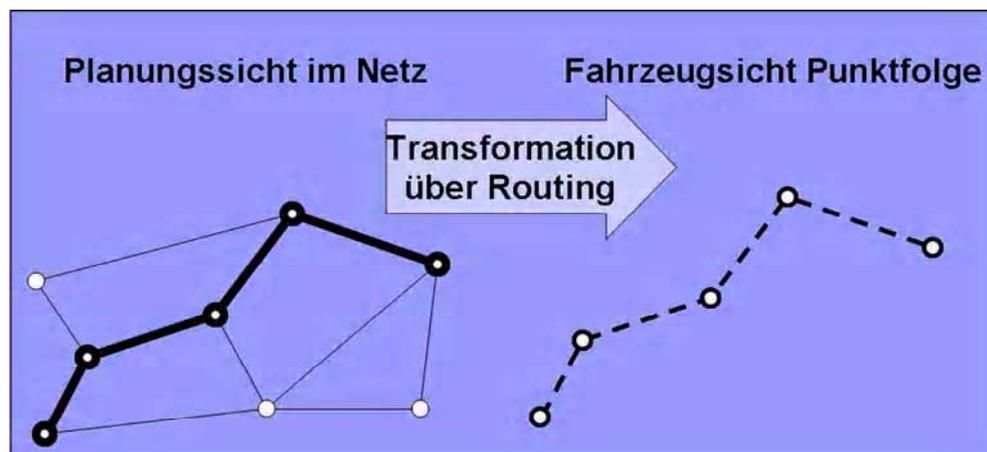


Abbildung 4-7: Transformation von Netzdaten in Punktfolgen

4.2.1.3 Vorzugsstraßennetz

Die Information des vom ÖPNV nutzbaren Straßennetzes wurde im Rahmen des Projektes komplett den Straßenelementen zugeordnet. Eine Modellierung der Kreuzungspunkte wurde nicht vorgenommen. Entsprechend dem Modell, das dem im GIS-System verfügbaren Routensucher zugrunde liegt, wurden für jede Fahrtrichtung Reisezeiten definiert. Eine in der Praxis notwendige Ableitung der Informationen, die fahrzeugtypspezifisch die Routenwahl beeinflussen, wurde im Rahmen dieser prototypischen Implementierung nicht vorgenommen.

4.2.2 ÖPNV-Daten-Import

Im Bereich des Verkehrsverbundes des DING wurden Haltestellen im Rahmen des Projektes MOBILIST erfasst. Ziel der Erfassung ist die intermodale Fahrplanauskunft über das System EFA. Die Datenmodellierung orientiert sich an dem verwendeten Auskunftswerkzeug. Für das Projekt RUDY wurde in Kooperation mit den RUDY-Konsortialpartner Mentz DV ein Datenaustausch über ein XML-Format definiert und umgesetzt. Eine unmittelbare Bearbeitung der Daten in dem im Projekt eingesetzten GIS ist durch die entstandenen Konverter möglich.

Die Schnittstelle sieht sowohl ein koordinatensystem-basiertes Referenzsystem als auch ein datensatzspezifisches Referenzierungskonzept vor. Sofern in der Verkehrsregion ein gemeinsames Verkehrsstraßennetz als Referenz zur Verfügung steht, können direkt über entsprechende Trassenelement-Kennziffern die Objekte zugeordnet werden. Die Ortsfestlegung eines Punktes auf den orientierten Trassenelementen erfolgt mittels einer Prozentangabe, die die Aufteilung der Strecke des linearen Objektes beschreibt.

```

=<divaGeo:Stop id="6750" name="Bräuhaus" nameWithPlace="Hailtingen
Bräuhaus" omc="08426035" type="48" validFrom="2001-09-10T00:00:00-
00" validTo="2500-12-24T23:59:59-00">
  <divaGeo:Coord x="9535749" y="48139899" />
  <divaGeo:GeoRef edge="537965315" distance="8.05847" />
</divaGeo:Stop>

```

Abbildung 4-8: Beispiel XML-Austauschformat Haltestelle ohne Haltebereiche und -punkte

Das in Abbildung 4-9 dargestellte Beispiel soll Detailspekte der beiden Referenzierungssysteme verdeutlichen. Die durch Dreiecke symbolisierten Haltestellen werden lotrecht auf das entsprechende Straßenelement abgebildet. Die Ortsbeschreibung des Haltepunktes 1 im objektbezogenen Referenzsystem lautet: Auf Objekt 4 bei 25 % der Gesamtlänge ausgehend vom Ursprung des gerichteten Straßenelements. Diese objektbezogene Ortsangabe lässt sich durch die Georeferenzierung des Straßenelements auch in Koordinaten umrechnen. In der Abbildung sieht man leicht, dass die Koordinaten des Haltepunktes in den beiden Systemen unterschiedlich sind.

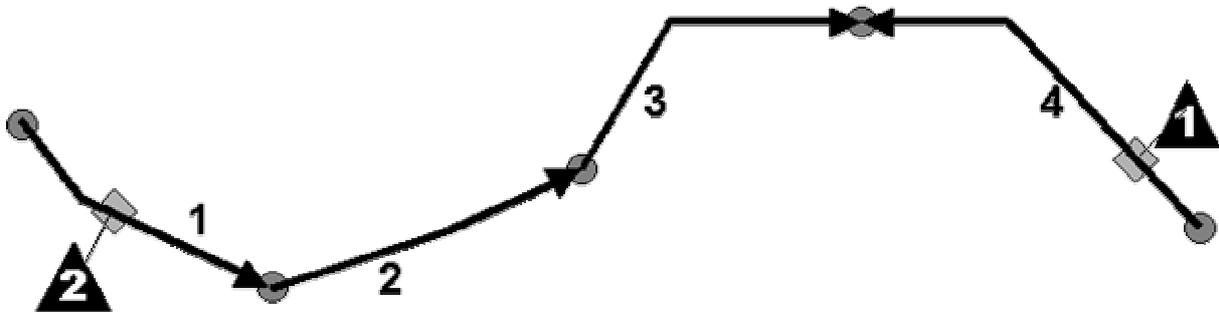


Abbildung 4-9: Objektbezogene Referenz der Haltestellen und Teilstrecken

Da im Projekt RUDY kein vollständiger Referenzdatensatz zur Verfügung steht, wird die koordinatenbasierte Schnittstelle genutzt. Die Übertragung der Teilstrecken auf die digitale Straßenkarte im GeoRBL erfolgt über einen einfachen Referenzierungsübersetzer.

5 Geodaten-Bereitstellung für ein prototypisches GeoRBL

Dieses Kapitel beinhaltet die Umsetzung des Geodatenflusses in die im Anhang beschriebene Datenstruktur eines prototypischen GeoRBL im Rahmen des Projektes RUDY. Nach dem Import wurde die Qualität der Daten analysiert. Die dort festzustellenden Differenzen zu den Anforderungen führten zu einer Nacherfassung von Haltepunkten und Teilstrecken im Gebiet der flexiblen Bedienungsformen. Die praktische Umsetzung der Geodatenaufbereitung wird abschließend bewertet.

5.1 Geodatenimport aus einem Fahrgastinformationssystem

Das Bereitstellen der Datengrundlage ist eine der wesentlichen Aufgaben zum Betrieb des GeoRBL. Im Rahmen dieser Arbeit werden bei der Datenaufbereitung lediglich die Geodaten betrachtet. Die erfolgte Integration der fahrplanrelevanten Daten des RBL mit Geodaten wird nur im notwendigen Umfang erwähnt.

Da in Ulm bereits über das Projekt MOBILST Geodaten des ÖPNV für die elektronische Fahrplanauskunft EFA bei der Donau-Iller-Nahverkehrsgesellschaft (DING) erstellt wurden, sollte diese Datenquelle genutzt werden. Darüber hinaus konnte im Projekt die gleiche Digitale Straßenkarte eines kommerziellen Anbieters als Datengrundlage lizenziert werden, die zur Georeferenzierung der Haltestellen genutzt wurde. Die Geodaten hatten den Stand November 2001 und differierten damit zu den Fahrplandaten um ca. ein Jahr. Der korrespondierende Fahrplan aus dem RBL der SWU wurde für den Bereich, in dem das Störfallmanagement erprobt werden sollte, mit den Geodaten abgeglichen. Die Architektur des Datenflusses hat

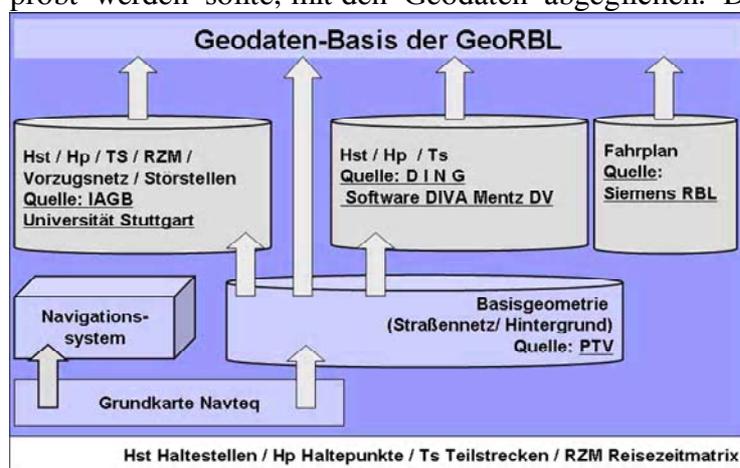


Abbildung 5-1: Geodatenzufluss zum GeoRBL im Projekt RUDY

(Abbildung 5-1) die Generierung einer Geodatenbasis für das GeoRBL als Ziel. Als Integrationsplattform diente das GIS ArcGIS 8.3 der Firma ESRI. Dieses System ist im Rahmen dieses Forschungsprojektes auch als Basis für die Anwendungen des Fahrzeugmonitoring und der interaktiven Erstellung und Bewertung von Umwegrouten definiert.

5.1.1 Grundkarte

Der im GDF-konformen Standard erhobene Geodatenbestand der Firma Navteq ist die Basis der Geodatenversorgung im Projekt. Er ist Grundlage für das gewählte Navigationssystem, das den Fahrer bei der Fahrt auf den von dem RBL vorgegebenen Routen unterstützen soll. Dieser Datenbestand ist durch die Firma PTV weiterbearbeitet, so dass z.B. Reisezeitschätzungen für PKW existierten. Diese Werte dienen als erste Näherung für die Ableitung der Reisezeiten von Bussen. Die GDF-Daten konnten vom vorgelegten Austauschformat über einen Standardkonverter in das verwendete GIS-System konvertiert werden. Die Objekte des GDF-Themas „Landuse“ konnten zur Visualisierung genutzt werden.

5.1.2 ÖPNV-Objekte

Die Donau-Iller-Nahverkehrsgesellschaft (DING) generierte im Rahmen des Projektes MOBILIST einen Geodatenbestand für die intermodale Routenberechnung unter Nutzung des gleichen Straßennetzes als Referenz. Haltestellen, Haltebereiche oder Haltepunkte wurden erfasst oder aus anderen Quellen in das Programmsystem DIVA eingepflegt. Die Berechnung der Teilstrecken wird in DIVA durch ein Routensuchprogramm unterstützt.

Eine wichtige Aufgabe ist neben dem Erfassen der ÖPNV-Objekte die Aufbereitung der Verkehrsnetze. Die zugrunde liegende Geometrie des Straßennetzes umfasst nicht alle im ÖPNV genutzten Trassen. Konkret ist in Ulm die Trasse der Straßenbahnlinie baulich so gestaltet, dass sie auf weiten Strecken auch für Busse befahrbar ist. Da diese Trasse jedoch in dem Ausgangsdatensatz nicht enthalten ist, musste sie nachgepflegt werden.

Das Ausgangsdatenmodell definiert Teilstrecken sowohl als Verbindungen zwischen Haltestellen als auch als Verbindungen zwischen Haltepunkten. Diese Flexibilität des Datenmodells ermöglicht Einsparungspotenzial bei einfach strukturierten Haltestellen. Für ein Auskunftssystem wird bei einem Kunden kein Informationsdefizit auftreten, wenn lediglich die Bushaltestellen geographisch referenziert dargestellt werden und die Haltepunkte an einem Straßenelement genau gegenüber liegen. Für die betriebliche Organisation ist es jedoch zweckmäßig Teilstrecken lediglich zwischen den Haltepunkten zuzulassen.

5.1.3 Fahrplan

Die Stadtwerke Ulm nutzen ein RBL der Firma Siemens, das auf einem relationalen Datenbanksystem aufbaut. Dieses RBL ist konform mit den VDV-Datenmodellen. Der Export der Fahrplan-Daten erfolgte über eine VDV-konforme Schnittstelle über ASCII-Dateien.

5.1.4 Datenanpassung

Bereits bei der Konzeption des Aufbaus des Geodatenbestandes wurde damit gerechnet, dass Anpassungen, Korrekturen und Nacherfassungen auftreten werden. Zur Nutzung der Geodaten der ÖPNV-Objekte mussten sie mit den Fahrplandaten des RBL verknüpft werden. Bei der Erfassung der Geodaten für die FGI wurde ein Abgleich der Kennziffern für Haltestellen und Haltepunkte vorgenommen. Daher konnten bis auf wenige Ausnahmen die Daten direkt verwendet werden. Dabei wurde jedoch nicht der gesamte Fahrplan zugrunde gelegt. Lediglich ein Standard-Betriebstag (Montag bis Donnerstag mit Schul- und Universitätsbetrieb) wurde umgesetzt. Im Bereich der Haltestellen und Haltepunkte gab es lediglich vier Haltestellen, die nicht unmittelbar angepasst werden konnten. Hier lagen Umbenennungen vor bzw. es wurden im Fahrplan Ausweichhaltestellen wegen langfristigen Bauarbeiten integriert.

Die Anzahl der Teilstrecken und die Anzahl der durch die RBL geforderten Haltepunktverbindungen differierten dagegen deutlich. Insbesondere waren betriebsinterne Fahrten im RBL-Fahrplan enthalten, die bei dem Geodatenbestand zur Fahrgastauskunft nicht enthalten waren. Da die Anzahl nach der Eliminierung von Einsetz- und Rückkehrfahrten und Fahrten innerhalb einer Haltestelle gering war, konnten die Daten am effektivsten manuell unter Verwendung eines Standardprogramms zur Routensuche ergänzt werden.

Die Teilstrecken aus dem FGI-System mussten mit dem Straßennetz verknüpft werden. Die Daten wurden auf dem gleichen Datensatz des gleichen Herstellers referenziert. Da jedoch der Datensatz, der der Erfassung der Teilstrecken zugrunde liegt, erweitert wurde, um die Strecken, die nicht für PKW befahrbar sind, konnte ein automatischer Abgleich aller Teilstrecken

über die Koordinaten der Straßenelemente nicht erfolgen. Um das vollständige Abbild der Teilstrecken zu erhalten, wurden zur Referenzierung die Kreuzungen verwendet. Die Kreuzungskennziffer wurde in die Beschreibung der Teilstrecken aufgenommen.

Straßenelemente, die von einer Störung betroffen sind, werden durch die angrenzenden Kreuzungen und eine Richtungsangabe identifiziert. Damit kann für die Teilstrecken die Störungsinformation ermittelt werden.

5.2 Analyse der importierten Daten

Die Analyse der Geodaten, die für das gesamte Gebiet des DING zur Verfügung gestellt wurden, zeigten ein heterogenes Bild in der erfassten Modelltiefe. Lediglich im Bereich der SWU konnte im Jahre 2001 flächendeckend von einer Erfassung der Daten bis zu Haltepunkten ausgegangen werden. Für weite Bereiche des DING war lediglich die Angabe der Haltestelle mit einer Koordinate vorhanden, in einigen Bereich variierte die Modellierungstiefe.

Speziell für die geplanten Gebiete, in denen der routenflexible Betrieb aufgenommen werden soll, wurden im Rahmen einer Diplomarbeit (ENGELHARDT 2003) Untersuchungen zur Lagegenauigkeit der Daten vorgenommen. Als Lagereferenz zu den Koordinaten der importierten Haltestellen wurden Messungen mit einem GPS-Handheld-Empfänger und einem Fahrzeugnavigationssystem durchgeführt. Es wurden die Differenzen der im WGS 84-System vorliegenden Koordinaten im lokalen Bezugssystem ermittelt (Abbildung 5-3).

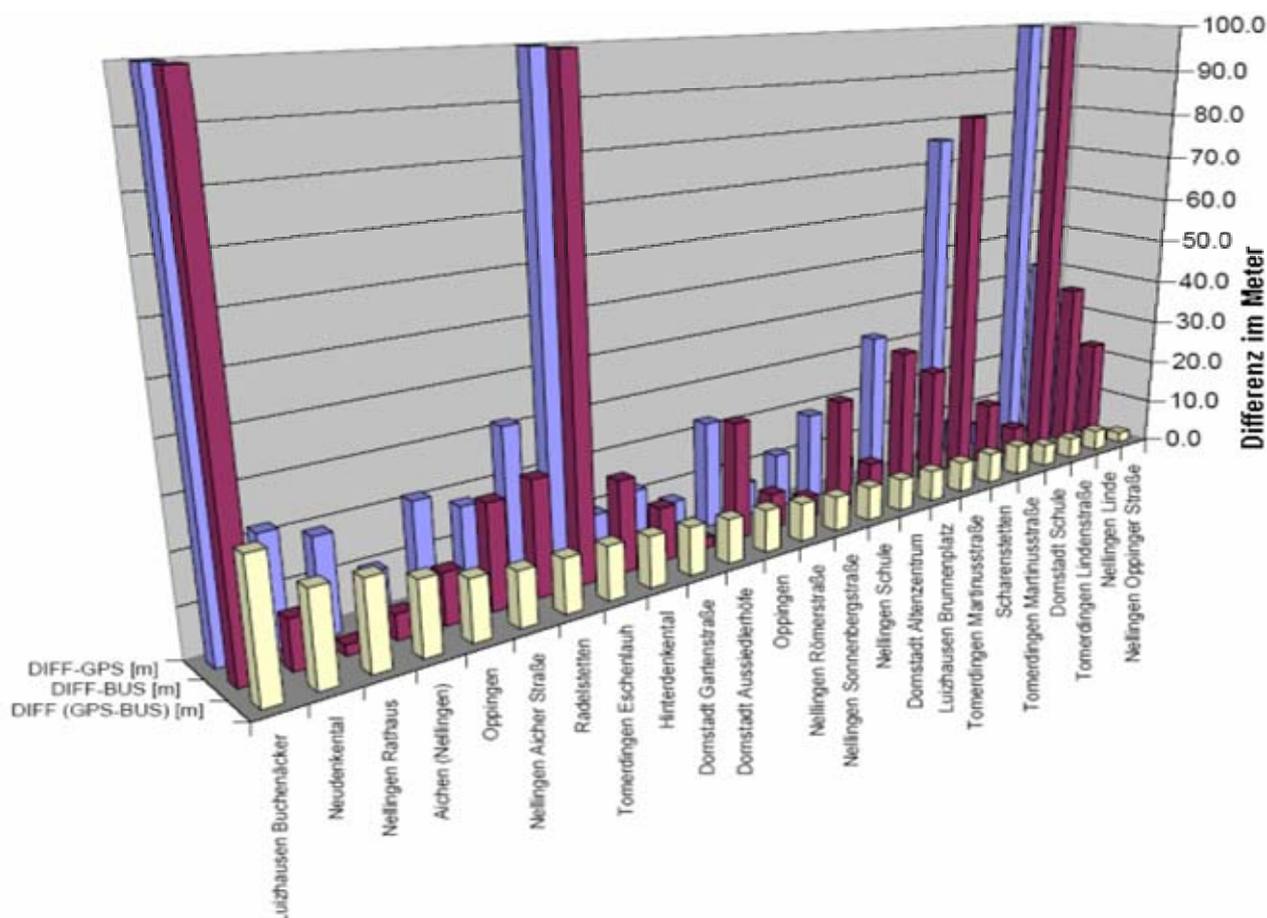


Abbildung 5-2: Differenzen zwischen Haltepunktkoordinaten der DIVA-Daten, GPS-Koordinaten und Koordinaten des Navigationssystems

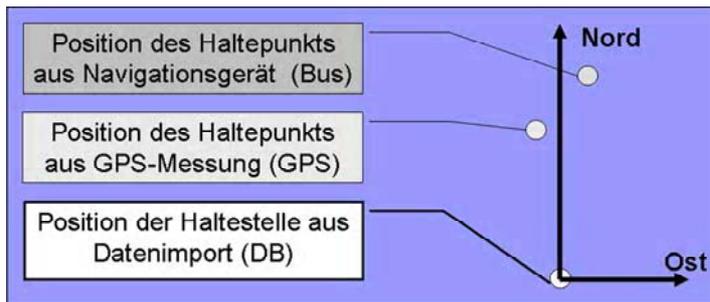


Abbildung 5-3: Koordinatenangaben an einem Haltepunkt

Abbildung 5-2 zeigt in der vordersten Reihe die Koordinatendifferenzen, die zwischen den beiden unabhängigen Messsystemen auftraten. Durch die Sortierung nach diesen Differenzen lässt sich leicht die Güte der Messung ablesen. Der größte Wert ergab sich aus unterschiedlichen Aufnahmeorten wegen der verkehrsbedingten Parksituation des Fahrzeugs. Die weiteren Werte zeigen, dass hier die Abweichung der GPS-Messung gegenüber den vorliegenden Daten signifikant größer ist als die Abweichung zur Position, die durch das Navigationssystem ermittelt wurde.

Vergleicht man die beiden hinteren Reihen, so zeigen sie größtenteils einen ähnlichen Verlauf, was darauf schließen lässt, dass für die Differenzen die Datenbank-Koordinaten verantwortlich sind und nicht die Unsicherheiten im redundanten Messkonzept. Insbesondere wird diese Tatsache an den extremen Abweichungen deutlich, die bis zu 500 Meter betragen. Bei diesen Abweichungen handelt es sich entweder um grobe Erfassungsfehler oder um nicht nachgeführte verlegte Haltepunkte, wie durch Vergleich mit alten Verkehrslinienplänen nachzuvollziehen war.

Die Folgerung aus der Analyse der importierten Daten ist getrennt für die Gebiete der Szenarien des Störfallmanagements und der flexiblen Bedienformen zu sehen.

Für den Bereich des Störfallmanagements liegt eine deutlich bessere Datenqualität vor, da in der Modelltiefe stets die Haltepunkte berücksichtigt sind. Die Lagegenauigkeit wurde mit einer Stichprobe in diesem Gebiet von lediglich 10 Messungen durchgeführt. Ohne zwei als grob falsch klassifizierte Messungen beträgt die Standardabweichung 13,4 Meter. Folglich sind Nachmessungen im Bereich des Stadtgebietes von Ulm im Rahmen des Projektes notwendig. Da die Anwendung im Stadtgebiet von Ulm szenarienbasiert erfolgt, wird eine Vermessung auf die Haltepunkte der Szenarien beschränkt. Die Erfassung der Lage dieser Haltepunkte erfolgt im Rahmen der Testfahrten für die Szenarien.

Für die Gebiete, in denen die flexible Bedienform operieren soll, lagen ähnliche Werte vor. Von 30 Messungen wurden 6 als grob falsch klassifiziert (20 %). Die Standardabweichung der restlichen Messungen betrug 10 m. Da es sich hier um einen operativen Betrieb handeln wird, der mit Fahrgästen und wechselnden Fahrern über einen Zeitraum von mehreren Monaten betrieben werden soll, ist es notwendig, eine vollständige Neuerfassung für diese Bereiche durchzuführen, da die Anzahl der groben Fehler in der Stichprobe zu hoch ist.

5.3 Datenaufbereitung und Neuerfassen von Geodaten für die GeoRBL

Nach der Erfassung der Haltepunkte werden aus einem bereitzustellenden Vorzugsstraßennetz die Haltestellenverbindungen für einen routenflexiblen Betrieb ermittelt.

5.3.1 Haltepunkte

Für die Gebiete der flexiblen Bedienformen musste die Lage der Haltepunkte komplett neu erhoben werden. Daher wurde ein Messkonzept entwickelt, das eine kontrollierte Erfassung der Haltepunkte vornimmt.

5.3.1.1 Anforderungen

Die höchsten Anforderungen zur Lagequalität kommen aus der Anwendung der bordrechnergesteuerten Anzeige. Um die An- und Abfahrt am Haltepunkt mit einer hohen Wahrscheinlichkeit detektieren zu können, sind die Koordinaten in einem Toleranzbereich von +/- 15 Metern erfasst worden. Die Fehlerrate soll 95 % nicht überschreiten. Eine kontrollierte Erfassung wird gewählt, um Nachbesserungen im laufenden Betrieb zu vermeiden.

5.3.1.2 Messkonzept

Der Hauptsensor ist das Positionsbestimmungsmodul des Navigationssystems. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass der gleiche Positionsbestimmungssensor, mit dem anschließend auch die Anwendung operiert, genutzt wird. In der Untersuchung Kapitel 6.3.3 wurde die Genauigkeit der Lagebestimmung (Standardabweichung) des Navigationssystems mit ca. 4 Metern ermittelt. Diese Genauigkeit entspricht somit den Anforderungen. Koordinaten im WGS 84-Koordinatenbezugssystem der unabhängigen Positionssensoren Navigationssystem und GPS können vor Ort miteinander verglichen werden. Damit können grobe Abweichungen vor Ort erkannt werden. Gegebenenfalls kann durch Mehrfachaufnahme geklärt werden, ob und wo ein Messfehler auftrat.

5.3.1.3 Durchführung

Das Erfassungstool stellt die Haltepunkte, die in der Datenbank gegeben sind, anhand eines Fangkreises der aktuellen Position dar. Die Größe des Fangkreises ist wählbar. Der maximale Fangkreis umfasst die Größe des gesamten Gebiets. Es kann gewählt werden, ob nur die Haltepunkte angezeigt werden sollen, die noch nicht erfasst wurden.

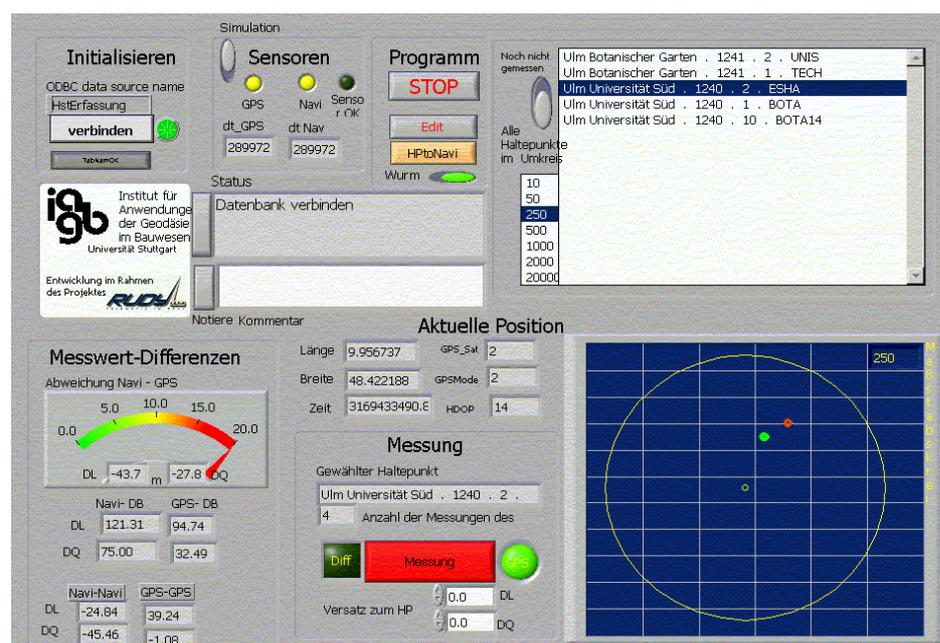


Abbildung 5-4: Bedienbildschirm des Erfassungssystems (Simulation)

Sobald ein Haltepunkt gewählt ist, werden in der graphischen Anzeige die Datenbankposition und der Fangkreis eingeblendet. Die Positionen aus GPS und Navigationsgerät werden auch angezeigt. Die direkte Differenz der Positionen ist über das Zeigermodul ablesbar. Der Fehler wird auch aufgeteilt in Komponenten in Fahrrichtung und quer zur Straße. Darunter sind die Differenzen der gemessenen Positionen zu dem Ort des ausgewählten Haltepunkt in der Datenbank.

Eine Erfassung gilt als erfolgreich, wenn die Differenz zwischen GPS und Navigationssystem kleiner/gleich als 15 Meter ist. Sollte dies nicht der Fall sein, wird der Haltepunkt erneut angefahren. Im Falle einer Wiederholungsmessung wird die Differenz zu dem Mittelwert der vorigen Messungen mit dem jeweiligen System angezeigt. Daraus sollte ableitbar sein, ob ggf. ein Sensor ungenaue Werte geliefert hat. Lediglich zwei Haltepunkte wurden doppelt angefahren. 89 % des Vergleichs Navi-GPS liegen im Bereich von 15 Metern. Die Standardabweichung der Differenz zwischen GPS und Navigationssystem beträgt 4,8 Meter. Beim Vergleich mit den gegebenen Positionen aus der ursprünglichen Datenbank liegen lediglich 50,5 % der Haltepunkte innerhalb von 15 Metern.

Die Haltepunkte, die doppelt angefahren wurden, sind jeweils Wendeschleifen. Diese beiden Fehlmessungen basieren auf zwei systembedingten Eigenheiten des Navigationsgerätes. In dem einen Fall (Haltepunkt Wilhelmsburg) fehlt die Wendeschleife im Datensatz des Navigationssystems. Das Map-Matching funktioniert also an dieser Stelle nicht. Die Bestimmung der Haltepunktcoordinate variiert stärker, da das Abbilden auf das Straßennetz nicht möglich ist. Im zweiten Fall lag bei der Messung der Ort des Fahrzeugs noch auf einem nahen anderen Straßenelement. Durch die kleinmaschigen Straßenelemente rund um die Wendeplatte konnte das Navigationssystem von sich aus noch nicht signifikant unterscheiden, welches Straßenelement genutzt wird. Durch das Konzept des Multipath Routing werden in derartigen Situationen zunächst mehrere Varianten der Straßennutzung als wahrscheinlich angenommen. Die Größe der Wendeschleife lässt jedoch keine systeminterne eindeutige Entscheidung zu. In der Wiederholungsmessung konnte der korrekte Wert ermittelt werden.

5.3.2 Haltepunktverbindungen und Reisezeitmatrix

Im Projekt RUDY treten zwei Ausprägungen von Haltepunktverbindungen auf. Zum einen sind die Teilstrecken aus dem Fahrgastinformationssystem bereits über Koordinaten gegeben. Hier besteht die Aufgabe, die Teilstrecken auf das im System verfügbare Referenzstraßennetz abzubilden, um somit die notwendigen Analysen zu tätigen, ob eine Haltepunktverbindung von einer Störung betroffen ist. Zum Anderen besteht die Aufgabe, Haltepunktverbindungen neu zu generieren. Diese Haltepunktverbindungen sollen dem Dispositionsalgorithmus der flexibeln Bedienform in Verbindung mit einer Reisezeitmatrix zur Verfügung gestellt werden. Dem GeoRBL müssen die Trajektorien der Haltepunktverbindungen bekannt sein, damit der Fahrer über den Fahrtverlauf unter Nutzung eines Navigationssystems informiert und der Fahrtverlauf entsprechend überwacht werden kann.

5.3.2.1 *Ermitteln des Vorzugsstraßennetzes*

Um bedarfabhängige flexible Bedienungsformen planen zu können, sind die benötigten Zeiten zwischen den Orten zu ermitteln, die angefahren werden müssen. Hierzu sind noch die Fahrwege zwischen diesen Orten festzuhalten.

In der Regel werden bei Bedarfsverkehren nur kleine Fahrzeuge eingesetzt, da ja die Voraussetzung für einen flexiblen Betrieb eine geringe Verkehrsnachfrage ist. Wird jedoch die Fortsetzung einer Linie als flexible Bedienform geplant, so treten Restriktionen im Straßennetz auf, die bei der Tourenberechnung zu berücksichtigen sind. Es dürfen beim Einsatz größerer Fahrzeuge z.B. keine Wendevorgänge enthalten sein.

Ein Vorzugsstraßennetz ist im vorliegenden Fall zu definieren, das für die Disposition von großen Bussen geeignet ist. Die Linienwege ergeben sich dann durch einen Routenplanungsalgorithmus, der einen optimierten Weg zwischen den Haltepunkten findet. Das Festlegen dieses Netzes muss mit dem Expertenwissen der Verkehrsunternehmen festgelegt werden und ist abhängig von dem eingesetzten Fahrzeugtyp.

Die Auswahl von Straßenelementen zur Festlegung eines Bus-Vorzugsstraßennetzes erfolgte nach folgenden Kriterien:

- Straßenelemente, auf denen bereits Buslinien verkehren
- Höhere Straßenklassen
- Berücksichtigung klassischer Restriktionen für große Fahrzeuge, wie zum Beispiel maximale Tragfähigkeit von Brücken
- Kontrolle durch Experten

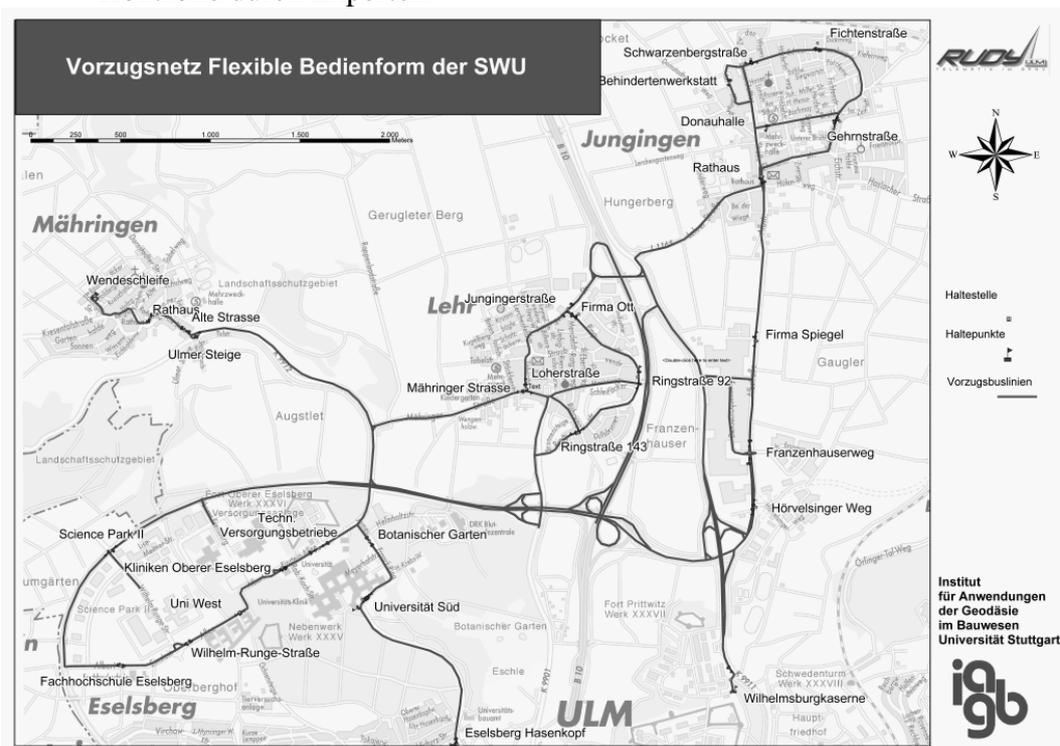


Abbildung 5-5: Vorzugsstraßennetz im Gebiet Ulm-Nord (Kartenhintergrund: DING 2003)

5.3.2.2 Erfassungskonzept

Bedarfsabhängige Dispositionssysteme erhalten als Eingabe Fahrtwünsche zwischen zwei Orten. Zur Berücksichtigung des Fahrtwunsches ist der damit verbundene Zeitbedarf mit den zeitlichen Restriktionen der Umlaufplanungen der Fahrzeuge abzugleichen. Dazu ist das Vorzugsstraßennetz mit adäquaten Reisezeiten zu attributieren. Die Raum-Zeit-Relation kann mit Routing-Algorithmen vorgenommen werden. Dazu sind die Reisezeiten als Widerstandswerte in der Netzanalyse zu berücksichtigen, um optimierte Fahrwege des Fahrzeugs entsprechend dem Kundenwunsch zu berechnen.

Im Projektkontext wurde das GIS-System ArcGIS 8.3 von ESRI genutzt. Wichtiger Entscheidungsgrund war die Übernahme der Geodatenverwaltung in einer relationalen Datenbank und die von ESRI bereits angebotene Netzanalyse. Leider stand im Projektzeitraum keine Netzanalyse mit Abbiegerestriktionen für die aktuelle Version bereit. Die im GIS zur Verfügung stehende Netzanalyse kann ebenfalls nicht die Ab- und Anfahrtsrichtung an Haltepunkten berücksichtigen. Deshalb wird ein zweistufiges Verfahren angewandt.

In der ersten Stufe wird der Standard-Routing-Algorithmus mit den Rahmenbedingungen angewandt, dass die Gegenrichtung der Straßenelemente am Start- und Zielhaltepunkt gesperrt ist. Daraus resultiert eine korrekte An- und Abfahrtsrichtung an den Haltepunkten für die Netzanalyse. Durch das Sperren der Straßenelemente in der Gegenrichtung können bestimmte Netzteile abgeschnitten werden. Wird in Abbildung 5-6 Haltepunkt HP1 als Startpunkt gewählt, so besteht zum Haltepunkt HP2 und dem dahinter liegenden Netzteil durch die Sperrung der Gegenrichtung der Abfahrt keine Verbindung. Das Problem ergibt sich z.B., wenn zwei Haltepunkte auf einer Kante des Vorzugsstraßennetzes liegen. Sofern einer solchen Maschinenkante eine Masche folgt, in der mindestens ein Haltepunkt bzw. ein so genannter Wendepunkt enthalten ist, kann dieser von dem einen Haltepunkt (HP 1) erreicht werden. Der

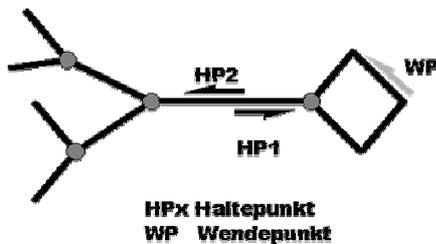


Abbildung 5-6: Skizze abgeschnittener Netzteile durch Vorgabe der Abfahrtsrichtung

zweite Haltepunkt (HP 2) besitzt ebenfalls eine Verbindung ausgehend von dem Wendepunkt (WP). Über eine Kombination dieser beiden Verbindungen kann nun eine Verbindung zwischen den beiden Haltepunkten mit entsprechender Reisezeit und Trajektorienverlauf generiert werden. Als Vorbereitung für das zweistufige Verfahren sind in jeder Masche Wendepunkte für jede Richtung zu ergänzen, falls nicht bereits Haltepunkte in dieser Masche vorhanden sind. Eine weitere Vorbereitung ist die Erfassung aller Abbiegeverbote, die nun in der zweiten Stufe berücksichtigt werden können.

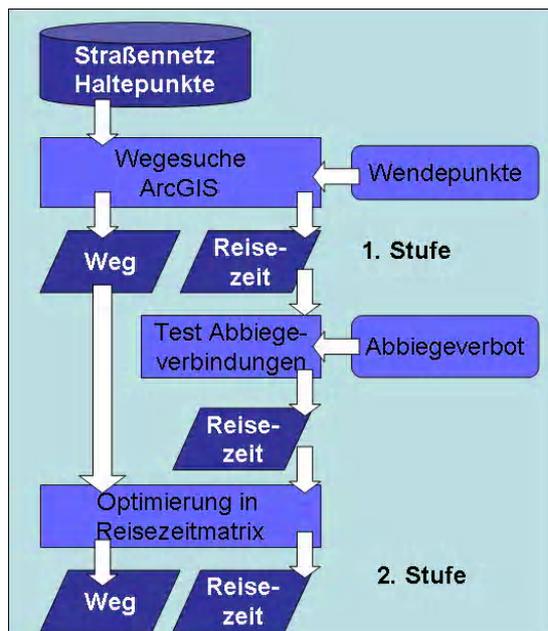


Abbildung 5-7: Ablaufdiagramm der Reisezeitmatrixbestimmung

Zwischen den Haltepunkten und den Wendepunkten können nun mit dem zur Verfügung stehenden Routing-Algorithmus Teilstrecken berechnet werden. Folgende Teilstrecken sind jedoch als ungültig zu definieren und in der Reisezeitmatrix entsprechend zu kennzeichnen:

- Verbindung entgegen einer Einbahnstraße
- Verbindungen, die ein Abbiegeverbot enthalten.

In diesen beiden Fällen wird innerhalb der zweiten Stufe die Reisezeitmatrix derart optimiert, dass gültige Teilstreckenkombinationen ermittelt werden. Die Optimierung der zweiten Stufe erfolgt durch einen Floyd-Algorithmus, der innerhalb der verfügbaren Teilstrecken einen optimierten Weg ermittelt (CHEN 2004).

5.3.2.3 Berechnung und Bewertung der Haltepunktverbindungen

Es stellt sich heraus, dass die für das Straßennetz beschriebenen Geschwindigkeitsvorgaben nicht direkt oder durch einen Faktor anwendbar sind, um die Fahrplanzeiten in allen Netzrichtungen in einem akzeptablen Toleranzband zu halten. Eine Kalibrierung des Netzes ist erforderlich. Über eine Reklassifizierung der Geschwindigkeitsklassen können realistische Fahrzeiten erreicht werden, die sich an Fahrplanvorgaben orientieren.

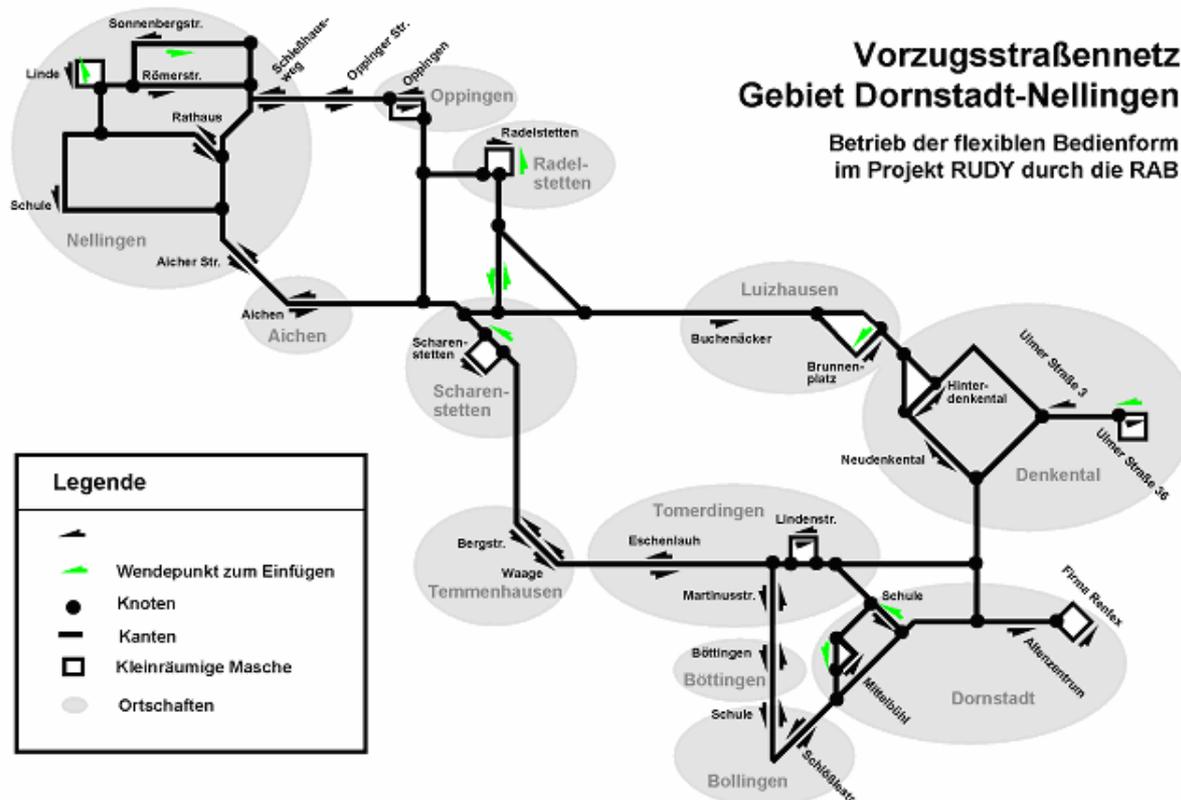


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung des Vorzugsstraßennetzes

5.4 Bewertung der vorliegenden Geodaten und deren Struktur

5.4.1 Bewertung der Geodaten-Bereitstellung

Die in der FGI bereitgestellten Daten besaßen in der damaligen Version eine heterogene Qualität, die nicht überall den Anforderungen entsprach. Mit einer zunehmenden Qualitätssteigerung der Geodaten durch intern wachsende Qualitätsansprüche der FGI, gegebenenfalls durch Rückflüsse aus RBL-Systemen wird diese Datenquelle weiterhin die beste georeferenzierte Informationsquelle für den ÖPNV sein.

Das hier praktizierte Verfahren der Nachmessung der Haltepunkte hat sich projektspezifisch als effizient erwiesen. Geht man von der Annahme aus, dass das Verwenden eines autonomen Positionsbestimmungsverfahrens die Logische und Physikalische Ortung ersetzen kann, so entfällt auch das aufwendige Erheben und Pflegen der Teilstreckenlängen zwischen den Haltepunkten als Basis für diese Ortungssysteme. Die zu erreichende Aufwandminimierung lässt sich leicht qualitativ aus dem Zusammenhang ableiten. Die Koordinate eines Haltepunktes ist für alle auf sie zulaufenden Linien genau einmal zu bestimmen. Im Gegensatz dazu ist bei einer linienbezogenen Positionsverwaltung eines Haltepunktes für jede Linie eine ggf. wechselnde Positionsdefinition zu verwalten und zu pflegen. Für jede zulaufende Route einer Linie

auf einen Haltepunkt ist die Entfernung zum davor liegenden Haltepunkt zu bestimmen. Sofern nicht genau eine Route auf der Linie verläuft, ergibt sich beim in der Arbeit angewandten Verfahren ein minimierter Erfassungsaufwand. Es ist natürlich zu berücksichtigen, dass die ebenfalls für die Abrechnung genutzten Längenangaben nun aus der Karteninformation entnommen werden müssten. Im Speditionsgewerbe ist dies eine anerkannte Vorgehensweise, die jedoch im ÖPNV noch nicht etabliert ist.

Die Funktionalitätserweiterung des RBL durch routenflexibles Störfallmanagement und flexible Bedienungsformen, die fahrzeugseitig mit Zielführungsfunktionalität unterstützt werden, erfordert für eine zuverlässige, auch kurzfristig durchführbare Planung, ein Vorzugsstraßennetz. Betrachtet man nur die Erweiterung eines RBL mit einem Vorzugsstraßennetz ist der Aufwand, ein derartiges Netz bzw. die Referenz auf ein derartiges Netz aktuell zu halten, nicht zu unterschätzen und wird in der Regel nur schwer wirtschaftlich abzubilden sein, da das Störfallmanagement an sich ein Prozess ist, der in der Regel eher als selten eingestuft wird. Somit ist bei einer Umrechnung der Instandhaltungskosten der Geodateninfrastruktur der Kostenblock einer geringen Nutzungszeit gegenüber zustellen. Bei der Bereitstellung des Vorzugsstraßennetzes für den routenflexiblen Betrieb gestaltet sich die Kostenumlage ähnlich schwierig, da diese Funktionalität nur in Gebieten des ÖPNV eingesetzt wird, die kein hohes Verkehrsaufkommen haben und somit in der Regel selbst nicht als wirtschaftlich zu bezeichnen ist.

Die Bereitstellung des Vorzugsstraßennetzes wird somit zu einer strategischen Entscheidung, um die dargestellten Funktionalitäten sowie weitere Funktionen wie z.B. Planungen zu unterstützen. Das Nutzen eines ÖPNV-Vorzugsstraßennetzes für die Bereiche Nahverkehrsplanerstellung mit strategischer Linienplanung, dem Ausschreibungs-, Genehmigungs- und Abrechnungsverfahren ist unbestritten. Da hier jedoch die Zuständigkeiten bei verschiedenen Partnern liegen, ist der Aufbau einer übergreifenden Geodaten-Infrastruktur keine Selbstverständlichkeit.

5.4.2 Geodateninfrastruktur im ÖPNV

5.4.2.1 *Bedarf zur Homogenisierung der Geodatenstrukturen*

Wie aus den Beispielen der Anwendungen von Geodaten im ÖPNV ersichtlich ist, finden Geodaten Anwendung in:

- der Liniennetzplanung
- der Fahrgastinformation (Fahrplanauskunft und ggf. auch aktuelle Änderungen)
- dem operativen Betrieb.

Da es in der Verkehrsregion mehrere Institutionen gibt, die mit den gleichen Daten operieren, liegt die Idee einer gemeinsamen Datennutzung nahe. In VDV (1997) wird bereits die Idee einer Kommunikationsplattform aufgegriffen. DERSE (1999) sieht in der unternehmensübergreifenden Datennutzung einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Verkehrsträgern. Unter dem Aspekt, dass Geodatenbestände bei

- der Genehmigungsbehörde,
- den Aufgabenträgern,
- dem Verkehrsverbund,
- den Verkehrsunternehmen,
- ggf. Ingenieurbüros

mehrfach geführt, stellt sich die Frage, wie die mittlerweile verfügbaren Techniken, die eine Geodateninfrastruktur unterstützen können, sinnvoll eingesetzt werden können. Aus der oben genannten Liste der Beteiligten kann man ersehen, dass insbesondere der Verkehrsverbund einer Verkehrsregion oder die Genehmigungsbehörde als Koordinatoren des Datenaustausches in Frage kommen können (BETTERMANN 2004). Sollte das Verkehrsgebiet nur einen Aufgabenträger umfassen, ist natürlich dieser ebenso prädestiniert. Eine Konstruktion, den Datenaustausch über einen Service-Provider vorzunehmen, ist im Sinne der Entwicklung der Geodatentechnik eine logische Schlussfolgerung.

Folgende raumbezogenen Objektgruppen des ÖPNV wurden organisationsübergreifend im Rahmen der Projektumsetzung identifiziert:

- Haltestellen
- Liniennetz / Teilstrecken zwischen Haltepunkten
- Vorzugsstraßennetz.

Im Kontext einer GDI werden die Objekte im Folgenden dargestellt. Die Bereitstellung und Pflege der Infrastruktur der Haltestellen mit entsprechenden Informationstechniken ist eine Notwendigkeit des Betriebs des ÖPNV. Es existieren daher EDV-Anwendungen in Verkehrsunternehmen, die diese Infrastrukturverwaltung zum Ziel haben. Diese Verwaltungssysteme sind jedoch nicht notwendigerweise mit einer Georeferenzierung der Objekte verbunden. Daher ist die sogenannte Geocodierung der Haltestellen und Haltepunkte mit räumlichen Koordinaten ein zum Teil entkoppelter Prozess, der im Rahmen von Planungsprozessen oder der Einrichtung von Auskunftssystemen erfolgt. Im GIS-Markt existieren Produkte zur Haltestellenverwaltung, die bei der Neueinrichtung unter Verwendung von Digital-Bildern der Haltestelle vereinzelt verwendet werden (GEVAS 2005).

Der Entwurf des Liniennetzes ist ein Vorgang, der im Planungsbereich vorgenommen wird. Da die Planung jedoch mit dem Abstraktionsgrad der Haltestelle auskommen kann, werden die Teilstrecken nicht zwangsläufig haltepunktgenau festgelegt. Die Festlegung der Teilstrecken erfolgt auf der Basis des zugrunde liegenden Straßennetzes. Existierende Planungstools haben die Option, integriert das Straßennetz für die ÖPNV-Nutzung entsprechend zu modifizieren, und können somit ein Vorzugsstraßennetz für den ÖPNV aufbauen (PTV 2005).

Je nach der Konkretisierung des Fahrplans werden für Fahrgastinformationssysteme Haltepunktverbindungen erfasst. Diese Erfassung erfolgt ebenfalls auf der Basis eines Straßennetzes teilautomatisiert. Die Teilautomatisierung hat den Vorteil, dass beim Einsatz von Fachpersonal bei der Objektbildung falsche Vorschläge, die aus applikationsspezifischen Unzulänglichkeiten des darunter liegenden Verkehrsnetzes stammen, abgelehnt und verbessert werden können.

Im operativen Betrieb ist die Definition von Haltepunktverbindungen dann notwendig, wenn beispielsweise die Anzeige im Fahrzeug positionsabhängig gesteuert wird. Die Definition eines Vorzugsstraßennetzes für den ÖPNV ist bei der Anwendung im operativen Betrieb am dringlichsten, um den Disponenten bei seinen unter Zeitdruck zustande kommenden Entscheidungen zu unterstützen. Bei Störungen des Regelbetriebs wird der Disponent gegebenenfalls die Dispositionsmethode Umweg nutzen. Für gefährdete Abschnitte des Liniennetzes werden Umwegrouten vorgeplant. Für eine spontane Umwegplanung ist es zweckmäßig, dem Disponenten ein Vorzugsstraßennetz mit unterstützenden Funktionen bereitzustellen.

Die Disposition von Bedarfsverkehren setzt im Prinzip ebenfalls zwingend ein Vorzugsstraßennetz voraus für den Fall, dass mit „großen“ Fahrzeugen der Bedarfsverkehr durchgeführt wird. Da jedoch der Bedarfsverkehr wegen geringem Verkehrsaufkommen operiert, werden hier in der Regel nur Kleinbusse eingesetzt, die das Straßennetz entsprechend der ursprünglichen Attributierung für PKW nutzen.

Eine individuelle Prüfung der örtlichen Gegebenheiten der IuK-Infrastruktur ist beim RBL-Aufbau vorzunehmen. Eine prototypische Implementierung einer GDI für den ÖPNV mit Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen ist als weiterer Schritt anzugehen. Sollte dieser Ansatz positiv verlaufen, steht der Geodatentechnik mit der Verwendung eines ÖPNV-Vorzugsnetzes der Durchbruch gegenüber dem linienorientierten Paradigma bevor.

5.4.2.2 Erweiterung der VDV 453 / VDV 454

Die Entwicklung der Datendienste zum Austausch von Daten zwischen Rechnergestützten Betriebsleitzentralen und der Fahrgastinformation ist als ein guter Ansatz für eine Geodateninfrastruktur zu werten.

Die bereits für die Fahrplandaten angelegte Struktur der Aufteilung der Datenströme in Referenzdaten für Fahrplan und Tagesfahrplan und den Prozessdaten des aktuellen Betriebes lassen sich auch auf den Bereich der Geodaten vollständig abbilden. Die Referenzdaten für den Fahrplan stellen einen Datenabgleich von Haltestellen bzw. Haltepunkten und Teilstrecken zwischen den angeschlossenen RBL dar.

In den VDV-Schriften ist derzeit kein Austausch der Lagedaten von Haltestellen und Teilstrecken enthalten. Die Behandlung eines Vorzugsstraßennetzes ist nicht zu erwarten, da der Standard in erster Linie die Bedürfnisse des Linienverkehrs abdeckt.

Die Modellierung der Datenschnittstellen des VDV basiert auf XML. Eine Berücksichtigung des ebenfalls auf XML-Strukturen basierenden GML-Standards für die Geodatenmodellierung, die durch das OGC definiert wurde, ist bei der Definition eines Geodaten-Referenzdienstes zu empfehlen. Dadurch können die im GIS-Umfeld maßgeblichen Entwicklungen im Bereich des OGC auch im ÖPNV-Umfeld angewandt werden, um die Interoperabilität der Datengrundlage zu erreichen.

Im praktischen Test hat sich erwiesen, dass die Lage der Haltestelle im Bereich des Netzes nicht als konstant angesehen werden kann. Die Haltestelle im Bereich des Bahnhofs Neu-Ulm wurde während der Projektlaufzeit wegen Bauarbeiten mehrmals verlegt. An den ausgewählten Linien waren auch mehrfach Bedarfshaltestellen eingerichtet worden. Die derzeitigen VDV-Schriften sehen keinen Informationsaustausch über die Lageveränderungen vor. Die Einrichtung eines Dienstes RefGeo würde die notwendige Plattform bereitstellen. Ein Web Feature Service des OGC könnte die Grundstruktur für den Referenzdienst bilden.

6 Integration der Positionsbestimmungskomponente eines Navigationssystems ins GeoRBL

Basierend auf den Anwendungsszenarien „Störfallmanagement und Priorisierung des ÖPNV von Lichtsignalanlagen“, die in Kapitel 3.1 beschrieben sind, wurde untersucht, ob eine Geodaten-gestützte Positionsbestimmung in Form der marktverfügbaren Lösung in Navigationssystemen in ein RBL integriert werden kann.

Der Einsatz von Navigationssystemen im RBL wird in VDV (2001) durchaus positiv gewertet, da unter anderem dem Personal die Linienführung trainiert werden muss. Hier könnte bei entsprechender Unterstützung durch ein Navigationssystem mit guten Zielführungsqualitäten eine Kostenreduktion durch verkürztes Training möglich sein.

Die Kombination von Geodaten-gestützter Positionsbestimmung und Zielführung ist in handelsüblichen Navigationssystemen vorhanden. Auf dem Markt sind Navigationssysteme verfügbar, die über eine Schnittstelle ihre Geodaten-referenzierte Position zur Verfügung stellen. Der primäre Anwendungsbereich dieser Systeme liegt bei Logistiksystemen, in denen die Zielführungskomponente durch eine zuverlässige Zielfahrt eine Kostenersparnis verspricht.

Es existiert zumindest ein Produkt auf dem Markt (CARLS 2002), das eine Nutzung dieser Technik für den ÖPNV vorsieht. Diverse Vorteile der Zielführung im liniengebundenen ÖPNV werden in VDV (2001, Seite 140) angeführt. Ein Hersteller von Bordrechnern hatte in einem Praxistest bei der Vestischen Straßenbahn GmbH ein Zielführungsmodul umgesetzt.

Zur Bestimmung der Ortungsgenauigkeit von Navigationssystemen wurde zweistufig vorgegangen. Aus Testfahrten waren Ortungsdaten eines Navigationssystems für einen Rundkurs in Stuttgart am IAGB vorhanden. Diese Mehrfachaufzeichnung einer Teststrecke mit einer repräsentativen Routenführung einer Stadtfahrt wurde in einem ersten Schritt ausgewertet, um hinsichtlich der Genauigkeit quer zur Fahrbahn eine Vorstellung zu erhalten und für den eigentlichen Testaufbau ggf. Erkenntnisse verwerten zu können. In der zweiten Stufe wurde anhand eines Messaufbaus die Genauigkeit der Positionsbestimmung an Haltestellen ermittelt. Hierzu wurden Navigationssysteme der Firmen Bosch und VDO-Dayton eingesetzt. Dieser Messaufbau ermöglicht Aussagen zu der erreichbaren Wiederholungsgenauigkeit der Positionsbestimmung in Längsrichtung.

Aus den Anforderungen (siehe Kapitel 3.1.1.3) abgeleitet wird folgende Klassifikation der Positionsgenauigkeit definiert:

Klasse	Beschreibung	Max. Abweichung zur Solltrasse
1	Koordinate hochgenaue Übereinstimmung mit Karte	geringer als 1 m
2	Koordinate entspricht der Kartengenauigkeit und Abmeldegenauigkeit	zwischen 1 m und 3 m
3	Koordinate entspricht theoretischer Genauigkeit von DGPS	zwischen 3 m und 5 m
4	Koordinate entspricht Anfahrtsanforderungen	zwischen 5 m und 10 m
5	Koordinate ungenau	mehr als 10 m

Tabelle 6-1: Klassifikation der Positionsgenauigkeit

6.1 Untersuchung Verfügbarkeit der Position

Neben der Lagegenauigkeit ist Verfügbarkeit einer Position ein wesentliches Qualitätskriterium der Positionsbestimmung. Positionsbestimmungssysteme die ausschließlich GPS/DGPS-Signale direkt nutzen, sind in Situationen ohne ausreichende Satellitensicht nicht verfügbar. Die Geodaten-gestützte Positionsbestimmung kann in diesen Situationen bei Verfügbarkeit der digitalen Karte für diesen Bereich korrekt funktionieren, so dass von einer deutlich höheren Verfügbarkeit auszugehen ist. Die Verfügbarkeit der Position kann bei der Verwendung der Geodaten-gestützten Positionsbestimmungskomponente nicht getrennt werden von der Qualität der Kommunikation mit der verwendeten technischen Komponente.

6.1.1 Methodik / Messung

Die im Test untersuchten Navigationssysteme ermöglichen eine Kommunikation über eine serielle Schnittstelle (RS232). Das Kommunikationsschema sieht vor, dass über definierte Telegramme Informationen an der Schnittstelle bereitgestellt werden. Die Untersuchung der Verfügbarkeit der Komponente erfolgt durch eine permanente Anfrage der Schnittstelle. Die Antwort kann in zwei verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Zum einen kann kommunikationstechnisch ein Time-Out erfolgen, so dass die Anfrage ohne Ergebnis bleibt. Wird der Time-Out nicht erreicht, so kann die Antwortzeit selbst bzw. die Konstanz der Antwortzeit als Qualitätsmerkmal bewertet werden.

Da die Kommunikation erfahrungsgemäß auch mit der Systemauslastung der Recheneinheit korreliert ist, wurden unterschiedliche Systembelastungen des Navigationssystems getestet. An Variationsoptionen bot sich an, die Zielführung zu aktivieren, sowie die Visualisierung der Digitalen Karte auf dem Display vorzunehmen.

In den der Untersuchung zugrunde liegenden Szenarien sind die Geodaten des Straßennetzes existent. Dieses schränkt die Aussagegüte nicht ein, da im Falle des ÖPNV davon auszugehen ist, dass bei Bedarf die Straßenabschnitte entsprechend nachgepflegt werden könnten.

Die Untersuchungen in folgendem Teilkapitel wurden mit einem Navigationssystem der Firma VDO-Dayton vorgenommen.

6.1.2 Ergebnis

Abbildung 6-1 zeigt die Auslesezeiten bei voller Auslastung. Die Systemauslastung hat auf die Auslesezeit pro Daten nur einen geringen Einfluss. Die unterschiedlichen Zeitbänder resultieren aus unterschiedlichen Abfragetelegrammen. Das erste Telegramm erhält Koordinaten als Antwort und hat eine Antwortzeit von ca. 200 ms. Das zweite Telegramm umfasst die Adresse. Für diese Art der Positionsangabe sind ca. 500 ms einzukalkulieren.

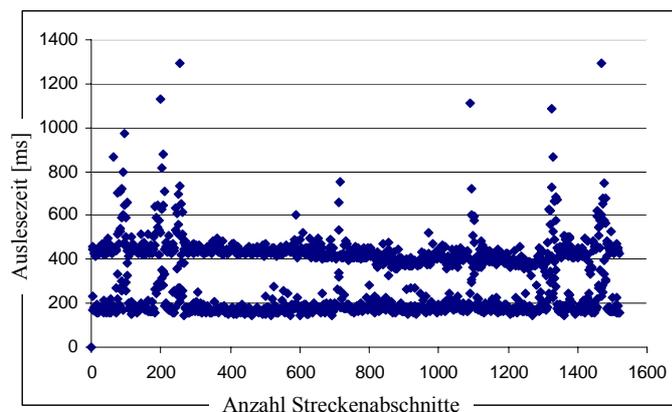


Abbildung 6-1: Navigationssystem, Auslesen zweier Protokolle mit Kartenanzeige und Zielführung

6.1.3 Bewertung

Innerhalb des Experimentes gab es keinen Kommunikationsvorgang, der durch ein Time-Out beendet wurde. Die Verfügbarkeit kann im Test als 100 % gewertet werden. Die Auslesezeit für Koordinaten ist bis auf Einzelfälle relativ konstant. Die Bandbreite der zufälligen Streuung kann ohne die Ausreißer auf ca. 50 ms abgeschätzt werden.

Mit der Annahme von 50 ms Zeitversatz bei einer Wiederholungsmessung tritt bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h eine Positionsdivergenz von ca. 70 cm auf. Dieser Fehlereinfluss ist in den Untersuchungen zur Längsabweichung relevant.

6.2 Untersuchung zur Querabweichung

6.2.1 Datengrundlage und Auswertestrategie

Am IAGB existieren Aufzeichnungen von Positionsdaten, die mit dem Navigationssystem „RGS08 professionell“ der Firma Bosch im Rahmen einer Akzeptanzuntersuchung für ein Fahrerassistenzsystem aufgezeichnet wurden. Als Anzeigemedium für das Assistenzsystem wurde der Monitor des RGS08 verwendet, so dass von einer hohen Auslastung des Computers im Navigationssystem zusätzlich zur Ortungsaufgabe ausgegangen werden kann. Eine Zielführung durch das System ist nicht erfolgt. Die Wegstrecke wurde so gewählt, dass die Anteile der unterschiedlichen Straßenkategorien der einer normalen Stadtfahrt entsprechen.

Es stehen 48 Messfahrten mit einer Gesamtlänge von 1331 km zur Verfügung, die wegen versuchsspezifischen Aufzeichnungslücken in fünf Abschnitte unterteilt wurden. Durch den Ausschluss von Streckenabschnitten, in denen teilweise die Positionsungenauigkeit ein Ausschlusskriterium war, ist das Ergebnis als optimistisch zu werten. Durch die hohe Gesamtlänge des Tests (ca. 22 km durchschnittlich 44fach ausgewertet) mit 104138 Messungen kann von einer repräsentativen Aussage ausgegangen werden.

Abschnitt	Länge des Abschnitts (in Meter)	Anzahl der Fahrten
1 – Stuttgart West	4591	42
2 – B14-B10	6267	47
3 – Bad Cannstatt	7306	45
4 – Stuttgart Ost	2830	42
5 – Wohngebiet	1230	48

Tabelle 6-2: Übersicht der Abschnitte der Teststrecke

6.2.2 Ergebnis

Im Sekundentakt wurden die Positionen aufgezeichnet. Zu jeder Position wurde der Abstand zu den Straßenelementen der Solltrasse berechnet. Daher kann durch diese Daten lediglich die Querabweichung ermittelt werden. Die einzelnen Abschnitte zeigen die gleiche Genauigkeitsklassifizierung. Hervorzuheben ist lediglich eine wesentlich höhere Positionsgenauigkeit im Bereich Stuttgart-West. Hier beträgt der Anteil der Messungen unter 3 m ca. 95 %. Es liegen ca. 35 % der Messungen mit Metergenauigkeit vor. Der Anforderung von 3 Metern Genauigkeit entsprechen ca. 75,6 % der Daten. Der Genauigkeitsklasse 5 sind 2,4 % der Daten zu werten. Es ist festzuhalten, dass die ermittelte Fehlerquote nicht den strengsten Anforderungen der RBL entspricht. Die über die Praxis der GPS-Umsetzung geforderte Genauigkeit von 5 Metern wird in ca. 93 % eingehalten.

Klasse	Anzahl der Messungen	In Prozent		
1	36440	34,99		1 m
2	40934	39,31		3 m
3	19560	18,78		5 m
4	4700	4,51		10 m
5	2504	2,40		>10 m

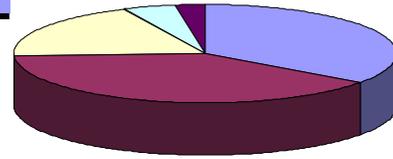


Tabelle 6-3: Übersicht zur Quergenauigkeit der Positionsbestimmung

In dieser Betrachtung sind jedoch systematische Fehler enthalten. Diese werden nun analysiert, um abschätzen zu können, inwieweit Systeme, die diese Systematiken vermeiden können, die Genauigkeit positiv beeinflussen können.

6.2.3 Systematische Abweichungen

Systematische Abweichungen entlang der Teststrecke werden in Abbildung 6-2 dargestellt. Im Abschnitt a) „Ausfahrt B10 – Talstraße“ wird bei jeder Fahrt nicht die Abbiegespur als befahrenes Straßenelement gewählt. Das konsequente Verbleiben auf der Bundesstraße führt auf der Höhe der Abzweigung zu einem Positionssprung auf das genutzte Straßenelement.

Durch die systemimmanente Kartenanpassung entsteht insbesondere bei Abbiegevorgängen ein Abgleich mit dem Straßenmodell. Sehr wahrscheinlich wurden die wiederholt auftretenden auffälligen Streuungen im Kreuzungsbereich durch eine mangelhafte Kalibrierung des Streckensignals ausgelöst. Neue Systeme zeigen diese Auffälligkeit nicht in diesem Maße.

Sofern die Karte nicht den realen Gegebenheiten entspricht (Abbildung 6-2), wird die Positionsgenauigkeit auch über die fehlerhafte Karteninformation hinaus gestört. In der veralteten Karte ist der Kreisverkehr nicht enthalten.

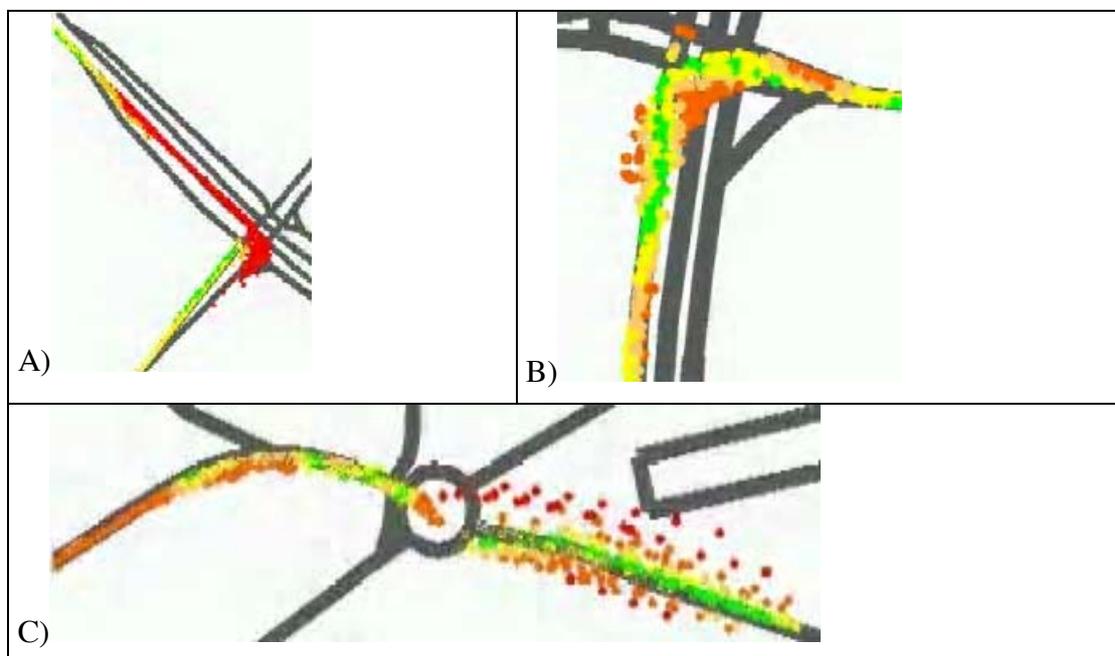


Abbildung 6-2: Besonderheiten der Positionsbestimmung mit einem Navigationssystem

Geht man von einer Reduktion der Fehlerrate um alle erkennbaren systematischen Fehler aus so könnte eine akzeptable Fehlerrate erreicht werden. Da jedoch das Ergebnis aus den vorhandenen Daten als zu optimistisch zu werten ist, sind weitere Untersuchungen notwendig.

6.3 Untersuchung Längsgenauigkeit

Aufgrund der Erkenntnisse aus der durchgeführten Untersuchung wurde im Folgenden ein Navigationssystem neuerer Generation mit optimierter Kalibrierung eingesetzt.

6.3.1 Methodik

Die Koordinaten von definierten Orten werden durch Wiederholungsmessungen mehrfach bestimmt. Dabei ist zu unterscheiden, ob bei der Messung an den Orten gehalten wurde oder ob die Bestimmung der Koordinaten während der Fahrt vorgenommen wurde. Als Referenzorte wurden Haltepunkte gewählt. Die Folge der Haltepunkte wurde im Stadtgebiet von Stuttgart so gewählt, dass Straßenabschnitte enthalten sind, die bekannte Problematiken Geodaten-gestützter Positionsbestimmung (z.B. Parallele Straßenführung) enthalten.

6.3.2 Versuchsaufbauten / Messung

Der Messaufbau sieht die automatisierte Lageerfassung von Haltepunkten entlang der Straßenelemente vor. Dazu werden die Haltepunkte mit Reflektorfolien signalisiert. Die Folie wird in Höhe einer auf dem Dach des Messfahrzeugs installierten Lichtschranke am Haltestellenmast befestigt (Abbildung 6-4). Die Lichtschranke registriert mit hoher Frequenz während der Fahrt, ob von dem permanent ausgesendeten Infrarotlicht Signale zurückkommen. Beim Passieren einer Reflektorfolie kann das Ausgangssignal wieder registriert und somit der Zeitpunkt des Passierens der Lichtschranke ermittelt werden.

Einen zu erwartenden Fehlereinfluss beinhaltet das Detektieren des Zeitpunktes beim Passieren des Haltepunktes durch den unbekanntem Reaktionsbereich der Lichtschranke. Dieser wurde im Rahmen einer studentischen Arbeit (HOLST 2003) untersucht. Der Reaktionsbereich der Lichtschranke hat die erwartete Form einer Keule (Abbildung 6-3). Bei fixer Größe der Reflektorfolie ist im Bereich bis ca. sieben Meter Abstand die Keulenform stabil und weist eine Streuung des Randbereichs von wenigen Dezimetern auf. Bei Abständen über sieben Meter ist die Form nicht mehr zuverlässig reproduzierbar. Da der Messbereich zwischen 0,5 Meter und 4 Meter liegt, kann die Messgenauigkeit des einfachen Aufbaus als hinreichend angesehen werden.

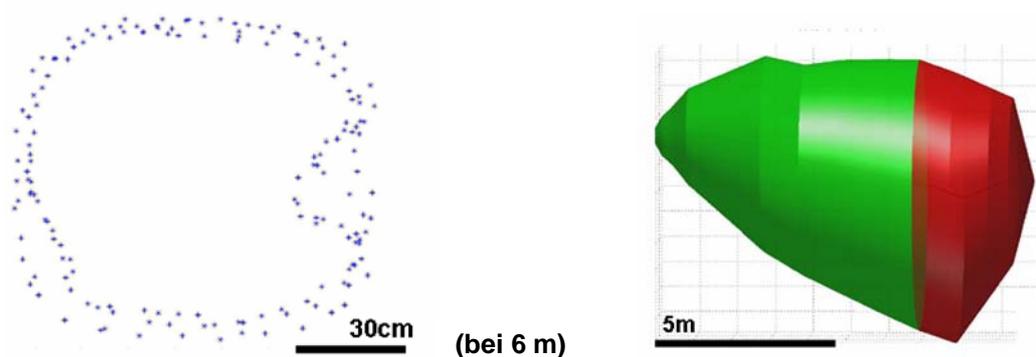


Abbildung 6-3: Längsansicht und Querschnitt des Messbereichs eines Lichtschrankensensors (HOLST 2004)

Die Bestimmung der Position einer Haltestelle beruht auf der linearen Interpolation zwischen den zwei vom Navigationssystem erzeugten Positionslösungen, die sich unmittelbar vor bzw. hinter der mit einer Reflektorfolie signalisierten Haltestelle befinden. Die zeitliche, eindeutige gegenseitige Zuordnung erfolgt über eine systeminterne Zeit, die allen registrierten Daten (Positionslösung, Lichtschrankensignal) als Zeitstempel angehängt wird.

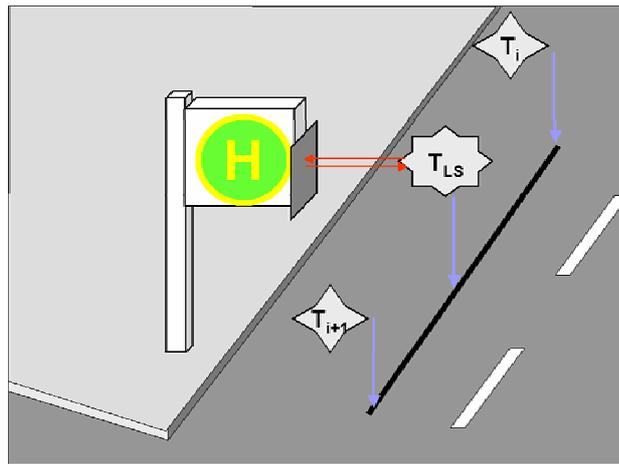


Abbildung 6-4: Skizze des Messaufbaus

In einer ersten Messreihe wurden die Haltepunkte angefahren, so dass der Vergleich der Position im Stand erfolgte. Dies bedeutet, dass die in der Abbildung 6-4 dargestellten Zeitpunkte T_i und T_{i+1} zusammenfallen und somit kein Fehlereinfluss durch die Modellierung der Latenzzeiten vorhanden ist. In einer zweiten Messreihe wurden die Haltestellen mit einer ortsüblichen Geschwindigkeit von ca. 50 km/h passiert.

6.3.3 Ergebnisse

In der ersten Messreihe (statisch) haben Latenzzeiten keinen Einfluss auf die Lagegenauigkeit. Die Ermittlung der Lagegenauigkeit im Stand liefert eine Standardabweichung der Lage-differenzen von 1,8 Metern. Der Betrag der maximalen Abweichung beträgt 4,5 Meter.

	Statisch		Kinematisch		Genauigkeits- klasse (Tabelle 6-1)
		gesamt		gesamt	
	[%]	[%]	[%]	[%]	
≤ 1 m	23,5 %	23,5 %	19,5 %	19,5 %	≤ 1 m
1-3 m	70,6 %	94,1 %	33,8 %	53,2 %	≤ 3 m
3-5 m	5,9 %	100,0 %	26,0 %	79,2 %	≤ 5 m
5-10 m	0,0 %	100,0 %	20,8 %	100,0 %	≤ 10 m

Tabelle 6-4: Ermittlung der Lagegenauigkeit eines Navigationssystems

Der in Abbildung 6-4 dargestellte Messaufbau (kinematisch) liefert, wie zu erwarten, eine Lagegenauigkeit mit einer höheren Standardabweichung von 3,6 Metern. Der Betrag der maximalen Abweichung liegt in dieser Messreihe bei ca. 9 Metern.

6.3.4 Bewertung

Das unterschiedliche Qualitätsniveau der Messreihen lässt sich nicht direkt in der beobachteten Größenordnung auf die Streuung der Latenzzeiten erklären. Ein Zusammenhang mit der Geschwindigkeitsvariation beim Passieren des Haltepunktes konnte aus den Messdaten nicht ermittelt werden. Im statischen Modus konnte der strengen Genauigkeitsforderung von 3 Metern zu ca. 94% entsprochen werden. Der Genauigkeit von 5 Metern konnte hier sogar vollständig entsprochen werden. Bei den Messungen aus bewegtem Fahrzeug zeigte sich im einfach realisierten Messaufbau eine geringere Genauigkeit. Der Anforderung zur Genauigkeitsklasse 3 konnte nicht entsprochen werden. Fast 80 % der Messungen lagen noch im Genauigkeitsbereich kleiner als 5 Meter.

6.4 Praxistest für LSA-Beeinflussung und Machbarkeitsbewertung

Im Vergleich der Verfügbarkeit von Positionen durch das Verfahren der Geodaten-gestützter Positionsbestimmung und der Verfügbarkeit einer ausreichenden Anzahl von Satelliten zur Positionsbestimmung mit GPS/DGPS hat die Geodaten-gestützte Positionsbestimmung deutlich Vorteile. Das erreichbare Genauigkeitsniveau liegt im Bereich von DGPS-Positionsbestimmungssystemen. Ebenso spricht die vergleichsweise geringe maximale Abweichung der Lagegenauigkeit deutlich für eine Verbesserung der Positionsbestimmung durch den Einsatz eines Geodaten-gestützten Verfahrens. Daher wurde ein Praxistest (SCHOLLMEYER ET.AL. 2004), der die Beeinflussung einer Lichtsignalanlage unter der Verwendung der Positionsbestimmungskomponente eines Navigationssystems praktisch umsetzt, durchgeführt. Die Demonstration zeigte, dass die erreichte Genauigkeit von Praktikern akzeptiert wurde und als ausreichend bezeichnet werden kann. Die theoretisch geforderte Genauigkeit von 3 Metern (VDV 2001) ist beim Vergleich mit der Praxis als zu hohes Ziel zu sehen, das nur durch aufwendige zusätzliche Technik realisiert werden könnte.

Im folgenden Kapitel werden Ansätze untersucht, die in Teilbereichen des Fahrtweges eine höhere Genauigkeit aufweisen können. Da eine Steigerung der Genauigkeit in der Regel mit einer Erhöhung der Kosten für das System verbunden ist, sollten die von den Verkehrsunternehmen gestellten Forderungen bei der Spezifikation von Systemen genau definiert werden, um nicht innovative Techniken von vornherein auszuschließen.

7 Geodaten-gestützte Positionsbestimmung

Öffentlicher Verkehr wird in Ballungszentren hauptsächlich auf Verkehrslinien abgewickelt. Eine präzise und zuverlässige Positionsbestimmung ist gefordert, um lokale Steuerungsaufgaben (z.B. LSA-Beeinflussung) vornehmen zu können. Bisherige Lösungen sehen dabei den Aufbau einer Infrastruktur von aktiven Baken vor. Als Alternative zu den aktiven Landmarken ist eine Technik zu verstehen, die lediglich passive Landmarken nutzt, die mit entsprechender Sensorik erkannt werden.

Hier kann systembedingt mindestens die gleiche Positionsgenauigkeit erreicht werden wie beim herkömmlichen System. Der Vorteil derartiger Verfahren liegt in der Ersparnis des Aufbaus und der Instandhaltung der Infrastruktur vor Ort. Damit verbunden ist jedoch der Aufwand, geeignete passive Landmarken in die Geodatenbasis einzupflegen oder einer Geodateninfrastruktur (GDI) zu entnehmen. Die Lagegenauigkeit dieser passiven Landmarken in der Datenbasis bzw. die Rekonstruktion der Positionen aus der Information der GDI und den Sensordaten müssen den Anwendungsanforderungen hinsichtlich der Genauigkeit genügen.

Die Anforderungen an die Qualität der Positionsbestimmung variieren entlang der Trajektorie. Beispielsweise ist zur Reisezeitabschätzung im Regionalverkehr auf offener Strecke eine geringere Genauigkeit notwendig als bei der Anfahrt auf eine Lichtsignalanlage. Die Abmeldung von der Lichtsignalanlage bedarf wiederum einer höheren Genauigkeit als die Anfahrt.

Eine zuverlässige Positionsbestimmung mit einer hohen Lagegenauigkeit lässt sich genau dann erreichen, wenn die direkte Positionsbestimmung durch Landmarken, die im Anwendungssystem referenziert sind, diese Eigenschaften besitzt. Gemäß dieser Charakteristik wird in diesem Kapitel eine positionsabhängige Geodaten-gestützte Positionsbestimmung entwickelt und experimentell untersucht.

7.1 Verfahrensbeschreibung

Das Verfahren ist in vier Phasen zu unterteilen (siehe Abbildung 7-1). Als Voraussetzung wird ein Zielort festgelegt, der mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden soll (Phase 0). In hinreichendem Abstand ist nun ein Triggerort festzulegen. Der Triggerort wird über ein grobes Positionsbestimmungsverfahren (Phase 1) detektiert.

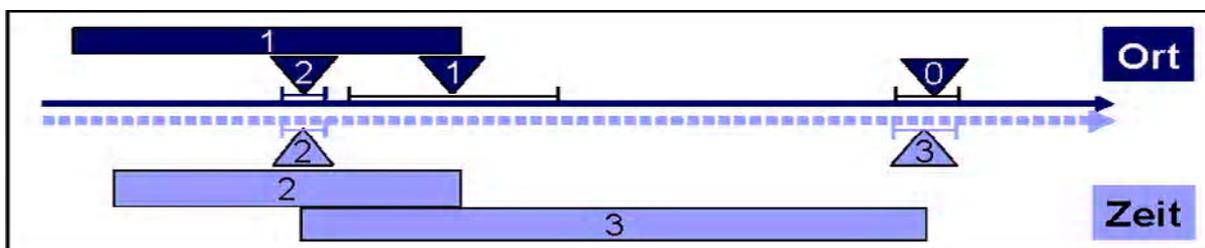


Abbildung 7-1: Grundidee der positionsabhängigen Geodaten-gestützten Positionsbestimmung

Sobald der Triggerort mit einer hinreichenden Genauigkeit bestimmt wurde, wird das geodaten-basierte Positionsbestimmungsverfahren gestartet (Phase 2), das eine Positionsbestimmung anhand einer passiven Landmarke vornimmt und den Zeitpunkt der Passage an diesem Ort bestimmt. In einem weiteren Verfahren (Phase 3) wird nun der weitere Weg bis zum Zielort über ein Verfahren mit hinreichender Relativgenauigkeit fortgeschrieben. Für die Fahrzeugortung bietet sich hier die Extrapolation über Odometermessungen an. Im Folgenden werden zwei Verfahren der Phase zwei untersucht.

Das erste Verfahren wird in MÖHLENBRINK (1996) und CZOMMER (2001) beschrieben und verwendet Krümmungen der Trajektorie zur Geodaten-gestützten Positionsbestimmung. Die in CZOMMER (2001) verwendeten Algorithmen werden auf den schienengebundenen Personennahverkehr übertragen. Diese Arbeit liefert damit einen Beitrag zur Abschätzung der Genauigkeit dieses Verfahren für die Schienenortung im ÖPNV.

Das zweite Verfahren bezieht sich auf den Busverkehr. Die Positionsbestimmung eines Fahrzeugs kann nach einer Positionsbestimmung über passive Landmarken in Anwendungssystem mit hoher Genauigkeit eine bestimmte Zeit durch lokale lineare Positionsbestimmung im linearen KBS des Straßenobjektes bzw. der Route fortgeschrieben werden. Angelehnt an das Szenario der LSA-Beeinflussung (Kapitel 3.1.1.3) wird untersucht, Objekte (darunter auch die LSA selber) bei entsprechender Grobnavigation über Sensor zu erkennen und damit positionsabhängig eine hochgenaue Position zu generieren, die für die Steuerungslogik nur an derartigen Stellen im Linienverlauf notwendig ist.

7.2 Geodaten-gestützte Positionsbestimmung auf der Schiene

7.2.1 Überblick

7.2.1.1 *Stand der Technik*

Die Positionsbestimmung von Schienenfahrzeugen im ÖPNV wird in der Regel durch passive oder aktive Landmarken vorgenommen, wenn eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung gefordert ist. Bakensysteme, die entlang der Gleiskörper installiert sind, kommen zum Einsatz, um die dispositive Positionsbestimmung, die auch im Rahmen des RBL benötigt wird, zu bestimmen. Da die streckenseitige Installation der Baken eng mit der derzeit angewandten Sicherungstechnik verbunden ist, werden auch bei der Installation neuer RBL keine alternativen Ortungssysteme über GPS eingeführt (REUPKE 2001). Die Nutzung der GPS-Technik erscheint ohnehin im schienengebundenen ÖPNV systembedingt zweifelhaft, da ein nicht unerheblicher Anteil des Schienenverkehrs in Ballungsgebieten unter Tage verläuft und somit der notwendige „Sichtkontakt“ zu den GPS-Satelliten nicht möglich ist.

Ein autonomes Ortungsprinzip, das ohne GPS und streckenseitig installierte Infrastruktur auskommt, bietet jedoch prinzipiell Einsparpotenziale, die im Rahmen alternativer Sicherungskonzepte interessant werden könnten. Im Patent MÖHLENBRINK ET AL. (1997) sind derartige Verfahren beschrieben. Auf dem Markt sind Ortungssysteme, die nach dem Prinzip der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung funktionieren, verfügbar. Die Systeme ALOIS der Firma Tiefenbach (HEISTER ET AL 2000) und OPTIVIA der Firma Adtranz (WINTER 2000) zeigen, dass es im Bereich der autonomen Schienenortung bereits derzeit Nischenmärkte gibt. Eine Implementierung im ÖPNV ist nicht erfolgt. Das Ziel dieser Verfahren ist eine permanente Positionsbestimmung der Fahrzeuge, die über Kalmanfiltertechnik gelöst ist. Das im Folgenden beschriebene Verfahren bestimmt die Position jedoch ortsabhängig und berücksichtigt die Historie unabhängig vom komplexen Filterdesign.

7.2.1.2 *Entwicklung*

Am Institut für Anwendungen der Geodäsie wurden in Kooperation mit der Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB) Messfahrten durchgeführt. Die Zielsetzung der Messreihen war, die am Institut vorhandene Karteneinpassungstechnik, wie sie in CZOMMER 2001 für Straßen ange-

wandt wurde, auf eine Anwendung im schienengebundenen ÖPNV zu übertragen. Durch den eigenständigen Aufbau eines Messsystems zur Geodaten-gestützten Schienenortung sollte die Transparenz des Positionsbestimmungssystems in allen Prozessen von der Erfassung bis zur Auswertung erreicht werden. Das Genauigkeitsniveau, das mit dieser Technik zu erreichen ist, sollte in dem Test im Umfeld des schienengebundenen ÖPNV nachgewiesen werden.

Im Laufe der Untersuchung konnten für die stattfindenden Messungen jeweils neue Messtechniken genutzt werden. Im Rahmen der ersten Messung wurde der Messaufbau, der für die Datenerfassung eines Inertialsystems existierte, in Betrieb genommen, um eine Krümmungsreferenz mit hoher Genauigkeit zu erhalten. Das auf VME-Technik basierte Datenerfassungssystem ließ jedoch keine Erweiterung für andere Sensorik zu und hatte nur eine begrenzte Messdauer, da das Speichervolumen des Erfassungsrechners begrenzt war. Eine weitere Messung erfolgte im Rahmen der Diplomarbeit von WEBER (2002). Hier konnte das in SCHOLLMEYER (2003) vorgestellte Messsystem zum Einsatz kommen.

7.2.1.3 Gemeinsamkeiten der Untersuchungen

Messstrecke

Als Teststrecke wurde die U9 zwischen Botnang und Hedelfingen gewählt. Auf rund 28 % der Strecke ist durch die Topographie oder eine Streckenführung im Tunnel kein GPS-Empfang möglich. Es bietet sich daher an, das Design eines Positionsbestimmungssystems nicht an der Satellitentechnik auszurichten. Ein System, das auf ca. ¼ der Strecke ohnehin ohne Satellitenortung auskommen muss, sollte technisch auch in der Lage sein, den Rest der Strecke abzudecken. Dabei ist natürlich der wesentliche Kostenfaktor für die Informationsinfrastruktur zu betrachten, der bei der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung anfällt. Die Teilstrecken, die Tunnel enthalten, sind in Tabelle 7-1 grau unterlegt. Diese Teilstrecken weisen eine hohe Dichte an Koppelspulen auf.

Nr.	Haltepunkte der U9	Station [m]
1	Hedelfingen	0
2	Kodak	863
3	Wangen Marktplatz	1454
4	Wasenstraße	2051
5	Inselstraße	2410
6	Im Degen	2847
7	Brendle	3502
8	Wangener-/Landhausstraße	3821
9	Schlachthof	4496
10	Raitelsberg	4958
11	Bergfriedhof	5411
12	Karl-Olga-Krankenhaus	5761
13	Stöckach	6231
14	Neckartor	6751
15	Staatsgalerie	7179
16	Hauptbahnhof	7732
17	Keplerstraße	8314
18	Berliner Platz	8946
19	Schloß-/Johannesstraße	9449
20	Schwab-/Bebelstraße	10056
21	Arndt-/Spittastraße	10374
22	Vogelsang	10739
23	Herderplatz	11193
24	Lindpaintnerstraße	11834
25	Beethovenstraße	12210
26	Millockerstraße	12590
27	Eltinger Straße	12981
28	Botnang	13353

Tabelle 7-1: Stationen der Haltepunkte

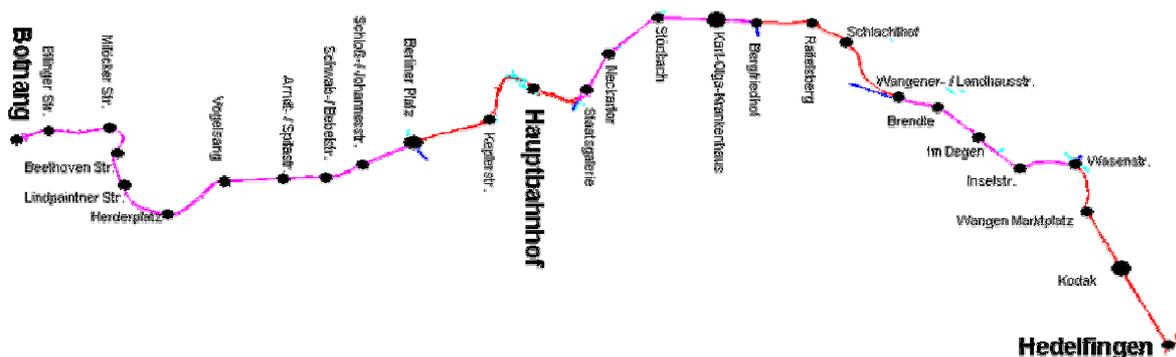


Abbildung 7-2: Messstrecke der U9 in Stuttgart

Auswertemethode

Die Bestimmung der Position des Stadtbahnwagens erfolgt nach der in CZOMMER (2001) beschriebenen Methodik. Durch den Vergleich des Krümmungsbandes aus den Sensoraufzeichnungen von Geschwindigkeits- und Kreiselsignal mit dem Referenzdatensatz der Krümmung wird die Position des Fahrzeugs auf dem Schienenstrang ermittelt. Das Verfahren ist zweistufig. In der ersten Stufe werden nach der äquidistanten Segmentierung des Datensatzes über eine Kreuzkorrelation Näherungswerte für die Ausgleicheung ermittelt, die in der zweiten Stufe ausgeführt wird. Das im Folgenden genannte Formelwerk ist in CZOMMER (2001) weiter ausgeführt. Die durch die Signalenergien normierte Kreuzkorrelation $c(i)$ (Gleichung 7-1) besitzt als Indikator der maximalen Übereinstimmung zwischen den beiden Funktionen einen Extremwert (Maximum), dessen Wert maximal 1 annehmen kann.

$$c(i) = \frac{1}{\sqrt{E_a E_b}} a(i) \circ b(i) \quad \text{mit} \quad E_a = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a^2(i); \quad E_b = \sum_{i=-\infty}^{\infty} b^2(i) \quad \text{und} \quad a(i) \circ b(i) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} a(j) \cdot b(i+j)$$

Gleichung 7-1: Normierte Kreuzkorrelation (CZOMMER 2001)

Der durch die Kreuzkorrelation gefundene Wert der besten Übereinstimmung wird im folgenden umrissenen Ausgleichungsansatz genutzt, um Näherungswerte für den nichtlinearen Ausgleichungsabsatz zu liefern. Das funktionale Modell geht von zwei Krümmungsprofilen $\kappa_1(x_i)$ und $\kappa_2(y_i)$ aus. Es werden sowohl zwischen der Soll- und Ist-Strecke als auch zwischen Soll- und Ist-Krümmung Maßstab und Offset-Parameter in das Modell integriert.

$$\kappa_1(x_i) = a \cdot \kappa_2(m_b x_i - u_b) + b + n(x_i)$$

Gleichung 7-2: Funktionales Modell des Ausgleichungsansatzes (CZOMMER 2001)

Mit:

κ_1	Krümmungsprofil 1	m_b	Maßstab der Bogenlänge 1
κ_2	Krümmungsprofil 2	u_b	Offset der Bogenlänge 1
x_i	Bogenlänge 1 (Krümmungsprofil 1)	a	Maßstab Krümmungsprofil 2
y_i	Bogenlänge 2 (Krümmungsprofil 2)	b	Offset Krümmungsprofil 2
	$y_i = m_b \cdot x_i - u_b$	$n(x_i)$	Fehlerterm

Tabelle 7-2: Variablenbezeichnung zur Gleichung 7-2

Die in der Ausgleicheung ermittelte Genauigkeitsschätzung der Parameter wird als innere Genauigkeit bezeichnet. Der Mittelwert, der durch Mehrfachmessung ermittelten Differenzen der Positionen wird als äußere Genauigkeit bezeichnet.

Referenzkrümmung

Das Referenz-Krümmungsprofil wurde im Rahmen der Diplomarbeit von WÖRNER (2000) erhoben. Die Stuttgarter Straßenbahnen stellten hierfür Planungsunterlagen zur Verfügung, die in eine Datenbank übertragen wurden.

Die aus der gemessenen Drehrate abzuleitende Krümmung an einem Streckenpunkt entspricht durch die Ausdehnung des Fahrzeugs nicht immer dem korrespondierenden Streckenpunkt der Trasse. Abbildung 7-5 veranschaulicht die Situation in einer Kurvenfahrt. Im hier dargestellten Fall einer konstanten Krümmung einer Kurvenfahrt ist die Richtungsänderung über der Strecke identisch mit der entsprechenden Krümmung des Streckenabschnitts.

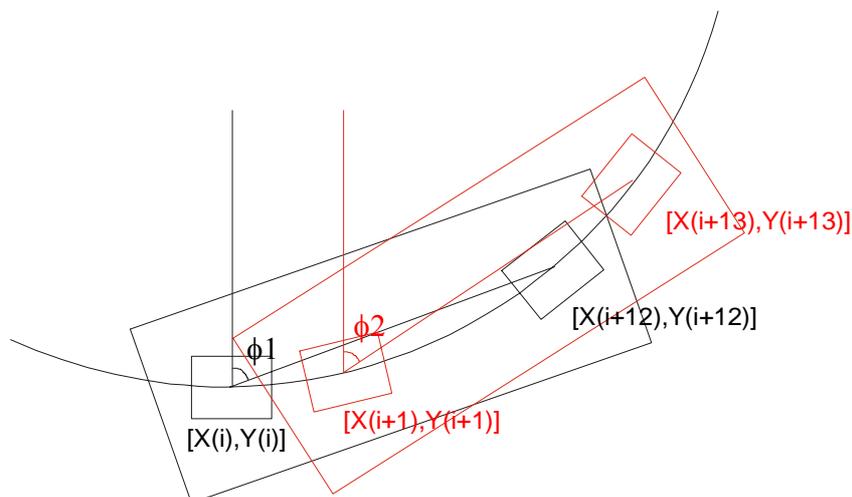


Abbildung 7-5: Richtungswinkeländerungen als Indikatoren des Krümmungswechsels (FIRCHAU 2002)

Ändert sich jedoch die Krümmung, so bewirkt die Lagerung der Straßenbahn auf dem Gleiskörper eine Glättung der Sollkrümmung. Abbildung 7-6 zeigt eine deutliche Ausrundung der Soll-Krümmung beim Übergang der Klothoidenabschnitte auf die Abschnitte mit konstanter Krümmung.

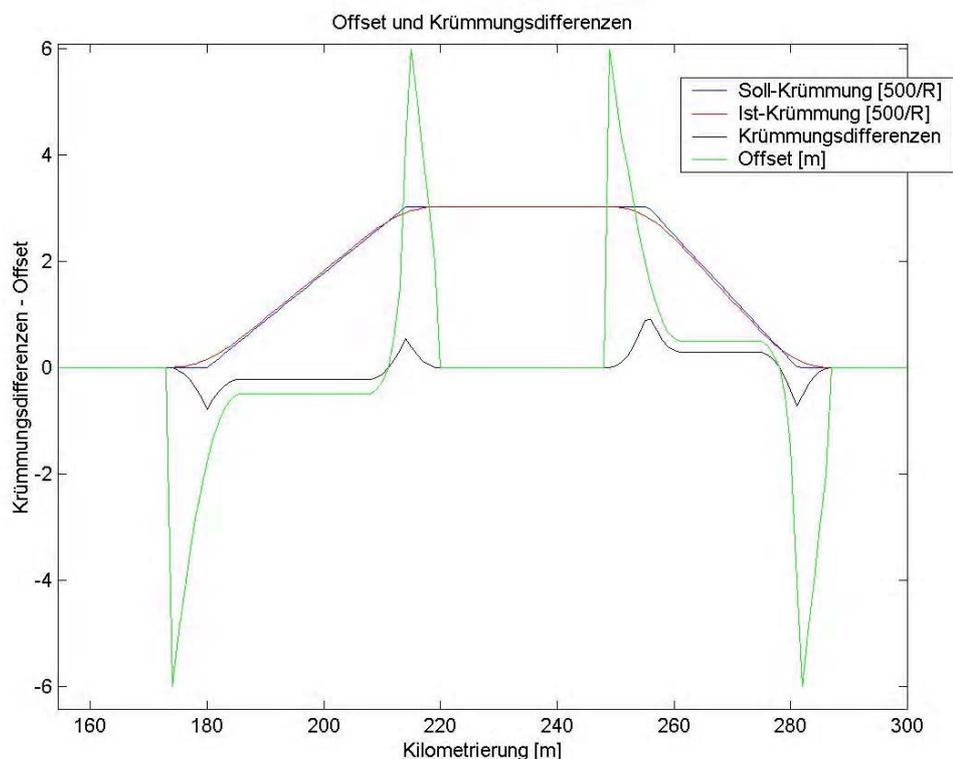


Abbildung 7-6: Veränderungen der Soll-Krümmung durch den Stadtbahnaufbau

Abbildung 7-6 enthält auch den theoretischen Versatz der Ist-Krümmung gegenüber den Soll-Krümmungen im Bereich der Krümmungsänderungen. Der Maximalwert von 6 Metern ergibt sich aus dem halben Abstand der Drehgestelllager. Wenn sich beide Fahrgestelle im Bereich einer Klothoide bewegen, ergibt sich in Abhängigkeit von deren Parametrisierung ein konstanter Offset. Die Symmetrie des ermittelten Versatzes wird aus der Abbildung 7-6 ebenfalls sichtbar.

7.2.1.4 Methodik

Die Trajektorie einer Stadtbahn wird über die Sensordaten von Geschwindigkeit und Krümmung aufgezeichnet. An den Haltestellen entlang der Messstrecke wird angehalten. Diese Haltezeiten sind in den Datenaufzeichnungen eindeutig über das Geschwindigkeitssignal identifizierbar. Die Datenaufzeichnung kann an diesen Haltepunkten unterteilt werden. Die Länge der Trajektorie kann nach der Integration des Geschwindigkeitssignals als Kriterium genutzt werden, um den Streckenabschnitt zu bestimmen, der bei der Auswertung berücksichtigt werden soll. Der Bereich, an dem die Stadtbahnen an Haltestellen ordnungsgemäß zum Stillstand kommen, ist relativ klein und wird überprüft (siehe Abbildung 7-8).

7.2.1.5 Messaufbau

Am Institut stand zum Zeitpunkt der ersten Messung ein Messwerterfassungssystem auf Basis eines VME-Systems zur Verfügung, das zur Messung einer Inertial-Plattform konfiguriert wurde. Neben der Erfassung von drei Beschleunigungssignalen und der Drehraten über ein Kreiselssystem mit digitalem Ausgang wird noch das Geschwindigkeitssignal zeitreferenziert erfasst. Die Erfassung der GPS-Signale erfolgt zeitlich entkoppelt durch einen PC-basierten Messrechner.

Am Stadtbahnwagen kann ein analoges Signal von 0 bis 8 Volt abgegriffen werden. Der Umrechnungsfaktor beträgt ca. 1 Volt = 10 km/h. Das digitale Signal liefert jeden Meter einen Impuls. Die genaue Kalibrierung des Sensors konnte vorab nicht erfolgen. Daher wurde ein Maßstab nach der Messung über die Streckeninformation ermittelt.

Zur Messung der Drehrate wurden zwei Kreisel der Firma Litef (K273) verwendet. Die Vertikalachse konnte durch die redundante Anordnung der doppelachsigen Kreisel zweifach gemessen werden. Die genutzten Kreisel werden durch die laufende Nummerierung innerhalb des Systems als Litef1 und Litef4 bezeichnet. Die Kalibrierung der Kreiselsensoren wurde mittels des am Institut verfügbaren Verfahrens der 24-Lagenkalibrierung (PETZOLDT 1995) ermittelt. Ein bekanntes Defizit dieser Kalibrierungsmethode sind die unterschiedlichen Dynamikbereiche von Kalibrierung und Messung.



Abbildung 7-7:
Messanordnung der INS-Plattform

Zur Ermittlung der Haltegenauigkeit der Stadtbahn bei Wiederholungsfahrten wird bei der ersten Fahrt ein Kreidestrich als Referenzmarke an der Bahnsteigkante angebracht. Diese Referenzmarke wurde bezüglich eines im Türbereich des Fahrzeugs montieren Maßbandes aufgenommen. Aus den Differenzen der Maßbandwerte konnte die Haltegenauigkeit der Stadtbahn abgeleitet werden. Die Genauigkeit der Beobachtung wird mit wenigen Zentimetern angenommen.



Abbildung 7-8: „Messaufbau“ zur Ermittlung der Haltegenauigkeit (perspektivisch)

7.2.1.6 Messung

Im August 1999 wurde die Messfahrten mit obigem Aufbau durchgeführt. Die Messstrecke konnte wegen der hohen Messfrequenz, die durch das INS-System vorgegeben war, und der begrenzten Festplattenkapazität nur zweimal durchfahren werden.

7.2.1.7 Ergebnisse

Tabelle 7-3 dokumentiert die geringen Abweichungen der Halteposition an einem Haltepunkt von einem Mittelwert. Die maximale Abweichung betrug 37 cm. Die letzte Spalte zeigt die in diesem Versuch sehr gute Wiederholgenauigkeit der Streckenmessung durch die Integration des Geschwindigkeitssignals.

Haltepunkte (HP)					Strecken	
Nr.	HP	0-Messung [cm]	Folgemessung [cm]	Differenz [cm]	Nr.-HP bis Nr.-HP	Differenz [cm]
1	Wasenstr.	50	13	37	1 - 2	-23
2	Inselstr.	50	36	14	2 - 3	-33
3	Brendle	50	69	-19	x	X
4	Bergfriedhof	50	-	-	-	-
5	Neckartor	50	52	-2	x	X
6	Schwabstr.	50	33	17	6 - 7	8
7	Vogelsang	50	25	25	7 - 8	-13
8	Lindpaintnerstr.	50	38	12	8 - 9	-6
9	Eltingerstr.	50	44	6	x	X

Tabelle 7-3: Beobachtungsdaten und deren Differenzen

Die Aufzeichnung der Kreiselmesswerte zeigt eine hohe Korrelation des Messsignals mit der Soll-Funktion. Die Auswertungen zeigen auch den für Schienenfahrzeuge üblichen Sinusverlauf. Grobe Fehler zwischen den erfassten Planungsunterlagen und den Messungen konnten nicht entdeckt werden. Kleinere Abweichungen wie sie z.B. in Abbildung 7-10 am rechten Bildrand zu sehen sind, traten sehr selten auf. Die hier sichtbare Abweichung der Soll-Krümmung von der gemessenen Krümmung entspricht einer Reduzierung des Krümmungsradius mit einer Ablage der Trasse in der Realität von weniger als einem Meter.

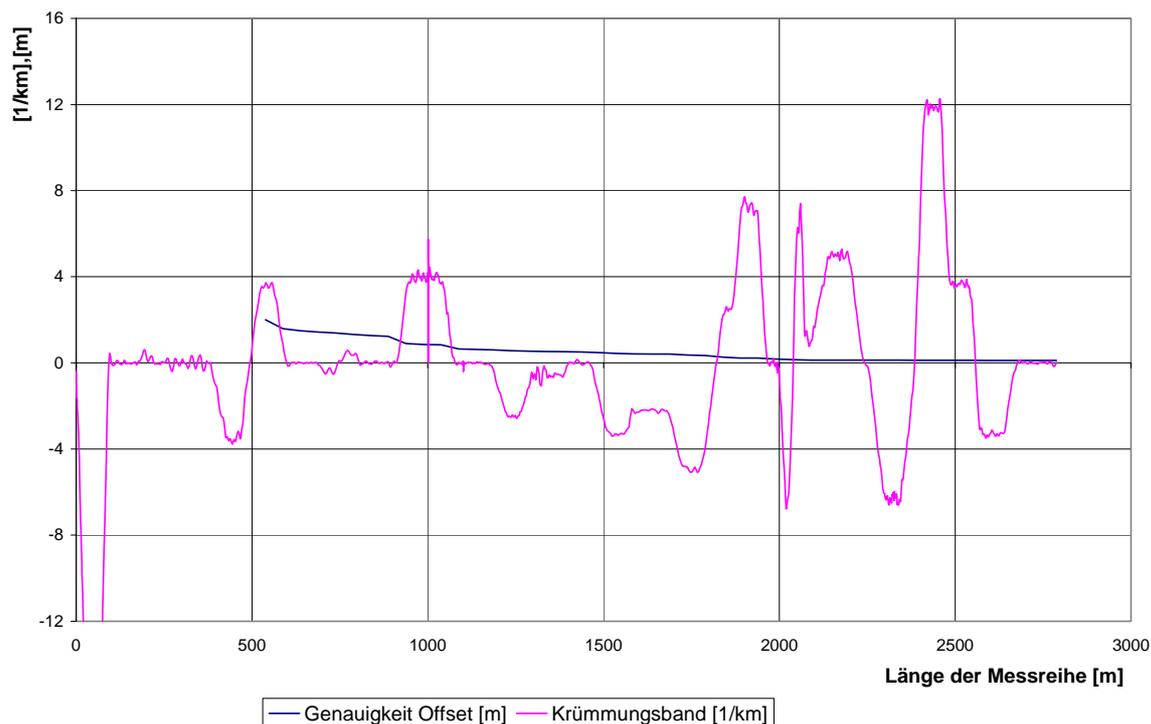


Abbildung 7-11: Beispiel mit hoher Anzahl von signifikanten Kurvenradien

Zur Verifizierung der inneren Genauigkeit wird die Länge der Trajektorie, die zur Einpassung verwendet wird, ausgehend von der Mindestlänge vergrößert. Der durch das Positionsbestimmungsverfahren berechnete Ort variiert mit der Verlängerung der Trajektorie im ausgewählten Beispiel um ca. 4,5 Meter. Die Längen der Trajektorie von Abbildung 7-11 und Abbildung 7-12 sind übereinstimmend. Bei einer Länge von über 2000 Metern wird eine Kurvenfolge berücksichtigt, die zu einer Verschiebung der Trajektorie von ca. 2 Metern führt, obwohl die innere Genauigkeit der Ausgleichung eine Genauigkeit von ca. 30 cm zeigt.

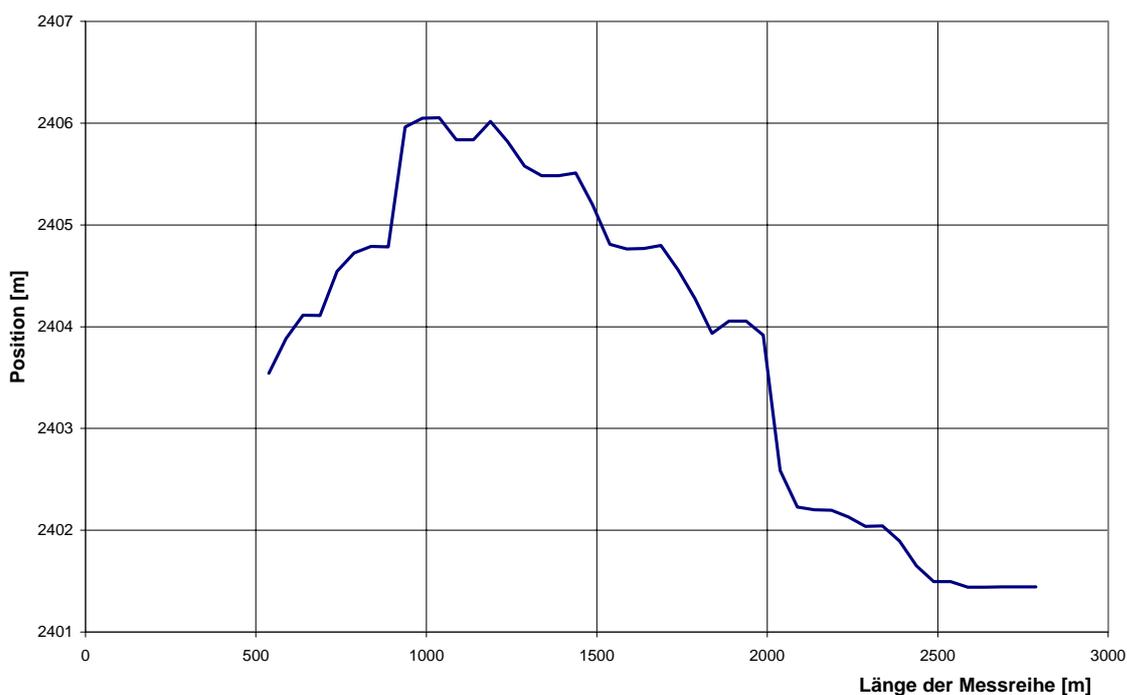


Abbildung 7-12: Änderungen einer Position durch die Verlängerung der ausgewerteten Strecke

Diese Diskrepanz zwischen der inneren Genauigkeit und der Variation der Position durch die Variation der in der Auswertung berücksichtigten Trajektorienlänge soll im Folgenden weiter untersucht werden. Es ist anzunehmen, dass das in der Ausgleichung verwendete einfache stochastische Modell, das keine Korrelationen der Beobachtungen verwendet, ein Grund ist, warum mit zunehmender Trajektorienlänge die innere Genauigkeit stetig abfällt.

7.2.2 Untersuchung zur Wiederholungsgenauigkeit

Sowohl das eingesetzte Messsystem als auch der Messaufbau obiger Untersuchung weisen Verbesserungspotenzial auf hinsichtlich:

- Einsatz kostengünstiger Sensoren
- Kalibrierung
- Redundanz der Sensorik
- Automation der Ortsbestimmung zum Vergleich der Wiederholungsmessungen.

Im Rahmen der Diplomarbeit von WEBER (2002) wurden weitere Messfahrten mit neuem Messaufbau durchgeführt, die die Zielsetzung hatte, den zuvor bestimmten Genauigkeitsbereich zu bestätigen.

7.2.2.1 Methodik

Die Auswertemethodik der Einpassung der Trajektorie ist bereits in Kapitel 7.2.1.4 beschrieben. Allerdings soll die dort beschriebene manuelle Bestimmung der identischen Orte durch das Registrieren von Ortsmarken entlang der Strecken entfallen. Zum Einen sollen die Signale von im Gleisnetz vorhandenen Koppelspulen genutzt werden, um auf verschiedenen Messfahrten identische Punkte zu identifizieren. Des Weiteren sind entlang der Strecke Reflektoren angebracht, die über Lichtschranken detektiert werden können. Somit waren weitere identische Punkte während der Fahrt identifizierbar (siehe Kapitel 6.3.2). Die Haltepunkte werden weiterhin als identische Punkte genutzt.



Abbildung 7-13: Koppelspule (WEBER 2002)

7.2.2.2 Messaufbau

Das eingesetzte PC-basierte Messsystem mit PXI-Technik sollte die zeitsynchrone Erfassung der Messdaten ermöglichen. Die in der Abbildung 7-14 dargestellten Messwerterfassungsmodule sind im Erfassungsrechner als einzelne Hardwaremodule realisiert. Das in SCHOLLMEYER (2003) beschriebene modulare Erfassungskonzept sieht für jedes Modul eine separate Datensinke vor. Die einzelnen Module sind über einen Zeitstempel aufeinander referenzierbar.

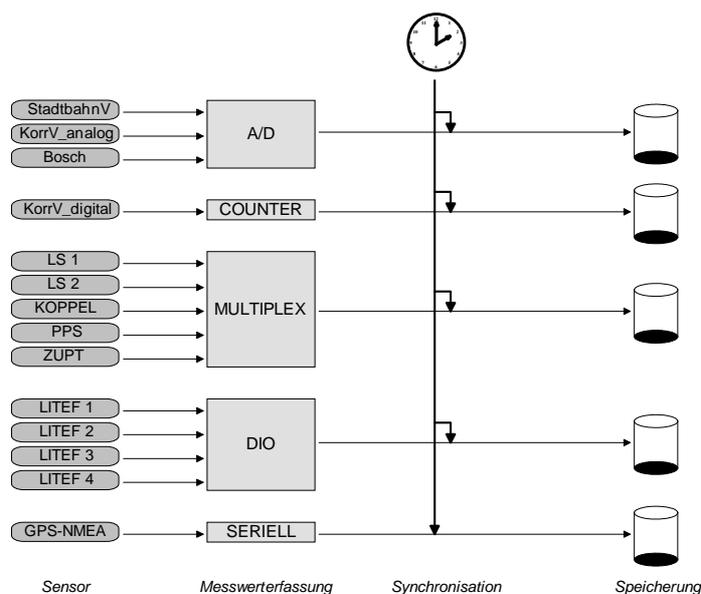


Abbildung 7-14: Konzeptioneller Aufbau des Messsystems (WEBER 2002)

Die ausgewählte Sensorik sieht die redundante Messung der Krümmungsdaten vor. Ein kostengünstiger Kreisel der Firma Bosch, der im Automobilbereich für das Elektronische Stabilisierung Programm (ESP) konstruiert wurde, und der bereits zuvor verwendete präzise mechanische Kreisel der Firma Litef erhalten die gleiche Anregung der Drehung um die Vertikalachse. Die Streckenmessung ist durch die Integration des Geschwindigkeitssignals der Stadtbahn und die Integration des Signals eines Korrelationsgeschwindigkeitsmessers redundant bestimmt.

Die Festlegung von Zeitpunkten, an denen in verschiedenen Messreihen identische Orte passiert werden, erfolgt zum einen durch ein elektrisches Signal beim Passieren von Koppelspulen. Zum anderen wurde je eine Lichtschranke an den Seiten der Stadtbahn montiert, die insbesondere die Einfahrt in bzw. die Ausfahrt aus einer Haltestelle detektieren konnten. Die Erkennung der Haltezeit an Haltepunkten wurde durch einen einfachen manuell betätigten Handschalter leicht automatisch auswertbar. In Anlehnung an die Inertialtechnik wurden die Haltepunkte als Zero-Velocity-Update-Point (ZUPT) bezeichnet. Auf eine Kontrolle der Haltegenauigkeit des Fahrzeugs wurde verzichtet, um die Türfreigabe und somit das Einsteigen von Passagieren in die Sonderfahrt zu umgehen. Zur Abschätzung der Haltegenauigkeit wurden die Ergebnisse der ersten Fahrt genutzt.

Kalibrieren der Kreisel

Das Kalibrieren der Kreisel konnte durch einen Industrie-Roboter, der durch das IAGB nach der ersten Messung beschafft wurde, erfolgen. Der Kreisel der Firma Bosch besitzt einen Messbereich von $100^\circ/\text{s}$ und eine Auflösung von ca. $0,02^\circ/\text{s}$. Diese Werte sind für die Anwendung im Schienenbereich vollständig ausreichend.



Abbildung 7-15: Kalibrierung der Kreisel mit Industrieroboter (WEBER 2002)

Alle Maßstäbe der einzelnen Kreisel sind über die gesamte Messdauer konstant. Weiterhin konnten die Nullpunkte sehr gut festgestellt werden. Sie waren über den gesamten Zeitraum der Kalibrierung konstant und entsprachen denen der Messfahrt. Die Standardabweichungen der Nullpunkte wurden aus den Standphasen berechnet. Wenn sie mit den entsprechenden Maßstäben umgerechnet werden, erhält man die oben genannten Auflösungen in der Einheit [°/s]. Deshalb erscheinen diese Werte im Vergleich zu den anderen Standardabweichungen sehr groß.

	1. Dreh- phase	2. Dreh- phase	3. Dreh- phase	4. Dreh- phase	5. Dreh- phase	Mittelwert	σ
Maßstab Litef 1 [Digits / (°/s)]	65,846	65,854	65,870	65,879	65,887	65,867	0,0170
Maßstab Litef 4 [Digits / (°/s)]	81,536	81,544	81,566	81,578	81,591	81,563	0,0229
Maßstab Bosch [mV / (°/s)]	17,784	17,826	17,839	17,832	17,809	17,818	0,0230
Nullpunkt Litef 1 [Digits]	0,205	0,203	0,201	0,199	0,199	0,201	0,0023
Nullpunkt Litef 4 [Digits]	0,631	0,636	0,639	0,638	0,640	0,637	0,0036
Nullpunkt Bosch [mV]	-0,456	-0,331	-0,265	-0,192	-0,148	-0,278	0,1210

Tabelle 7-4: Ergebnisse der Kreisel-Kalibrierung (WEBER 2002)

Kalibrieren der Streckenmessung

Die Redundanz der Streckenmessung wurde genutzt, um für das Geschwindigkeitssignal der Stadtbahn zu kalibrieren. Der Nullpunktfehler konnte aus den Standzeiten ermittelt werden. Bei allen Fahrten ist der Nullpunktfehler konstant:

24,20 mV mit $\sigma = 0,04$ mV.

Er variiert nicht signifikant. Der Maßstab wurde durch den Vergleich von Streckenlängen zwischen Haltestellen ermittelt, die durch Integration der jeweiligen Signale berechnet wurden. Strecken, auf denen der Korrelationsgeschwindigkeitsmesser kein Signal lieferte, wurden zuvor eliminiert. Somit ergab sich ein Maßstab für das Stadtbahnsignal:

$$\text{StadtbahnV} = m \cdot \text{KorrV_analog}$$

mit $m = 0,9625$, $\sigma_m = 0,0045$.



Abbildung 7-16: An der Stadtbahn montierter Korrelationsgeschwindigkeitsmesser (WEBER 2002)

Betrachtet man die Schwankungen des Maßstabs des Geschwindigkeitssignals (siehe Abbildung 7-17) zwischen den Haltepunkten (Nummerierung siehe Tabelle 7-1), so ist eine streckenabhängige Variation des Maßstabs insbesondere im ersten Streckenabschnitt aus der Graphik interpretierbar. Da dieser Streckenbezug nicht eindeutig streckenabhängigen Kon-

stanten zugeordnet werden kann, da konstante Versuchsbedingungen wie gleichmäßige Beladung, gleichartiges Beschleunigungsverhalten durch das Mitschwimmen im Taktverkehr mit den zusätzlichen Zeitreserven und kein Passagierwechsel auftraten, wurde über die gesamte Zeit der oben berechnete konstante Streckenmaßstab angehalten.

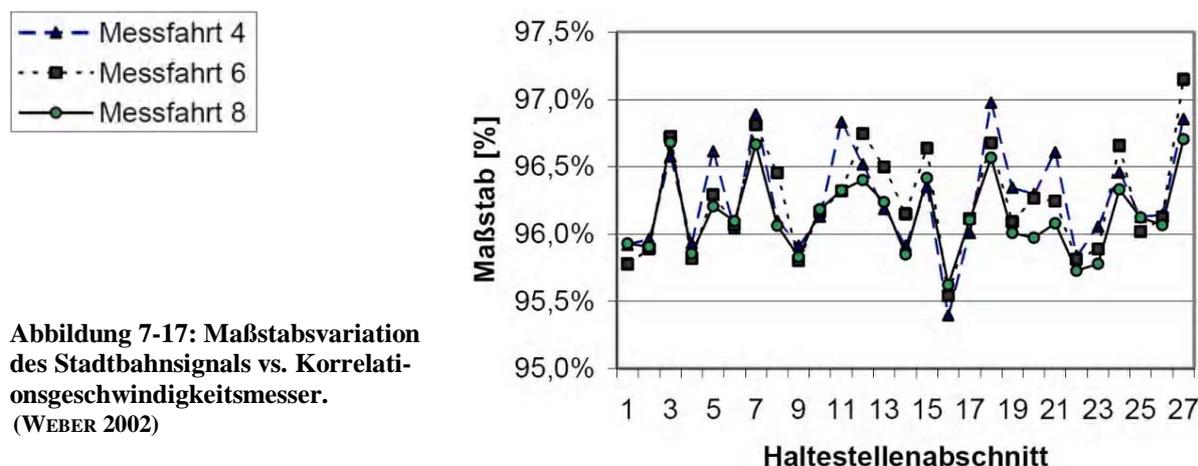


Abbildung 7-17: Maßstabsvariation des Stadtbahnsignals vs. Korrelationsgeschwindigkeitsmesser.
(WEBER 2002)

7.2.2.3 Messung

Die in Kapitel 7.2.1.3 beschriebene Strecke der U9 zwischen Botnang und Hedelfingen wurde im Januar 2002 insgesamt fünfmal befahren. Die Fahrten wurden zwischen den im Takt verkehrenden Fahrzeugen des Normalbetriebs vorgenommen. Daraus lässt sich ein praxisnahes Geschwindigkeitsprofil der Testfahrten begründen. Sämtliche 28 Haltestellen entlang der Strecke wurden jeweils angefahren und das Fahrzeug für ca. 10 Sekunden zum Stehen gebracht.

Das entsprechend der Abbildung 7-14 umgesetzte Messsystem erfüllte in der Praxisanwendung dieser Messfahrt wegen fehlerhafter Bedienung nicht die geforderte technische Synchronisierung der Messwerte. Die Synchronisation der Messwerte wurde über Kreuzkorrelation entsprechender Messwerte mit hinreichender Genauigkeit bestimmt.

7.2.2.4 Ergebnisse

Zielsetzung der Messfahrt war die Geodaten-gestützte Positionsbestimmung an definierten Orten bei wiederholten Fahrten. Zur Bestimmung des Zeitpunktes von identischen Orten innerhalb mehrerer Fahrten wurden ZUPT, Koppelspulen und Lichtschranken zum Vergleich eingesetzt. Auf diese Weise konnte die Streckenmessung der Messfahrten über das Stadtbahnsignal direkt miteinander verglichen werden. Abbildung 7-18 zeigt die Positionsdifferenzen von drei Fahrten gegenüber dem daraus abgeleiteten Mittelwert an allen Koppelspulen. Die Abweichungen der Positionen der Stadtbahnen auf den drei Fahrten lagen maximal bei ca. 10 Metern auf der 13,8 km langen Linie. Wie bereits das Kalibrieren des Streckensignals vermuten ließ, divergieren die Positionsdifferenzen in den identifizierbaren Abschnitten (Abbildung 7-17) systematisch auseinander. Darüber hinaus sind bei kurz aufeinanderfolgenden Koppelspulen auch beachtliche Positionssprünge zu verzeichnen.

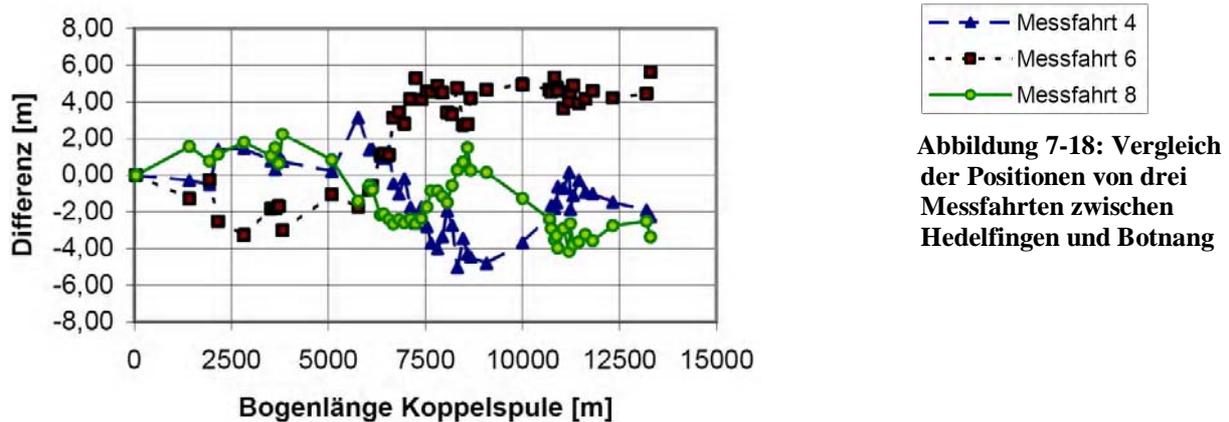


Abbildung 7-18: Vergleich der Positionen von drei Messfahrten zwischen Hedelfingen und Botnang

Der gewählte Ansatz, über eine positionsabhängige Geodaten-gestützte Positionsbestimmung eine Reinitialisierung für die weitere Streckenmessung durchzuführen, ist aus den gegebenen Messungen Erfolg versprechend.

Die in Kapitel 7.2.1.3 beschriebene Auswertungsmethode wird konkretisiert, indem (bis auf den Anfangsbereich) eine Trajektorienlänge von 2 Kilometern angehalten wurde. Dieser Wert garantiert beim vorliegenden Krümmungsband der Messtrecke, dass mindestens zwei signifikante Krümmungswechsel in der berücksichtigten Trajektorie vorhanden sind. Damit sich die zur Genauigkeitsbestimmung herangezogenen Positionsgenauigkeiten nicht auf denselben Streckabschnitt beziehen, wurde die Trasse in 7 Abschnitte unterteilt. Haltepunkte (ZUPT), Koppelspulen und Lichtschranken, die sich jeweils in der Nähe der Abschnittswechsel befanden, wurden nun zum Vergleich herangezogen.

Haltepunkte (ZUPT)

Abbildung 7-19 zeigt die Differenzen der Positionsbestimmungen zum gemeinsamen Mittelwert nach oben beschriebenen Verfahren zur Geodaten-gestützten Positionsbestimmung. Der letzte Punkt der Messfahrt 6 wurde entnommen, da bei dieser Messfahrt die Endhaltestelle in Gegenrichtung angefahren werden musste. Die bestimmten Positionen weichen bis zu drei Metern voneinander ab. Zu berücksichtigen bei dieser Betrachtung ist die Tatsache, dass der Fehleranteil durch ungenaues Halten an den Haltepunkten bei diesen Messungen nicht berücksichtigt ist. Eine mittlere Genauigkeit von unter 1m für dieses Verfahren aus dieser geringen Stichprobe abzuleiten, ist jedoch nicht zulässig.

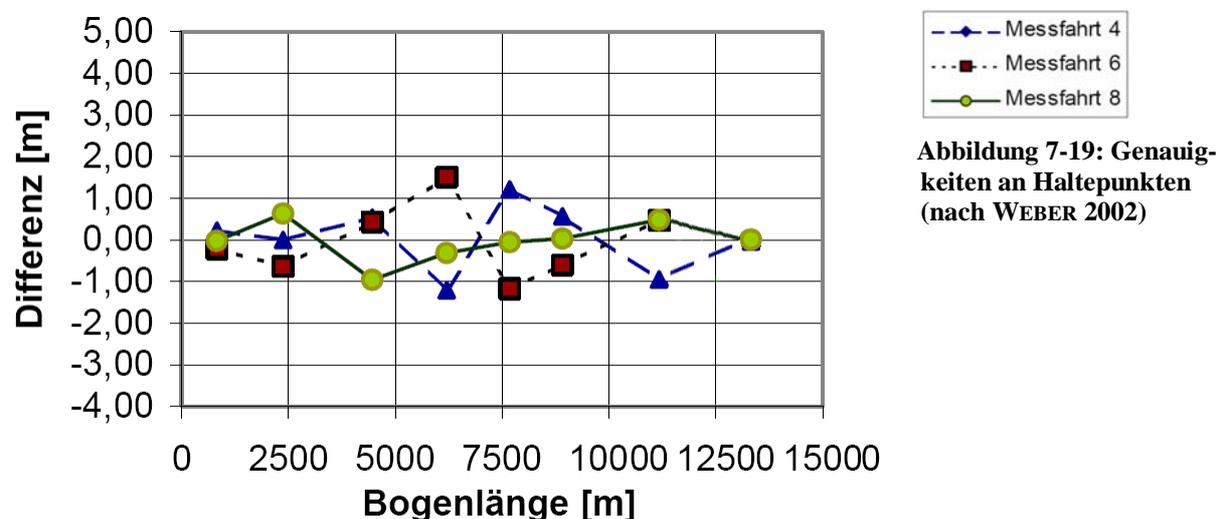


Abbildung 7-19: Genauigkeiten an Haltepunkten (nach WEBER 2002)

Koppelspulen und Lichtschranken

Im Gegensatz zu den zuvor bestimmten Haltepunkten besitzt das Fahrzeug beim Passieren der Koppelspulen und Lichtschranken eine Geschwindigkeit. Dies wirkt sich auf das Messergebnis durch ggf. auftretende Latenzzeiten beim Detektieren der Objekte negativ auf die Wiederholgenauigkeit aus. Ebenso existiert aus der Bestimmung des Zeitoffsets der Messmodule ein Restfehler. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung der Positionsbestimmung mit oben gegebenen Verfahren ist in Abbildung 7-20 und Abbildung 7-21 zu betrachten. Die Signatur der Diagrammdarstellung stimmt mit Abbildung 7-19 überein. Die maximale Abweichung der Positionsbestimmung an der Lichtschranke bei einer Bogenlänge von ca. 7150 m lässt sich nicht aus diesen zusätzlichen Fehleranteilen erklären.

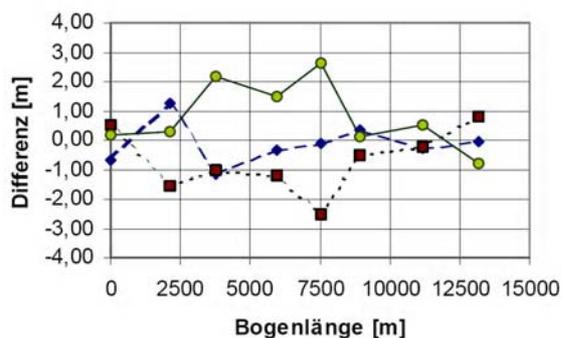


Abbildung 7-20:
Genauigkeiten an Koppelspulen (WEBER 2002)

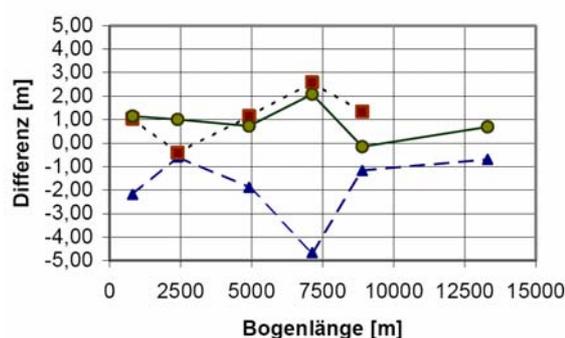


Abbildung 7-21:
Genauigkeiten an Lichtschranken (WEBER 2002)

Hier liegt der Fall vor, dass innerhalb der auszuwertenden Trajektorienlänge von zwei Kilometern eine signifikante Maßstabsvariation vorliegt, die durch den Ausgleichungsansatz, der nur einen Maßstab berücksichtigt, nicht abgedeckt werden kann. Da die Trajektorie zwischen Staatsgalerie (ca. 7150 m) und Raitelsberg (ca. 4950 m) lediglich zwei Kurven enthält (siehe Abbildung 7-22), ist die hier ermittelte Position deutlich ungenauer als in allen anderen betrachteten Fällen.

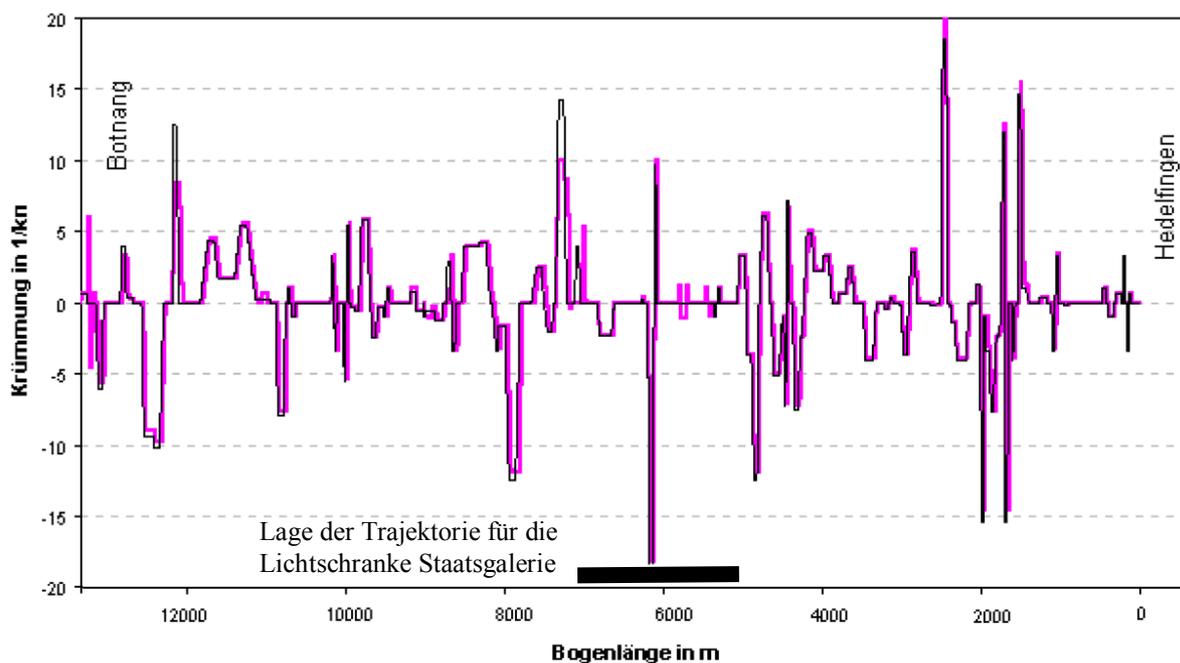


Abbildung 7-22: Soll- Krümmungsband mit Messwerten der Linie U9.

7.2.3 Zusammenfassung

Diese Untersuchung hat gezeigt, dass die positionsabhängige Geodaten-gestützte Positionsbestimmung ohne den Einsatz eines satellitengestützten Verfahrens und streckenseitiger Infrastruktur funktioniert. Ähnlich dem Einsatz von Baken kann der Algorithmus zu einem definierten Ort aufgerufen werden und verbessert somit die ohne weitere Stützung deutliche schlechtere Fortschreibung der Positionsbestimmung über eine reine Streckenmessung. Durch den Einsatz des Verfahrens an Haltpunkten wurden Genauigkeiten mit Differenzen bis maximal 3 Meter möglich. Die Verfahren mit der Messung von identischen Punkten aus dem fahrenden Fahrzeug konnten diese Genauigkeitsklasse nicht bestätigen.

Der begrenzende Faktor dieses Ansatzes ist das Geschwindigkeitssignal der Stadtbahn, das deutliche Maßstabsschwankungen aufweist, die durch den linearisierten Maßstabsansatz in seiner jetzigen Form nicht hinreichend modelliert sind. Der einfache Ansatz einer Längenbegrenzung der Trajektorie ist beim Praxistest dahingehend zu modifizieren, dass eine hinreichende Korrelation und somit eine ausreichende Genauigkeit erzielt werden kann.

7.3 Geodaten-basierte Positionsbestimmung auf der Straße

7.3.1 Zielsetzung

7.3.1.1 Genaue Positionsbestimmung durch lokale Landmarken

Positionsbestimmungsverfahren, die eine lokale Infrastruktur nutzen, garantieren eine hohe relative Lagegenauigkeit. Die Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von ca. einem Meter wird derzeit im ÖPNV über Ortsbaken, eine spezielle straßenseitige Infrastruktur, die aktiv mit dem Fahrzeug kommuniziert, gelöst. Das Erstellen dieser Infrastruktur, das Erhalten der technischen Verfügbarkeit und die Versorgung mit korrekter Information ist ein Kostenfaktor, der mit vergleichsweise kostenintensiven Arbeiten vor Ort verbunden ist. Der hier vorgestellte Ansatz soll die bereits straßenseitig existierende Infrastruktur als lokale passive Landmarken nutzen, um die in Einzelfällen geforderte hohe Lagegenauigkeit zu erreichen. Zum Erreichen der Zuverlässigkeit des Systemansatzes wird ein autonom agierendes System gewählt. Erfassten Sensorsignale werden mit Daten einer Geodatenbank verglichen. Aus der Korrelation heraus wird die Lage bestimmt.

Wie im Kapitel 7.1 beschrieben wird im Rahmen dieser Arbeit die Phase 2 Geodaten-gestützte Positionsbestimmung eines entsprechenden Systems entwickelt. Nach einer konzeptionellen Übersicht soll in einer praktischen Überprüfung die Signalstruktur von zwei Sensoren der Nahbereichsentfernungsmessung und eines Beschleunigungsmessungs-Sensors, die am Institut für Anwendungen der Geodäsie verfügbar waren, analysiert werden. Digitale Bildverarbeitung und Laserscanner-Systeme zur Beobachtung des Verkehrsraumes von zukünftigen Fahrerassistenzsystemen werden unter dem Gesichtspunkt der noch relativ hohen Kosten außer Acht gelassen. Die grobe Positionsbestimmung der Phase 1 könnte über GPS erfolgen oder auch über die Extrapolation der Position entlang der geplanten Trajektorie. Da die Genauigkeit der Positionsbestimmung mit zunehmender Strecke geringer wird, ist ggf. eine entsprechende Anzahl von passiven Landmarken zu detektieren, um das notwendige Genauigkeitsniveau der Grobortung zu erhalten.

7.3.1.2 Existierende Entwicklungstrends

In den vergangenen Jahren wurde auf dem Markt geodätischer Instrumente eine Vielzahl von Instrumenten mit Entfernungsmesstechnik platziert, die ohne Adaption eines reflektierenden Gegenstandes am Messobjekt auskommen. Sowohl im klassischen Vermessungswesen als auch in der Industriemesstechnik haben sich diese Systeme, die zumeist Lasertechnik nutzen, etabliert. Neben dieser messtechnischen Komponente entwickelt sich die datentechnische Verarbeitung des Straßenraumes weiter fort. Über Mobile Mapping Systeme wird der Straßenraum erfasst, und es besteht die Möglichkeit, gezielt Objekte aus den erfassten Bildmaterial zu geocodieren. Auf diese Weise können Referenzdaten für autonom erfassbare lokale passive Landmarken aufgebaut werden.

7.3.2 Methodik

7.3.2.1 Funktionalarchitektur

Das Positionsbestimmungsverfahren ist konzipiert für den Einsatz entlang einer vorgegebenen Trajektorie. Eine Trajektorie von ÖPNV-Fahrzeugen ist stets von einer Betriebsleitzentrale vorgeplant. Entlang dieser Trajektorie werden nun Sensordaten während der Fahrt aufgezeichnet. Diese Daten bilden ein Profil (siehe Abbildung 7-23), das mit Daten aus einer Datenbank verglichen werden kann. Der bereits ausgeführte Ansatz von CZOMMER (2001) zum Vergleich von Krümmungsprofilen ist hier einzuordnen.

Im Folgenden sollen darüber hinaus aus den Profilmessungen auch charakteristische positionsabhängige Signalsequenzen detektiert werden (Profilkonstanten), die Objekten einer Datenbank eindeutig zugeordnet werden sollen. Über Algorithmen werden im Profil die Profilkonstanten detektiert. Ein für einen Entfernungsmesser typisches Signal ist die Reduktion der Entfernung beim Passieren eines Verkehrsschildes. Diese Signaländerung, die noch keinen Rückschluss auf das Objekt selbst zulässt, wird als Indikator für ein Objekt definiert. Der Vergleich mit einer Referenzdatenbank kann nun genutzt werden, um ggf. dem Signal ein Objekt zuzuweisen. Anhand des Kontexts des Signalverlaufes als auch aus der Übereinstimmung des korrespondierenden Ortes kann nun eine Position des Fahrzeugs entlang der gegebenen Trajektorie bestimmt werden.

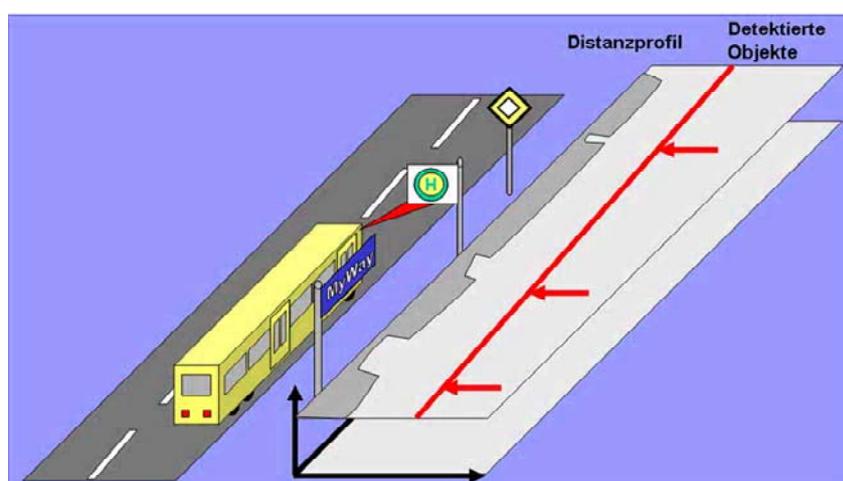


Abbildung 7-23: Funktionsprinzip der Ermittlung von Profilkonstanten

7.3.3 Messaufbau

Der Messaufbau sieht die Streckenmessung entlang der Trajektorie über einen Korrelationsgeschwindigkeitsmesser vor. Synchron dazu werden die Signale eines Lasertriangulationsentfernungsmessers (LTE), eines Ultraschallsensors (US) und eines Beschleunigungsmessers (BM) aufgezeichnet. Die Entfernungsmesser werden auf einer Höhe von 2,50 Metern über der Bordsteinkante montiert, damit Verkehrsschilder und Ampeln, die nach der entsprechenden Richtlinie montiert wurden, im Messbereich liegen.

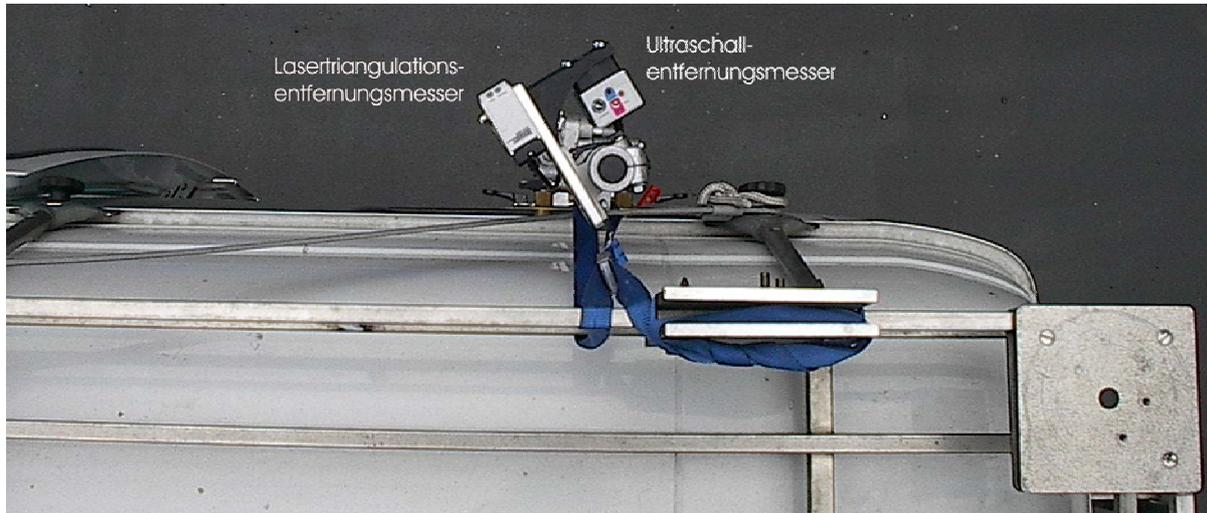


Abbildung 7-24: Montage der Entfernungsmessungssensoren am Heck des Fahrzeugs

7.3.3.1 Theoretische Vorüberlegungen zur Genauigkeit

Sollen Objekte entlang der Straße erfasst werden, so ist die Tastgeschwindigkeit der Profilmessung anhand der Geschwindigkeit und der Objektgröße festzulegen. Dieser Zusammenhang stellt also einen wesentlichen Spezifikationsgegenstand an die Sensorik dar. Die Maximalgeschwindigkeit von Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr wird mit 100 km/h angenommen. Soll ein Gegenstand von 10 cm Durchmesser (z.B. ein Mast) erfasst werden, so ergibt sich eine Messfrequenz von ca. 278 Hz, um mindestens eine Messung auf dem Objekt zu erhalten. Damit mindestens 2-3 Messungen das Objekt erfassen sollten, ist eine Frequenz von 1000 Hz anzusetzen (siehe Abbildung 7-25).

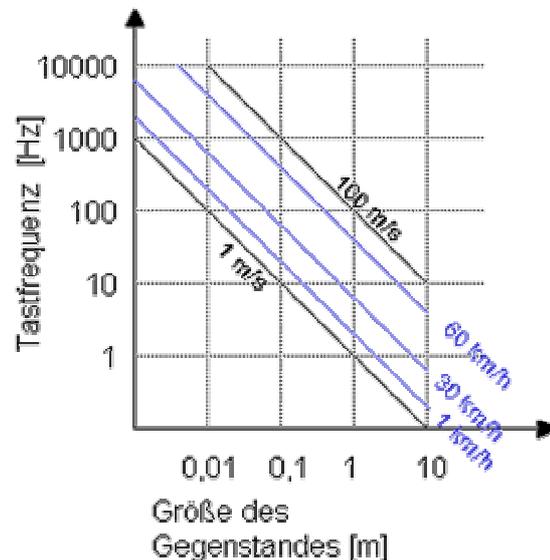


Abbildung 7-25: Zusammenhang zwischen Tastrate, Größe der Profilkonstanten und Geschwindigkeit

Die Entfernungsmessungssensoren, die zur Verfügung standen, besitzen jedoch nicht diese hohe Messfrequenz. Dies hatte zur Folge, dass die Geschwindigkeit bei den Testfahrten entsprechend auf ca. 30 km/h begrenzt wurde, um auch kleinere Objekte erfassen zu können. Als weitere Maßnahme, um Objekte des Straßenraums detektieren zu können, wurde die Entfernungsmessung nicht senkrecht zur Fahrtrichtung vorgenommen. Durch das Verschwenken der Messrichtung der Entfernungsmesser um ca. 30° (Siehe Abbildung 7-24) konnten die Flächen der Schilder einen Beitrag zur Reflexion des Signals liefern.



Abbildung 7-26: Ausschnitt aus dem Referenzdatensatz (MAIER 2003)

7.3.3.2 Referenzdatensatz

Ein Referenzdatensatz der Teststrecke wurde im Rahmen der Studienarbeiten von Frau MAIER (2003) mittels GPS erhoben. Erfasst wurden alle Objekte, die mittels des Entfernungsprofils detektiert werden konnten. Die verwendete RTK-Lösung lieferte durch einen experimentellen Vergleich eine Lösung mit einer Standardabweichung von 2 cm. Objekte, die für die direkte Vermessung mit einer Satellitenantenne ungeeignet waren, wurden mittels reflektorloser Distanzmessung mit Bogenschlag über zwei RTK-bestimmte Punkte ermittelt. Der Referenzdatensatz wurde verwendet, um die Zuordnung der Signale (siehe Abbildung 7-36) vorzunehmen.

7.3.4 Messung

Für die Messung wurde eine Wegstrecke gewählt, die eine hohe Anzahl an Ampelanlagen enthält. Eine Übersicht der Strecke im Stuttgarter Stadtteil Bösingen wird durch die Abbildung 7-36 gegeben. Die Strecke umfasst eine Länge von ca. 750 Metern. Insgesamt sind sechs Ampeln auf diesem Wegstück enthalten. Darüber hinaus wird auf der Strecke, die nicht vollständig durch bebautes Gebiet führt, der Einfluss der Vegetation deutlich. Insgesamt wurden sechs Fahrten zur Auswertung herangezogen.

7.3.5 Auswertung

Die Auswertung umfasst im ersten Versuchsschritt einen Vergleich der Signalstruktur mehrerer Fahrten. Die Signalstrukturen des Beschleunigungsmessers und des Ultraschallsensors werden lediglich visuell bewertet. Für den LTE wird das Signal mit einem einfachen Objekttypfilter versehen. Die auf diese Weise detektierten Orte mit definiertem Objekttyp werden hinsichtlich der Wiedererkennungsrates in den einzelnen Fahrten bewertet und den realen Objekten des Referenzdatensatzes zugeordnet.

7.3.5.1 Beschleunigungsmesser (BM)

Als BM wurde ein hochwertiger Sensor eingesetzt. Durch diesen Sensor sind hochwertige Aufzeichnungen der Vertikalbeschleunigung im Fahrzeug möglich. Sowohl ein Sensor dieser Genauigkeitsklasse als auch die entsprechende konfigurierbare Tiefpassfilterung, die in diesem Experiment verwendet wurden, liegen für ein Ortungsmodul in einer Preisklasse, die nicht wirtschaftlich abbildbar ist. Da es jedoch hier um eine grundlegende Untersuchung des Beschleunigungssignals handelt, ist diese hochwertige Sensorwahl erfolgt. Die Montage des BM (siehe Abbildung 7-27) erfolgte im Wageninneren. Vertikale Beschleunigungen auf die Räder werden über Fahrwerk mit der entsprechenden Federung auf die Karosse übertragen und bewirken eine Schwingung.



Abbildung 7-27: Montierter Beschleunigungsmesser mit Kreisel

Die Beschleunigungsprofile aller Fahrten (siehe Abbildung 7-28) zeigen eindeutige Signale, die in allen Fahrten ähnlich aufgetreten sind. Hauptsächlich wurden diese auffälligen Vertikalbeschleunigungen auslöst durch Änderungen des Fahrbahnbelags („Asphaltflicken“) oder Kanaldeckel.

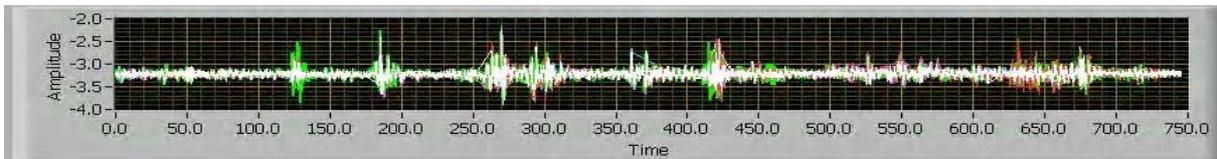


Abbildung 7-28: Signal des Beschleunigungsmessers über den gesamten Streckenverlauf aller Fahrten

Die aus diesen Anregungsimpulsen resultierenden Schwingungen der Fahrzeugkarosserie sind im durchgeführten Versuch auffällig gleichförmig. Dies liegt natürlich an den nahezu identischen Rahmenbedingungen von Beladung und Geschwindigkeit. Diese Schwingungen werden jedoch durch die entsprechenden Impulse synchronisiert. Dabei ist nicht der Betrag der Beschleunigung ausschlaggebend für die Synchronisation (siehe Abbildung 7-29).

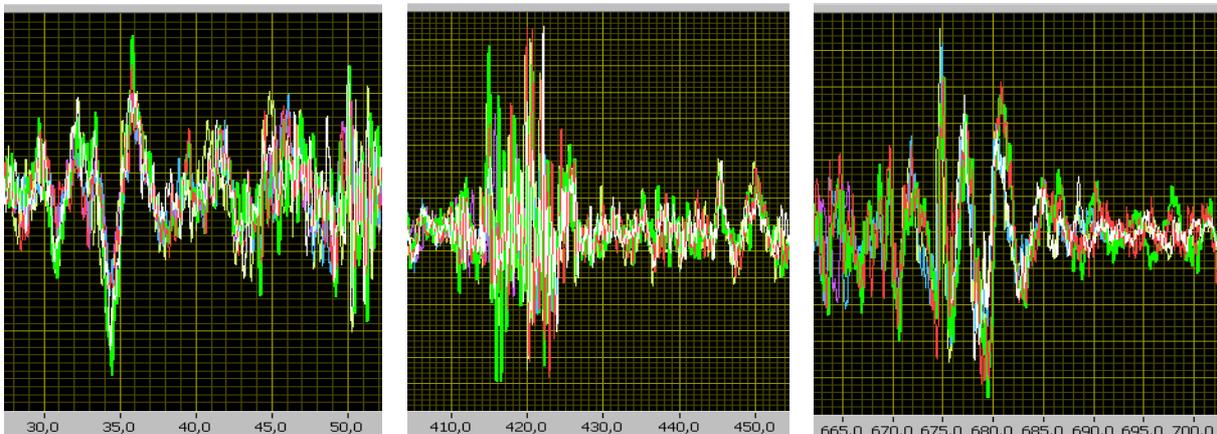


Abbildung 7-29: Detailansichten der Beschleunigungsprofile

Die Beispiele aus obiger Graphik zeigen, dass sich eine Synchronisation der Signale bei entsprechender Anregung innerhalb weniger Meter einstellt. Das positionsspezifische Signal ist

in diesem Experiment innerhalb einer groben Positionsabschätzung von 20 Metern eindeutig. Die Option einer Positionsbestimmung über dieses Signal ist damit untermauert. Weitere Untersuchungen zur Gleichförmigkeit und zu einer Wiedererkennbarkeit dieses positionsabhängigen Signalverlaufs durch Variation des Geschwindigkeitsbereichs und der Beladung mit einem in der Praxis des ÖPNV genutzten Fahrzeugs wären notwendig. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit die Untersuchung an diesem Punkt abgeschlossen.

7.3.5.2 Ultraschall

Ein Ultraschall-Sensor UA5000 der Firma Waycon wurde eingesetzt. Die wichtigsten technischen Daten, die für die Einsatztauglichkeit des Sensors relevant sind, sind zum einen die Abtastrate, die lediglich ca. 10 Hz beträgt, und zum anderen die Reichweite des Signals von bis zu 5 Metern. Der Sensor kann durch die Abtastrate keine kleineren Objekte detektieren. Die Untersuchung soll einen Beitrag liefern, inwieweit bei dieser Technik mit einer geringen Abtastrate doch eindeutige positionsabhängige Signale gemessen werden können.



Abbildung 7-30: Ultraschallsensor

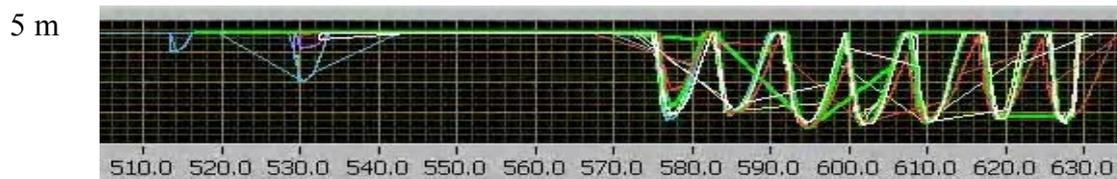


Abbildung 7-31: Signalstruktur des Ultraschallsensors

Wie zu erwarten zeigen sich entlang der Strecke nur selten eindeutige Signale. Das Standard-signal liegt auf der maximalen Messweite und wird nur geringer, wenn ein messbares Objekt sich im Straßenraum befindet. Gegen Ende der Strecke befindet sich eine straßennah gepflanzte Baumreihe (siehe Abbildung 7-36, oberstes Bild), die eine eindeutige Signalstruktur bewirkt. Im Vergleich zu den gemessenen Beschleunigungssignalen ist die Synchronität der Signale nicht so ausgeprägt. Eine Genauigkeit von ca. 2 Metern ist aus der Abbildung 7-31 zu entnehmen. Weitere Untersuchungen mit diesem Sensor sind trotz der wider Erwarten ermittelbaren positionsabhängigen Signalstrukturen nicht zu unternehmen. Die geringe Abtastrate liefert eine zu schlechte Positionsqualität.

7.3.5.3 Lasertriangulationsentfernungsmesser (LTE)

Der eingesetzte LTE der Firma Balluff funktioniert ähnlich dem Prinzip des Vorwärtsschnittes. Aus konstruktiv gegebenen Winkelbeziehungen und der Basisstrecke wird durch die Registrierung des reflektierten Laserstrahls auf einer CCD die Entfernung ermittelbar. Durch die Winkelbeziehungen und Begrenzung der Basis ist der Messbereich der Sensoren festgelegt.

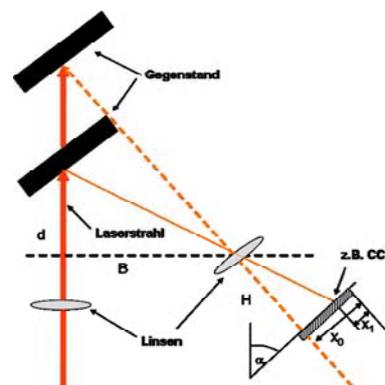


Abbildung 7-32: Prinzip LTE (nach SCHNELL 1991)

Der eingesetzte LTE besitzt eine Reichweite von 2,5 Metern und eine Tastfrequenz von 100 Hz. Der Sensorausgang zeigt, sofern kein Objekt im Messbereich liegt, den Maximalwert an. Ist ein Objekt innerhalb des Messbereichs, so kann eine Messung erfolgen, wenn nicht folgende Ausnahmen zum Tragen kommen:



Abbildung 7-33: Bild LTE

- Die Messung auf Kanten kann nicht erfolgen.
- Die Objektbeschaffenheit des Objektes darf die Intensität des Laserstrahls nicht soweit reduzieren, dass der CCD-Sensor den Laserpunkt nicht mehr erkennen kann.

Der Effekt, dass bei der Abtastung des Objektes der Laserstrahl für den erfassenden Sensor nicht auffindbar ist und somit die maximale Entfernung angenommen wird, tritt häufig auf (siehe Abbildung 7-34). Die Ableitung eines konsistenten Profils eines Objektes ist angesichts der registrierten Messwerte somit nicht wahrscheinlich. Die Zuverlässigkeit, dass ein Objekt erfasst wird, ist jedoch hinreichend hoch.

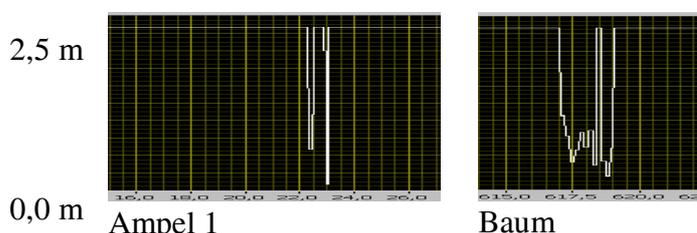


Abbildung 7-34: Signalstruktur des Lasertriangulationsentfernungsmessers

Aus diesem Grunde wurde ein Filter über das Signal gelegt, der folgende Charakteristiken eines Objektes im Straßenraum berücksichtigt:

- Signalfolge kleiner als 1 Meter.
- Signalfolgen mit Lücken kleiner als 0,5 Meter werden als ein Objekt gewertet.
- Vor und nach einem Objekt muss mindestens auf einer Strecke von einem Meter die Maximaldistanz des Sensors registriert sein.

Der letzte Punkt der Kriterienliste soll der Tatsache Rechnung tragen, dass Verkehrsschilder und -zeichen sowie Lichtsignalanlagen in der Regel wegen der Sichtbarkeit „freigestellt“ sind.

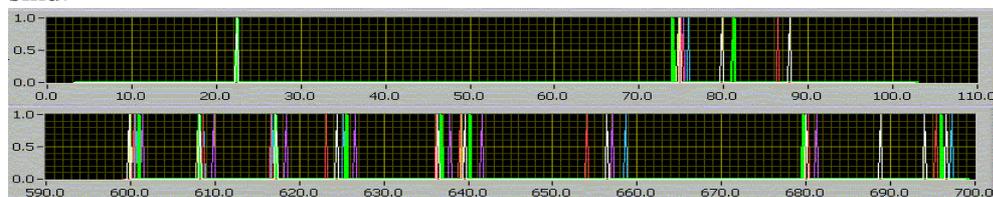


Abbildung 7-35: Signalstruktur nach der Objektbildung

Aus Abbildung 7-36 wird deutlich, dass auf einem Großteil der betrachteten Gesamtstrecke von ca. 700 Metern durch Vegetation das Originalsignal sehr gestört ist. Eine sinnvolle Auswertung ist nur auf ca. einem Drittel (35,43 %) der Strecke möglich. Auch der Objektfilter weist deutlich mehr Objekte aus als die reale Straßeninfrastruktur. Dies liegt in erster Linie an den Vegetationsbereichen, die zum Teil direkt an das Lichtraumprofil der Straße heranragen. Es ergibt sich ein Mittelwert der Standabweichung für die Station des ersten Signals von 0,60 Metern. Aufgrund der Topographie werden die Ampeln 2 und 3 nicht erkannt. Der Beginn der für die Störung verantwortlichen Objekte ist jedoch in diesem Versuch als ortsinvariant zu bezeichnen und wird daher in dem Versuch mit ausgewertet.

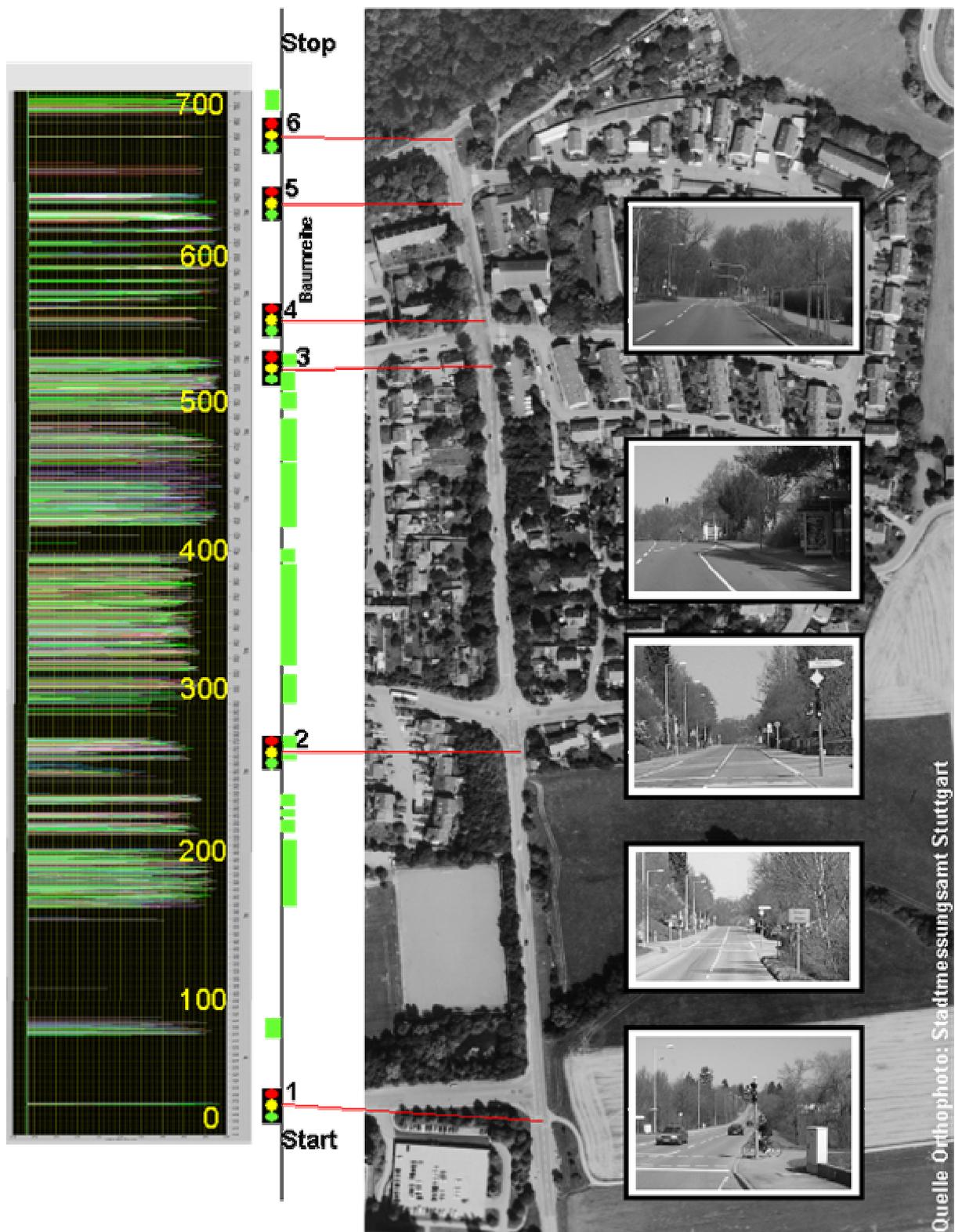


Abbildung 7-36: Übersicht der Profilmessung

	Ampelobjekte entlang der Strecke [m]	1	2	3	4	5	6
Beginn	Fahrt 1	22,3	262,8	521,5	564,5	636,4	680,0
	Fahrt 2	22,3	262,8	521,4	564,7	636,2	680,2
	Fahrt 3	22,4	264,2	522,1	564,7	636,7	679,6
	Fahrt 4	22,4	263,0	522,5	564,7	636,5	679,9
	Fahrt 5	22,3	262,4	522,3	564,3	636,3	679,5
	Fahrt 6	22,4	262,5	524,0	565,8	637,8	681,2
Länge	Fahrt 1	0,7	14,4	9,5	0,2	0,3	0,3
	Fahrt 2	0,1	12,0	9,5	1,1	0,2	0,4
	Fahrt 3	0,7	11,7	9,0	1,3	0,6	0,7
	Fahrt 4	1,0	11,3	8,5	1,4	0,2	0,3
	Fahrt 5	0,8	11,9	7,8	1,1	0,2	0,4
	Fahrt 6	0,8	13,0	6,8	0,2	0,5	0,1
	Standardabw. Strecke [m]	0,04	0,65	0,94	0,52	0,59	0,61
	Mittelwert Länge [m]	0,68	12,38	8,52	0,89	0,33	0,37
	Standardabw. Länge [m]	0,31	1,14	1,06	0,54	0,18	0,20

Tabelle 7-5: Messwerte zu erkannten Objekten im Bereich der Ampeln

	Baumobjekte entlang der Strecke [m]	0	1	2	3	4	5	6	7
Beginn	Fahrt 1	571,3	575,0	583,4	592,1	599,8	608,6	617,4	624,9
	Fahrt 2	571,4	575,0	583,5	591,9	600,3	608,4	616,5	626,9
	Fahrt 3	572,0	574,8	583,2	592,4	600,9	608,6	617,1	625,5
	Fahrt 4	571,9	574,7	584,0	592,0	600,7	608,6	616,8	625,4
	Fahrt 5	569,6	576,3	583,2	591,9	600,0	608,4	617,0	625,2
	Fahrt 6	571,0	575,2	584,6	593,4	601,3	609,8	618,4	625,6
Länge	Fahrt 1	0,1	1,3	1,2	2,6	2,5	1,7	1,6	6,3
	Fahrt 2	0,1	1,4	1,1	2,3	1,4	1,4	1,8	3,7
	Fahrt 3	0,1	1,9	1,5	2,1	1,0	1,4	1,6	4,7
	Fahrt 4	0,2	2,1	0,2	1,1	1,3	1,4	1,9	5,0
	Fahrt 5	2,2	0,2	0,9	2,0	1,5	1,4	1,4	2,6
	Fahrt 6	1,9	2,4	1,1	2,3	1,7	1,4	1,7	3,6
	Standardabw. Strecke [m]	0,87	0,58	0,55	0,58	0,57	0,53	0,64	0,77
	Mittelwert Länge [m]	0,77	1,55	1,00	2,07	1,57	1,45	1,66	4,33
	Standardabw. Länge [m]	0,99	0,78	0,44	0,52	0,51	0,12	0,18	1,31

Tabelle 7-6: Messwerte zu erkannten Objekten im Bereich der Baumreihe

7.3.6 Zusammenfassung

Das Verfahren zur Detektion von Profilkonstanten mittels des Sensors LTE funktioniert mit der erwarteten Genauigkeit mit einer Standardabweichung kleiner als 1 Meter. Mit dem Verfahren der Detektion von Profilkonstanten durch einen Beschleunigungsmesser steht ein weiterführender Ansatz zur Verfügung, der das Potenzial zu einer ähnlichen Genauigkeit aufweist. Hingegen erreichen die Messungen mit dem Ultraschallsensor nicht diese Genauigkeitsklasse.

Ein wesentliches Hemmnis bei dem LTE-Sensor stellen die Bereiche dar, in denen die Vegetation oder auch andere topographische Phänomene die Entfernungsmessung so beeinflussen, dass die im Straßenraum aufgestellten Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen nicht detektiert werden können. Die Ermittlung des Beginns der „Vegetationsbereiche“ ist ebenfalls mit Genauigkeitsverlust zu bestimmen. Sie können jedoch nicht oder nur eingeschränkt als Landmarken zur Ortsbestimmung herangezogen werden, da mit Jahreszeit abhängigen Verschiebungen zu rechnen ist bzw. bei der Pflege des Straßenraumes verändernde Maßnahmen ergriffen werden. Das registrierte Signal einer Profilkonstante zeigt kein konstantes Muster über mehrere Messfahrten. Eine konstantere Formtreue der Profilkonstante lässt sich durch eine Steigerung der Abtastrate erreichen.

Die Lichtsignalanlagen, die im Szenario einen Ausgangspunkt für die Auswahl des Untersuchungsgebietes darstellen, konnten durch den Aufbau sehr zuverlässig erkannt werden. Die Tatsache, dass bei der relativ geringen Stichprobe keine Fehlmessung auftrat, kann lediglich als Ansatzpunkt für weitere Erfolg versprechende Untersuchungen genommen werden.

Das Ergebnis der Untersuchungsreihe zeigt die Machbarkeit der Positionsbestimmung über Beschleunigungsmessung und die Profilmessung mittels LTE. Die technische Entwicklung der Sensorik muss weiter experimentell durchgeführt werden. Insbesondere sind den Entwicklungen der Laserscannertechnik und der Bildverarbeitung Beachtung zu schenken.

Neben den Sensoraspekten muss jedoch der noch zu entwickelnde Teil des Aufbaus eines Referenzdatensatzes bearbeitet werden. Nur durch einen Referenzdatensatz mit hoher Qualität hinsichtlich der Vollständigkeit von benötigten Profilkonstanten, die mit hinreichender Genauigkeit in der Datenbasis vorliegen, kann das Verfahren zuverlässig funktionieren. Das Ableiten des Referenzdatensatzes über eine gepflegte GDI eines externen Informationsproviders ist für den Aufbau des Systems ggf. hilfreich. Da jedoch der Referenzsatz beim Einsatz im ÖPNV tagesaktuell gehalten sein muss, sind automatische Lernverfahren zu integrieren, die hinreichend schnell eine signifikante Veränderung des Referenzdatensatzes erkennen und über automatisierte Verfahren diese Referenz fortschreiben können.

8 Schlussfolgerung und Ausblick

8.1 Schlussfolgerung

Das Innovationspotenzial durch die Integration von Geodaten in RBL konnte durch eine Bewertung einer Funktionalanalyse aufgezeigt werden. Mittels prototypischer Systemaufbauten ist die genutzte Funktionalarchitektur verifiziert, die Machbarkeit der technischen Ansätze nachgewiesen.

8.1.1 Integration von Geodaten ins RBL

Ein GeoRBL, erweitert um die Funktionalitäten routenflexibles Störfallmanagement und flexible Bedienungsform, wurde prototypisch aufgebaut. Dies beinhaltete die Integration existierender Geodaten mit entsprechenden Nacherfassungen. Von Verkehrsbetrieben wurde die funktionale Erweiterung ausdrücklich begrüßt und bereits auf dem Markt nachgefragt. Die Zweckmäßigkeit der Integration von Geodaten in ein RBL konnte insbesondere unter dem Aspekt der funktionalen Erweiterung des Systems über den Linienverkehr hinaus ermittelt werden. Die funktionale Erweiterung rechtfertigt in erster Linie den Integrationsaufwand der Geodaten gegenüber einem traditionellen RBL.

In ausgewählten Szenarien konnte die Funktionsweise des Störfallmanagements im GeoRBL demonstriert werden. Die fachliche Bewertung seitens der beteiligten Verkehrsbetriebe als auch von Systemherstellern war positiv (TRITSCHLER ET AL. 2005). Die erstellte Datengrundlage für die mit Kundenbetrieb umgesetzte flexible Bedienungsform hat sich in der umgesetzten Form als praktikabel erwiesen.

Wesentliche Hemmnisse zur Integration der gesamten Funktionalität, die auf Geodaten basiert, sind die Bereitstellung und Pflege eines Vorzugsstraßennetzes. Sollten die Bereitstellungskosten für den Datensatz alleine dem operativen Betrieb zugerechnet werden, so ist eine positive Bewertung der Wirtschaftlichkeit dieser Investition fraglich. Da jedoch wie in dem umgesetzten Fall Geodaten bereits existieren, können durch homogenisierte Datenstrukturen, die einen Datenfluss der Geodaten sowohl in der Planungsphase als auch in der Auskunftssituation ermöglichen, Kosten für die Datenbereitstellung und Pflege geteilt werden, so dass die Bereitstellung der Geodaten-Basis wirtschaftlich werden kann. Die Datenverfügbarkeit der Institutionen eines Verkehrsraumes ist stets zu prüfen.

Es existieren durch die VDV-Schriften 453 und 454 moderne Datendienste, die einen Austausch von aktuellen Daten der RBL ermöglichen. Der Datenaustausch umfasst jedoch derzeit lediglich georeferenzierte Umwege. Ein Datendienst, der entsprechende Geodaten als Referenz bereitstellt, und der damit verbundene Aktualisierungsdienst, der beispielsweise die Verlegung von Haltestellen beinhaltet, ist nicht integriert. Aus der Sicht eines GeoRBL sind hier Ergänzungen empfehlenswert.

8.1.2 Geodaten-gestützte Positionsbestimmung

Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass bereits marktverfügbare Lösungen Geodaten-gestützter Positionsbestimmung als Komponente in ein GeoRBL integriert werden können. Im Rahmen des Projektes RUDY (SCHOLLMAYER ET AL. 2004) konnte in einem Praxistest gezeigt werden, dass die Ortungsqualität der Standardkomponenten ausreichend für die Priorisierung des ÖPNV an Kreuzungen durch eine Beeinflussung der Lichtsignalanlage ist.

An zwei Beispielen der autonomen Positionsbestimmung, die speziell die positionsabhängige Geodaten-gestützte Positionsbestimmung verfolgen, konnte die technische Machbarkeit des Positionsbestimmungsansatzes experimentell geprüft werden.

Für den Schienenverkehr konnte die Machbarkeit des Ansatzes des Krümmungs-Map-Matching nachgewiesen werden. Die erwartete Qualität, die durch die berechnete innere Genauigkeit der ersten Versuchsfahrten möglich schien, konnte in den weiteren Tests, die durch den Messaufbau die äußere Genauigkeit überprüften, nicht bestätigt werden. Eine Anpassung des stochastischen Modells des Ausgleichungsansatzes wurde nicht vorgenommen, da die für die Bewertung notwendigen Kenngrößen durch den geänderten Messaufbau direkt ermittelt wurden und dies für die Bewertung der Machbarkeit ausreichend war.

Der Ansatz der Detektion von passiven Landmarken im Bereich des ÖPNV wurde exemplarisch für nicht bildverarbeitende Sensoren getestet. Es konnte innerhalb des Testumfelds ein hohes Genauigkeitsniveau der Positionserkennung nachgewiesen werden. Die im Experiment eingesetzte Sensorik ist im Weiteren zu optimieren, um insbesondere eine Steigerung der Objekterkennung zu erreichen. Des Weiteren ist die Robustheit des Ansatzes zu überprüfen. Durch eine Mischung verschiedener Sensorsignale wird die Eindeutigkeit gesteigert werden können. Eine Optimierung der Sensorik im Bereich der reflektorlosen Entfernungsmessung erscheint in absehbarer Zeit bei weitergehendem Entwicklungstrend möglich.

8.2 Ausblick

8.2.1 Geodaten-gestützte Positionsbestimmung

Der systembedingte Vorteil der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung ist hinsichtlich der Verfügbarkeit signifikant und durch die Existenz der geocodierter Basisdaten zukunftsfähig. Auch wenn durch die höhere Verfügbarkeit der ausgebauten Satelliten-Infrastruktur mit dem Positionsbestimmungssystem Galileo die Verfügbarkeit und Ortungsgenauigkeit zunehmen soll, ist abzusehen, dass weiterhin durch die Abschattungs- und Reflektionseigenschaften Filteralgorithmen integriert werden müssen. Eine Positionsbestimmung über lokale Landmarken wird auch in Zukunft die zu bevorzugende Technik der Positionsbestimmung bleiben, um zuverlässig eine hochgenaue Positionsbestimmung durchzuführen. Die Robustheit der Objekterkennung auf der Basis einer hinreichend genauen Positionsschätzung wird entscheidend sein für den Durchbruch der Verwendung von passiven Landmarken.

8.2.2 Motivation zur kooperativen Datennutzung in einer Verkehrsregion

Die Hemmnisse der Integration von Geodaten in ein RBL liegen an der Verfügbarkeit der Geodaten in einem adäquaten Format. Geodaten des ÖPNV-Netzes werden in einer Verkehrsregion bereits bei einigen Institutionen genutzt. Insbesondere sind hier der Planungsbereich und die Fahrgastauskunft zu nennen. Für die kooperative Nutzung stehen bereits Datenformate zur Verfügung.

8.2.3 Erweiterung VDV453

Aus den Erfahrungen des Projektes RUDY ist die Definition eines Dienstes zum Austausch der ÖPNV-Geodaten zu empfehlen. Durch die offene Architektur der Schnittstelle können weitere ÖPNV-Komponenten angeschlossen werden. Planungstools könnten somit beispielsweise auch die aktuelle Lage von Haltestelle und Haltepunkten importieren.

Zur qualitativen Verbesserung der Fahrgastinformation wäre die Realisierung einer Auskunft über die aktuelle Lage der Haltestelle ebenfalls hilfreich. Im Rahmen der Störfallszenarien wurden im Bereich von Ulm/Neu-Ulm diverse Großbaustellen durchfahren. Die Lage der Haltepunkte variierte dort regelmäßig in den im Wochenrhythmus unternommenen Testfahrten. Die Argumentation, dass die Haltestellen ja nur nahräumig verlegt werden und ohnehin vor Ort mit entsprechenden Informationen auf die Verlegung hingewiesen wird, liegt durchaus nahe. Die Information über die Verlegung der Haltestellen dem Kunden bereits vor Fahrtantritt mitteilen zu können, ist ein anzustrebender Service. Eine Integration des Geodaten austausches auf der Basis der in der VDV453 und VDV454 zugrunde liegenden Kommunikationsdienste ist zu empfehlen. Die Berücksichtigung der im OGC gegebenen Modellierung von Geodaten erscheint ratsam, um ohne zusätzlichen Konvertierungsaufwand OGC-konforme Werkzeuge nutzen zu können. Eine Abbildung der im Projekt RUDY entwickelten XML-Schnittstelle wurde bereits in eine GML-konforme Struktur überführt.

8.2.4 Ausbau des Bordrechners

In der prototypischen Umsetzung der Geodaten-gestützten Positionsbestimmung wurde im Kontext des Projektes RUDY die Komponente der Positionsbestimmung eines Navigationssystems verwendet. Dieser Systemaufbau war wegen der Positionsbestimmungsmethode und der Bereitstellung einer adäquaten und konfigurierbaren Bedienungs Oberfläche sowie der Zielführungsfunktionalität gewählt worden. Eine wirtschaftliche Umsetzung dieses Ansatzes ist jedoch in Frage zu stellen, da dieser Ansatz eine Doppelung von Hardware-Komponenten beinhaltet.

Am Markt sind jedoch Entwicklungen im Bereich der Navigationssysteme im Gange, die eine wirtschaftliche Funktionserweiterung gegebenenfalls erleichtern. Neben den klassischen Onboard-Navigationssystemen werden sogenannte Offboard-Navigationssysteme angeboten, die auf der Basis eines Mobil-Telefons Zielführungsfunktionalitäten anbieten. Die Positionsbestimmung dieser Systeme mag durchaus nicht die Qualität der derzeit marktführenden Technik der Onboard-Navigationssysteme aufweisen. Hier könnten aber zur Optimierung spezifische Positionsbestimmungsfiler und falls notwendig Sensorik ergänzt werden. In der Automobilindustrie existieren entsprechende Konzepte, einzelne Komponenten in leistungsfähige Bordrechner zu integrieren. Dieser Ansatz geht jedoch von der Anwendung von Softwarekomponenten aus, die sich ggf. in die existierenden Bordrechner einer modernen Fahrzeugausstattung integrieren lassen. Eine offene Systemarchitektur, die die Integration von Software-, Hardware- und Informationskomponenten in die Bordrechner leicht ermöglicht, ist eine Vision, in der Komponenten, die für die Off-board Navigation entwickelt wurden, wirtschaftlich integrierbar sind. Die Nutzung von Geodaten-gestützter Positionsbestimmung und Zielführungsfunktionalität im RBL wäre somit möglich.

Literatur

- Albert, H. (1999):** *Der aufgeklärte Fahrgast: Dynamische Leit- und Informationssysteme für den Hamburger ÖPNV*, Teil 1. Nahverkehrspraxis 47, Nr. 10, S. 4-8.
- Aussems, Thomas (1999):** *Positionsschätzung von Landfahrzeugen mittels Kalman-Filterung aus Satelliten- und Koppelnavigationsbeobachtungen.*, Veröffentlichungen des Geodätischen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 55.
- ArMont (2004):** <http://www.rheinahrcampus.de/armont/> (Abgerufen September 2004)
- Bauer, Manfred (2003):** *Vermessung und Ortung mit Satelliten*, Karlsruhe: Wichmann.
- Bettermann, Roland (1998):** *Accuracy and Quality Criteria in the Benchmark Test Task Force European Digital Road Map.* Symposium on Geodesy for geotechnical and Structural Engineering, 1998, Eisenstadt bei Wien.
- Bettermann, Roland (2001):** *Digital Rail -Track Map for Train Positioning*, The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo, 3-5.Jan. 2001.
- Bettermann, Roland und Thilo Kaufmann (2002):** *Potenzialabschätzung der Qualitätssteigerung von RBL-Funktionen durch Georeferenzierung.* Meilenstein-Bericht zum AP 210 des Projekt RUDY. Stuttgart (unveröffentlicht).
- Bettermann, Roland (2004):** *Entwicklungsperspektive für Geodaten im ÖPNV. Beispiele aus dem Projekt RUDY;* in: Geoinformation und Mobilität- von der Forschung zur praktischen Anwendung, Beiträge zu den Münsteraner GI-Tagen 2004, Hrsg.: M. Raubal, A. Sliwinski, W. Kuhn, Schriftenreihe des Instituts für Geoinformatik, Universität Münster.
- Bill, Ralf, Marco L. Zehner (2001):** *Lexikon der Geoinformatik*, Heidelberg: Wichmann 2001 (Siehe auch aktualisierte Version in Internet <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/lexikon.asp>)
- BLIC (1999):** Konzeption für die Integration von Rechnergestützten Betriebsleitsystemen (RBL) in Ballungsräumen. Schlussbericht FOPS: Integration von RBL-Systemen.
- BLIC (2001):** *Strategie für eine Verkehrsmittelübergreifende Fahrgastlenkung im ÖPNV mit Hilfe vernetzter dynamischer Fahrgastinformation im Ballungsräumen“*, Schlussbericht FOPS: Fahrgastlenkung, FE-Nr. 70.558/98.
- Bracher, Tilman, Volker Eichmann, Gerd Kühn und Michael Lehmbrock (2004):** *ÖPNV im Wettbewerb*, Difu-Beiträge zur Stadtforschung Bd. 39, , Berlin: Deutsches Institut für Urbanistik 2004.
(<http://www.difu.de/extranet/vortraege/03-bracher-oepnvwettbewerb.pdf>)
- Busch, Fritz, Stefanie Dietsch, Peter Kirchoff (2004):** *Besserer Busverkehr auf dem Land*, in: Internationales Verkehrswesen, Heft 5, 2004, S. 220-223.
- Carls (2002):** *Automatische Routenführung für den Buseinsatz mit einem Navigationssystem, NAV881*, Produktinformation der Firma elektronik-labors CARLS GmbH & Co. KG, Internet www.el-calrs.de, (Abgerufen August 2004).
- Chen, Hainan (2004):** *Ermittlung des Fahrweges zur Berechnung von Reisezeiten im bedarfsgesteuerten Verkehr*, Studienarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Stuttgart (Unveröffentlicht).
- Czommer, Renate (2001):** *Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken*, Dissertation, Universität Stuttgart, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, DGK Reihe C, Nr. 535.
- DDS (2005):** www.dds.ptv.de/html/geoframe.html, Webseite der Firma DDS, abgerufen Oktober 2005.
- Derse, Dr. K.-H. (1999):** Optimierung des ÖV-Betriebs durch Vernetzung von EDV-, Leit- und Informationssystemen des ÖV, in: Tagungsband zur HEUREKA '99, Köln: FGSV-Verlag, 1999.
- DING (2003):** *Verkehrslinienplan Stadtverkehr Ulm/ Neu Ulm*, Copyright bei Donau-Iller-Nahverkehrsverbund GmbH, Ulm.
- Dobeschinsky, Dr. Harry, Stefan Tritschler (2003):** *Analyse der Störfälle und deren Bewältigung bei den Stadtwerken Ulm/Neu-Ulm Verkehr*, projektinterner Bericht RUDY, Institut für Eisenbahn und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, 2003.

- DoT (2003):** *Best Practices for Using Geographic Data in Transit: A Location Referencing Guidebook*, Federal Transit Administration US Department of Transportation Washington, DC 20590 Report Number: FTA-NJ-26-7044-2003.1.
- Eurocontrol (2004):** *WGS84 world geodetic system 1984*, www.wgs84.com ,(Abgerufen August 2004).
- Evers H./ Kasties, G. (1999):** *Kompendium der Verkehrstelematik*, Köln: TÜV Verlag.
- Friedrich, Markus , Helmut Prungel (2000):** *open.P offene Datenbank für Verkehrsbetriebe und Verkehrsverbände*, In: Verkehr und Technik 2000, Heft 10, S. 447-452. (siehe auch www.openp.de).
- Gerding, Guido, Eva Klien, Michael Lutz, Jörn Möltgen, Joachim Scheiner, Carsten Schürmann, Björn Schwarze, Klaus Spiekermann (2003):** *Entwicklung eines integrativen Analyse- und Informationssystems für die Verkehrsplanung*, Dortmund: Berichte aus dem Institut für Raumplanung, Universität Dortmund, Nr. 57.
- GEVAS (2005):** www.gevas.de, Webseite der Firma GEVAS, abgerufen Oktober 2005.
- Gläser, Andreas, Ralf Schollmeyer (2003):** *Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeugen*. DGON-Symposium, TRANSPONDER 2003, Hannover, 2003.
- Gubler, Rüdiger und Jens Scheffler (2002):** *Geographische Informationssysteme unverzichtbar für die Disposition*. In: Der Nahverkehr 5/2002, S.59-62.
- Gründig, Lothar (2001):** *Lineare Objekte*. Schriftenreihe des DVW Band 40, Stuttgart: Wittwer.
- Heister H., L. Koppers, S. Musäus, O. Plan, W. Reinhardt (2000):** *ALOIS – Ein integriertes Lokortungs- und Informationssystem*, S. 329-333 In: Schnädelbach, K. ; Schilcher, M. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2000* (Beiträge XIII. International Course on Engineering Surveying). Stuttgart: Wittwer.
- Henninger Tobias, Torsten Heine-Nims, Stephan Schnittger, Roland Bettermann (2003):** *RUDY- Regionale unternehmensübergreifende und dynamische Vernetzung von Auskunfts-, Betriebsleit- und Planungssystemen im ÖPNV und Taxigewerbe*, CD-ROM Tagungsband der 19. Verkehrswissenschaftlichen Tage, Technische Universität Dresden, 2003.
- Hock, Christian J. L. (1999):** *Wissensbasierte Fahrzeugführung mit Landmarken für autonome Roboter*, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.
- Högerl, Norbert (2004):** *APOS -Austrian Positioning Service- Echtzeitpositionierung mit Satelliten*, In: J.Strobl, T.Blaschke, G. Griesebner (Hrsg.): „Angewandte Geoinformatik 2004“, Beiträge zum AGIT-Symposium, Salzburg 2004, S. 249- 254, Heidelberg: Wichmann.
- Hummelsheim, Klaus (2003):** *ISO Change Request*, EC- Project AGORA from Program Information Society Technologies , Project Number IST-20457, Deliverable D6.4, Public Version, Brussels.
- ISO 14825 (2002):** *Geographic Data Files Version 4.0 (GDF)*, ISO / TC 2004/ WG 3.
- Kaufmann, Thilo, Roland Bettermann (2004):** *Verbesserungspotenzial der ÖPNV-Steuerung durch Verwendung von Geodaten – dargestellt am Beispiel Monitorsystem –*,in: Andreas Kagermeier (Hrsg.) *Verkehrssystem- und Mobilitätsmanagement im ländlichen Raum*. Mannheim, 2004.
- Kieslich, Wolfgang (2000):** *Betriebsleitsystem im ÖPNV des ländlichen Raumes*. München: Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung der Technischen Universität München; 10.
- Kieslich, Wolfgang (2004):** *Steuerung flexibler Betriebsweisen*, Vortrag am 7. September 2004; FIV Symposium, Darmstadt, Zentrum für integrierte Verkehrssysteme, Abgerufen September 2005, www.ziv.de/download/fiv8/FIV8_2004_KIESLICH.ppt.
- Kroh, Ralph A. (1996):** *ÖPNVG Baden-Württemberg Gesetz über die Planung, Organisation und Gestaltung des öffentlichen Personennahverkehrs: Kommentar*, Stuttgart: Kohlhammer.
- Kolbe, Thomas H. (2002):** *Fußgängernavigation und Routenplanung in Innenstädten und Gebäuden mit Videos und Panoramen*, in: Beiträge zu den Münsteraner GI-Tagen 2002, Hrsg. J. Mölten und A. Wytzisk, Schriftenreihe des Instituts für Geoinformatik, S. 337-356, Universität Münster.

- Littmann, Reinhard (2002):** *BMBF startet Forschungsinitiative Personennahverkehr für die Region*, In: Verkehr und Technik, 2002, Heft 5.
- Löwenau, Jan, Klaus Hummelsheim, Hocine Bendafi, Volker Entenmann, Jérôme Marquet, Franscesco Lilli, Hans Sabel, Final enhanced Map Database requirements (2002)**, EC- Project NextMap from Programm Information Society Technologies , Project Number Ist-11206, Deliverable D2.2, Public Version.
- Mackalek, Peter (1999):** *GPS im ÖPNV: Ortung aus dem All*. Nahverkehrspraxis 47, Nr. 1-2, S. 4-8.
- Maier, Stephanie (2003):** *Erfassung, Aufbereitung und Dokumentation von Objekten im Straßenraum mit DGPS und reflektorloser Entfernungsmessung*, Studienarbeit an der Universität Stuttgart, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, unveröffentlicht.
- Mansfeld, Werner (2004):** *Satellitenortung und Navigation*, Braunschweig: Vieweg.
- Mehlert, Christian (2001):** *Die Einführung des Anrufbus im ÖPNV*, Praxiserfahrungen und Handlungsempfehlungen, Bielefeld: Erich Schmidt.
- Möhlenbrink, Wolfgang (1992):** *Further Strategy, Outlook*, International Workshop: European Digital Road Map, 2nd – 3rd March 1992.
- Möhlenbrink, Wolfgang, Gerd Möhrke, Peter Boese (1997):** Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Position wenigstens einer Stelle eines spurgeführten Fahrzeugs, Patentschrift DE 19532104 C1, Deutsches Patentamt.
- Möhlenbrink, Wolfgang (1996):** *Ausgewählte Beispiele zur Krümmungsanalyse für Ingenieurgeodäsie und Fahrzeugnavigation*, Universität Stuttgart, Schriftenreihe der Institute des Fachbereichs Vermessungswesen, Festschrift für Klaus Linkwitz, Nr. 1996.1.
- NTCIP (2002):** Standard on Common Public Transportation (CPT) Objects, October 2002, document 1401, <http://www.ntcip.org>, (abgerufen August 2004).
- Nicolai, Reol (2003):** *Topic 2: Spatial referencing by coordinates*, Version: 2.0.0 vom 16. Okt. 2003, Reference number of this OpenGIS® project document: OGC 03-073r1, www.ocg.org, (abgerufen August 2004).
- OGC (2005):** Open GIS Consortium, www.geospatial.de, abgerufen Oktober 2005.
- OKSTRA (2004):** Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen Schema Straßennetz, www.OKSTRA.de, Version 1.005 vom 29.6.2004.
- ÖPNVG (1997):** *Gesetz über die Planung, Organisation und Gestaltung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNVG)*, Vom 8. Juni 1995 [GBl. S. 417], §§ 2, 7 und 10 geändert durch Artikel 37 der 5. Anpassungsverordnung vom 17. Juni 1997 [GBl. S. 278, 282], Land Baden-Württemberg.
- PBefG (2002):** *Personenbeförderungsgesetz (PbefG)*, in der Fassung vom 8.8.1990, zuletzt geändert 21.8.2002, Deutschland.
- PBefZuVO (1996):** *Verordnung der Landesregierung und des Ministeriums für Umwelt und Verkehr über personenbeförderungsrechtliche Zuständigkeiten*, Baden-Württemberg, vom 15. Januar 1996, verkündet am 9. Februar 1996; GBl. S. 75
- Petzoldt, Rainer (1995):** *Calibration of a Strapdown INS by Measurements in 24 faces*; in: High Precision Navigation 95; Proceedings of the 3rd Int. Workshop on High Precision Navigation; Apr. 1995; Stuttgart; Bonn: Dümmler.
- PTV (2005):** www.ptv.de, Web-Seite der Firma PTV, abgerufen Oktober 2005.
- Reupke, Hartmut (1998):** *GPS im ÖPNV – Ein Vorhaben der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)*. In: Tagungsband des 1. SAPOS-Symposiums am 11. und 12. Mai 1998 in Hamburg. S. 105-108.
- Reupke, Hartmut (2001):** *Das RBL neu erfunden? Die neue Anwendung bei der BVG*, Verkehr und Technik 2001 Heft 12, Seiten 499- 508.
- RUDY (2005):** *Regionale unternehmensübergreifende und dynamische Vernetzung von Auskunfts-, Betriebsleit- und Planungssystemen im ÖPNV und Taxigewerbe*, Projekt-Web-Seite, www.rudyulm.de, abgerufen Oktober 2005.
- Schnell, G.: (1991):** *Sensoren in der Automatisierungstechnik*. 2. Auflage, Vieweg

- Schollmeyer, Ralf (2003):** *Modulares Messwerterfassungskonzept am Beispiel einer bordautonomen Gleisvermessung*. In: Virtuelle Instrumente in der Praxis – Begleitband zum National Instruments Kongress VIP 2003, Heidelberg/München : Huething Verlag.
- Schollmeyer, Ralf, Katrin Ramm, Thomas Wiltshko, Roland Bettermann (2004):** *Autonomous map-based vehicle positioning for public transport priority*, In: Proceedings of the International Symposium „Networks for Mobility“, University of Stuttgart, FOVUS, Stuttgart, 2004.
- Schwandner, Georg (2001):** Das MOBILE-RBL der Verkehrs AG Nürnberg, In: Verkehr und Technik 2001, Heft 9, S. 379-382.
- Schwarze, Björn , Ahmed Talaat (2004):** *The Dortmund Network Module- Ein GIS Modul zur Abbildung mult-modaler und temporaler Verkehrsnetze*, In: J.Strobl, T.Blaschke, G. Griesebner (Hrsg.): „Angewandte Geoinformatik 2004“, Beiträge zum AGIT-Symposium, Salzburg 2004. Heidelberg: Wichmann.
- Stark, Martin (2001):** *Informationsanforderung an die Intermodale Routensuche zur Verknüpfung der Verkehrsnetze*, DGON Jahreshauptversammlung 2001, Mobilität und Sicherheit, Wolfsburg, 2001. S.116-125.
- Stark, Martin, Volker Torlach (2003):** *Realisierungsaufwand zur Herstellung einer Geodatenbasis für die intermodale Routenberechnung zwischen Individual- und öffentlichem Verkehr*, In: J.Strobl, T.Blaschke, G. Griesebner (Hrsg.): „Angewandte Geographische Informations-verarbeitung XV“, Beiträge zum AGIT-Symposium, Salzburg, 2003. Heidelberg: Wichmann.
- Transmodel (2001):** *Transmodel, Reference Data Model for Public Transport*, www.transmodel.org, (Abger. August 2004).
- Tritschler, Stefan, Harry Dobeschinsky (2004):** *Spezifikation GeoRBL*, projektinterner Bericht RUDY, Institut für Eisenbahn und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, 2004.
- Tritschler, Stefan, Yong Cui, Harry Dobeschinsky (2005):** *Störfallmanagement im ÖPNV*, In: Der Nahverkehr 10,2005.
- Van Essen, Rob (2002):** *ISO-GDF The Geographic World Standard for ITS*, Internet 8/2004, http://roadmap.teleatlas.com/ROADMAP_Pres_Rve_GDF_5_Sep_2002.pdf
- VDV (1996)** *ÖPNV-Datenmodell Version 4.1. Teile A,B,C*, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) Hrsg.,
- VDV (1999/1):** *ÖPNV Datenmodell –Version 5-*, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen., VDV-Schrift 452, Köln.
- VDV (1999/2):** *Grundsätzliche Anforderungen an Automatisierungs- und Leitsysteme*, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen., VDV-Schrift 452, Köln.
- VDV (2001):** *Telematik im ÖPNV in Deutschland*, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, VDV Förderkreis, Alba-Verlag.
- VDV (2003/1):** *Integrationsschnittstelle Rechnergestützter Betriebsleitsysteme*, Version 2.1, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) Hrsg., VDV-Schrift 453 7/03, Köln.
- VDV (2003/2):** *Integrationsschnittstelle Rechnergestützter Betriebsleitsysteme*, Version 2.1, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) Hrsg., VDV-Schrift 454 7/03, Köln.
- Von Lom, Otto (1998):** *Spitzenaktualität der Geodaten*, S. 49-55, In: Kohlscheen (Hrsg.), Auf dem Weg zu einheitlichen Geodaten des Amtlichen Vermessungswesens, 4. Adv-Symposium ATKIS, LVA BW, Stuttgart.
- Waldschock, Robert (2001):** *Neues Rechnergestütztes Betriebsleitsystem*, Nahverkehrspraxis 2001, Nr. 12, S. 4-7.
- Weber, Stefan (2002):** *Zugautonome Ortung mit Map Matching Verfahren*. Diplomarbeit an der Universität Stuttgart, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, unveröffentlicht.
- Wiltshko, Thomas, Wolfgang Möhlenbrink (2005):** *Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeugen mit Map-Matching-Technologie*, ZEVrail Glasers Annalen 129 (S. 268-275).
- Winter, J. (2000):** *Zugortungskonzepte*, S. 221-227 In: Schnädelbach, K.; Schilcher, M. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2000 (Beiträge XIII. International Course on Engineering Surveying). Stuttgart: Wittwer.
- Wörner, Ralf (2000):** *Aufbau einer Test - Datenbasis für informationsgestützte Ortung im Schienenverkehr*, Diplomarbeit an der Universität Stuttgart, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, unveröffentlicht.

Anlage Datenstrukturen im GeoRBL

Vorzugsstraßennetz

Spaltenname	Datentyp	Beschreibung
Shape		Geometrie
RoadID	int(10)	Kennziffer des Straßenelements
Forward	int(5)	Kennziffer des Haltepunktes
Backward	int(5)	Kennziffer des Haltepunktes aus Quelle RBL
Manoever	Char(80)	Liste der RoadID durch „," getrennt, die nicht von diesem Straßenelement aus befahren werden dürfen.

Relevante Attribute der Objektklasse Straßennetz

Spaltenname	Datentyp	Beschreibung
Shape		Geometrie
Laenge	decimal(8,6)	Länge im WGS 84 KBS
Breite	decimal(8,6)	Breite im WGS 84 KBS
KreuzID	int(10)	Kennziffer der Kreuzung

Objektklasse Kreuzungen

Haltestellen

Die Objektklassen Haltestellen und Haltepunkte werden als Punktdaten modelliert.

Spaltenname	Datentyp	Beschreibung
HsNr	int(10)	Nummer der Haltestelle Quelle: DB: Siemens Tab: Haltestelle Sp: HsNr
NameWithPlace	Char(80)	Haltestellen-Name mit vorangestellten Namen des Ortes, in dem die Haltestelle liegt Quelle: DB: xml_data2 Tab: Stop Sp: NameWithPlace
HsAbk	Char(8)	Abkürzung des Haltestellennamens Quelle: DB: Siemens Tab: Haltestelle Sp: HsAbk
HsNam	char(42)	Haltestellenname Quelle: DB: Siemens Tab: Haltestelle Sp: HsNam
Haltepunkte	char(80)	Liste der Haltepunkt-Kennziffern, die zu dieser Haltestelle gehören
Laenge	double	Laenge in WGS 84
Breite	double	Breite in WGS 84

Attribute der Objektklasse Haltestellen

Spaltenname	Datentyp	Beschreibung
HsNr	int(10)	Kennziffer der Haltestelle
HpNr	int(5)	Kennziffer des Haltepunktes
HpIdx	int(10)	Kennziffer des Haltepunktes aus Quelle RBL
HSName	char(42)	Haltestellenname
HpZusInfo	char(42)	Zusätzliche Information zum Haltepunkt. Bezeichnet entweder <ul style="list-style-type: none"> > Name des Haltepunktes oder > Richtungsangabe durch die Kurzbezeichnung der nächsten Haltestelle > Richtungsangabe durch Endhaltestelle Quelle: DB: Siemens Tab: Haltestelle Sp: HsNam
Linien	char(80)	Linien, die diesen Haltepunkt bedienen Auflistung der betroffenen Liniennummern durch Semikolon getrennt
Betreiber	char(160)	Betreiber, die diesen Haltepunkt bedienen Auflistung der betroffenen Kursnummern durch Semikolon getrennt
Azimet*	Double	Abfahrtrichtung an dem Haltepunkt in Grad
X	Double	Länge in WGS 84
Y	Double	Breite in WGS 84
NichtBedient	int(1)	Kennzeichnet eine nichtbediente Haltestelle im Rahmen einer Umwegplanung

Attribute der Objektklasse Haltepunkte

Teilstrecken

Spaltenname	Datentyp	Beschreibung
Id	decimal(8,0)	Kennung der Teilstrecke
OrigStopId	decimal(8,0)	Start-Haltestellen-Nummer
OrigStopPoint	char(5)	Start-Steig oder "" wenn kein Steig
OrigHpIdx	decimal(8,0)	Starthaltestellen Nummer aus RBL
DestStopId	decimal(8,0)	Ziel-Haltestellen-Nummer
DestStopPoint	char(5)	Ziel-Steig oder "" wenn kein Steig
DestStopIdx	decimal(8,0)	
_branchId	char(5)	Betriebszweignummer oder DIVA-Liniennummer
_branchName	char(80)	Betriebszweigname oder EFA-Liniennummer
ValidFrom	datetime	Beginn des Gültigkeitszeitraums
ValidTo	datetime	Ende des Gültigkeitszeitraums

Attribute der Objektklasse Teilstrecke

Spaltenname	Datentyp	Beschreibung
Id	decimal(8,0)	Kennung der Teilstrecke
Seq	Integer(5)	Sequenz der Koordinaten
Laenge	decimal(8,6)	Start-Haltestellen-Nummer
Breite	decimal(8,6)	Start-Steig oder "" wenn kein Steig
Punkttyp	Integer(1)	
KreuzId	decimal(8,0)	Kennung der Kreuzung

Geometrie der Objektgruppe Teilstrecken

Für das Attribut Punkttyp existiert folgender Wertebereich

1	Kreuzung
2	Konturpunkt
3	Haltepunkt
7	Wegpunkt

Attribute der Objektgruppe Teilstrecke

Lebenslauf

Name Roland Bettermann
Geburtsdatum 28. November 1964
Geburtsort Riedheim, jetzt Hilzingen
Familienstand verheiratet, 3 Kinder

Ausbildung

1971 - 1975 Johann-Peter-Hebel Grundschule, Singen
1975 - 1984 Friedrich-Wöhler-Gymnasium, Singen
Abschluss: Abitur
1984 - 1989 Universität Stuttgart, Fachbereich Vermessungswesen
Abschluss: Dipl.-Ing. Vermessungswesen

Zivildienst

1. 03 1990 - 31. 03 1991 Diakonisches Werk der EKD-Hauptgeschäftsstelle

Beruflicher Werdegang

16.10.1989 - 28.02.1990 Wissenschaftlicher Angestellter
Universität Stuttgart, Institut für Anwendungen
der Geodäsie im Bauwesen
22. Juli 1991 - 31.12.1992 Daimler-Benz AG, Forschungsinstitut F1,
Abt. Verkehrstechnik
1.01.1993 - 30.04.1993 INPHO GmbH Stuttgart
Bearbeitung eines Auftrages der
Daimler-Benz AG
1.05.1993 - 30.09.1994 Daimler-Benz AG, Forschungsinstitut F1,
Abt. Verkehrstechnik
1.10.1994 - 29.11.1996 Referendarausbildung für den höheren vermessungs-
technischen Verwaltungsdienst
30.11.1996 - 15.03.1997 Vermessungsamt Tuttlingen
16.03.1997 - 30.09.1998 Wissenschaftlicher Angestellter
Universität Stuttgart, Institut für Anwendungen
der Geodäsie im Bauwesen
1.10.1998 - 30.09.2004 Wissenschaftlicher Assistent
Universität Stuttgart, Institut für Anwendungen
der Geodäsie im Bauwesen
Ab 1.10.2004 Landesstelle für Straßentechnik, Baden-Württemberg;
(jetzt Regierungspräsidium Tübingen)

Danke!

Einen herzlichen Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Möhlenbrink für die hilfreichen Gespräche bei der Fertigung dieser Arbeit und den zahlreichen vorbereitenden Projekten. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ullrich Martin für Übernahme des Mitberichtes bedanken.

Vielen Dank allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen für die Unterstützung bei den durchgeführten Projekten, die teilweise in die Fertigung dieser Arbeit einfließen. Dank an die Studentinnen und Studenten, die hilfreiche Puzzesteine für diese Arbeit geliefert haben.

Herzlichen Dank an meine Frau und meine Familie, die mir mit ihrer Unterstützung sehr geholfen haben, diese Arbeit abzuschließen.