

Master Thesis

im Rahmen des

Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“

(UNIGIS MSc.) am Interfakultären Fachbereich für Geoinformatik (Z_GIS)

der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

Die Zeit in Geoinformationssystemen

Stellenwert der Geoinformatik in der Car2X-Technologie und der

Auswertung raum-zeitlicher Big-Data-Bestände

vorgelegt von

Marcus Schink, BSc. der Geoinformatik und Vermessung

103224, UNIGIS MSc. Jahrgang 2013

Zur Erlangung des Grades

„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:

Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Windesheim, den 23.12.2015

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis	IV
Codeverzeichnis.....	IV
Formelverzeichnis.....	IV
Eigenständigkeitserklärung.....	V
Kurzfassung	VI
Abstract.....	VII
Vorwort.....	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen	4
1.3 Lösungsansatz.....	6
1.4 Einordnung und Abgrenzung des Themas	6
1.5 Struktur und Aufbau	8
2 Grundlagen und Definitionen.....	10
2.1 Raum-Zeit-Integration in Geoinformationssystemen	11
2.1.1 Snapshots und der erhöhte Bedarf an Speicherplatz.....	13
2.1.2 Zeitliches Schema nach DIN EN ISO 19108.....	16
2.1.3 Gegenwart, Vergangenheit und Zukunft.....	17
2.1.4 Raum-zeitliche Modellierung bewegter Objekte	18
2.1.5 Bewegte Objekte nach DIN EN ISO 19141 und OGC Moving Features	24
2.2 Grundlagen der Verkehrsplanung und Verkehrsprognose.....	29
2.2.1 Erfassungsmethoden von Verkehrsdaten	29
2.2.2 Verkehrsmodellierung.....	33
3 Anwendung raum-zeitlicher Daten in der Verkehrsforschung.....	37
3.1 Dynamische Datenbestände der Verkehrsflussmodellierung.....	38
3.2 Zeitliche Datentypen.....	40
3.3 Zeitliche Operatoren	43
3.3.1 Relative Position zweier TM_Primitive.....	45

3.3.2	Zeitlicher Abstand und zeitliche Länge nach DIN EN ISO 19108	50
3.4	Referenzsysteme	51
3.4.1	Räumliche Referenzsysteme in der Verkehrsforschung	51
3.4.2	Zeitliche Referenzsysteme in der Verkehrsforschung	52
3.5	Topologie zeitlicher Objekte.....	55
4	Konzeptionierung.....	56
4.1	Datenerfassung.....	61
4.1.1	Auswahl geeigneter Erfassungsmethoden.....	61
4.1.2	Raum-zeitliche Bezugssystem	66
4.1.3	Selektive Datenerfassung.....	69
4.2	Datenspeicherung.....	73
5	Datenmodellierung und Datenanalyse.....	76
5.1	Operatoren zur Analyse bewegter Objekte	77
5.2	Operatoren des Datenmodells MOST	79
5.3	Beispielabfragen	81
5.3.1	Analyse bewegter Objekte in Vergangenheit und Gegenwart	81
5.3.2	Analyse raum-zeitlicher Objekte in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft....	85
6	Diskussion	88
6.1	Beantwortung der Forschungsfragen	89
6.2	Optimierungen und Potentiale	92
6.2.1	Berücksichtigung des Straßennetzes	93
6.2.2	Potentielle Fehlerquellen.....	94
6.3	Weitere Schritte und Ausblick	95
7	Literaturverzeichnis.....	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Snapshots zur Darstellung raum-zeitlicher Daten. (Peuquet und Duan, 1995).....	13
Abbildung 2: Event-based SpatioTemporal Data Model (ESTDM) (Peuquet und Duan, 1995).....	14
Abbildung 3: Zeitliches Raster zur Darstellung raum-zeitlicher Daten. (Langran, 1992).....	15
Abbildung 4: Bewegter Punkt im dreidimensionalen Raum (x,y,t).....	20
Abbildung 5: Darstellung von Bewegungsprofilen nach OGC Moving Features und DIN EN ISO 19141 (2009-12).....	25
Abbildung 6: Auszug der gesammelten Daten der Navigations-App Skobbler (Scout, 2015)...	31
Abbildung 7: Schema der Verkehrsflussmodellierung nach Treiber und Kesting (2010).....	34
Abbildung 8: Brutto-/Netto-Zeitlücken voreinander fahrender Fahrzeuge.....	35
Abbildung 9: Aggregation und Disaggregation mikroskopischer und makroskopischer Modelle nach Treiber und Kesting (2010 S.54).....	36
Abbildung 10: Relative Position eines Zeitpunktes A zu einem Zeitpunkt B	45
Abbildung 11: Relative Position einer Periode A zu einem Zeitpunkt B	46
Abbildung 12: Relative Position eines Zeitpunktes A zu einer Periode B.....	47
Abbildung 13: Relative Position einer Periode A zu einer Periode B	48
Abbildung 14: Untergliederung der Klasse TM_ReferenceSystem nach DIN EN ISO 19108 (2005-05).....	52
Abbildung 15: Auszug aus der API-Dokumentation des Scout-Dienstes. (Scout, 2015).....	54
Abbildung 16: Datenerfassung, Datenbestandteile und Weiterverarbeitung raum-zeitlicher Daten in der Verkehrsforschung	56
Abbildung 17: Konzeptionierung - Ablaufdiagramm	58
Abbildung 18: Raumzeitliche Daten des Straßenverkehrs.....	64
Abbildung 19: Klassen raumzeitlicher Daten im Straßenverkehr und ihre Erfassungsmethoden	65
Abbildung 20: Verortung eines Ereignisses im Bezugssystem nach Widmann (2001).....	66
Abbildung 21: Relative im Vergleich zu absoluter Positionsangabe.....	67
Abbildung 22: Ortungsergebnis eines Smartphones innerhalb eines Gebäudes mit Skobbler. ..	71
Abbildung 23: Fehlerquellen bei GPS-Ortung anhand eines Kartenausschnitts von OpenStreetMap - Kaiserstraße, Mainz (Lizenz: CC-BY-SA 2.0).....	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung einzelner Aspekte der Verkehrsflussdynamik und der Verkehrsplanung	33
Tabelle 2: Ereignisse und Bestandteile des Verkehrsgeschehens sortiert nach Datentypen.	42
Tabelle 3: Bedingungen und Rückgabewerte der relativen Position eines Zeitpunktes A zu einem Zeitpunkt B nach DIN EN ISO 19108 (2005-05).....	45
Tabelle 4: Bedingungen und Rückgabewerte der relativen Position einer Periode A zu einem Zeitpunkt B nach DIN EN ISO 19108 (2005-05).....	46
Tabelle 5: Bedingungen und Rückgabewerte der relativen Position eines Zeitpunktes A zu einer Periode B nach DIN EN ISO 19108 (2005-05).....	47
Tabelle 6: Bedingungen und Rückgabewerte der relativen Position einer Periode A zu einer Periode B nach DIN EN ISO 19108 (2005-05).....	49
Tabelle 7: Raum-zeitliche Operatoren nach Erwig et al. (1999)	77
Tabelle 8: Raum-zeitliche Operatoren nach Güting et al. (2000)	78
Tabelle 9: Raum-zeitliche Operatoren nach Sistla et al. (1997)	80

Codeverzeichnis

Code 1: XML-Ausschnitt mf:foliation nach OGC (2015b)	26
Code 2: XML-Auszug mf:sTBoundetBy nach OGC (2015b)	26
Code 3: XML-Ausschnitt mf:member nach OGC (2015b).....	27
Code 4: XML-Ausschnitt mf:header nach OGC (2015b)	27
Code 5: XML-Ausschnitt mf:header. Angabe der Bewegungsrichtung eines Verkehrsteilnehmers nach OGC (2015b).....	28

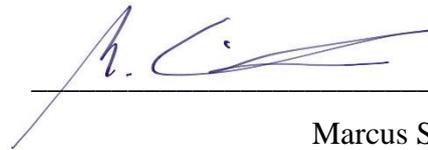
Formelverzeichnis

Formel 1: Bewegter Punkt $r(t)$ im dreidimensionalen Raum (x,y,t) nach Erwig et al. (1999)....	20
Formel 2: Bewegter Punkt $r(t)$ im vierdimensionalen Raum (x,y,z,t)	21
Formel 3: Operator mdistance nach Erwig et al. (1999).....	21
Formel 4: Operator trajectory nach Erwig et al. (1999).....	22
Formel 5: Fahrzeuglänge nach Treiber und Kesting (2010)	39
Formel 6: Brutto-Zeitlücken zwischen Fahrzeugen nach Treiber und Kesting (2010).....	39
Formel 7: Bruttoabstände nach Treiber und Kesting (2010)	39

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen ist. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Windesheim, den 23.12.2015



Marcus Schink

Kurzfassung

Die Car2X-Technologie bietet die Möglichkeit der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und ihrem Umfeld. Aufgrund der fortschreitenden Entwicklung autonom fahrender Fahrzeuge erhält diese Technik einen immer größeren Stellenwert. Zur frühzeitigen Erkennung von Gefahrensituationen kann die Auswertung von Bewegungsprofile in Echtzeit erfolgen, was die Generierung und Übermittlung von Warnungen an die beteiligten Verkehrsteilnehmer ermöglicht. Im Rahmen dieser Masterthesis werden Datenmodelle zur Behandlung raum-zeitlicher Big Data-Bestände und bewegter Objekte auf ihre Anwendbarkeit zur Ermittlung von Gefahrensituationen im Straßenverkehr untersucht. Dabei stehen Bewegungsprofile von Fußgänger, im Mittelpunkt der Untersuchung. Es werden im Wesentlichen die Fragen beantwortet, inwieweit die raum-zeitlichen Datenmodelle der vergangenen Jahre Einfluss auf die Entwicklung des 2015 eingeführten Standards *Open Geospatial Consortium (OGC) Moving Features* genommen haben und ob dieser Standard zur Erfüllung der benötigten Grundlagen der Car2X-Technologie geeignet ist. Die Untersuchung erfolgt auf Grundlage einer durchgeführten Literaturrecherche, die speziell auf die Untersuchung raum-zeitlicher Datenmodelle ausgerichtet ist. Im Anschluss findet die Vorstellung von Grundlagen und Definitionen aus dem Bereich der Verkehrsflussmodellierung statt. Nach der Einführung in diesen Themenbereich steht die nähere Betrachtung grundlegender raum-zeitlicher Datenmodelle bzw. von Datenmodellen zur Behandlung bewegter Objekte im Vordergrund der Untersuchung. Zur Untersuchung der Anwendbarkeit vorgestellter Datenmodelle erfolgt im Anschluss die Entwicklung entsprechender Beispielabfragen unter Anwendung der vorgestellten raum-zeitlichen Operatoren. Es ist zu erkennen, dass existierende Datenmodelle die Möglichkeit der Prognose bevorstehender Bewegungen ermöglichen, die zur Erkennung von Gefahrensituationen im Straßenverkehr und dementsprechend zur Warnung beteiligter Verkehrsteilnehmer anwendbar sind. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Geoinformatik einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Car2X Technologie leisten kann. Durch die Fortführung der Entwicklung raum-zeitlicher Datenmodelle und die Weiterentwicklung entsprechender Standards wird sich dieser Einfluss in den kommenden Jahren weiter verstärken.

Abstract

The Car2X technology offers the possibility of communication between vehicles and their periphery. In consequence of the progressive development of autonomous moving vehicles this technology takes on a more and more important role. For the early detection of dangerous situations movement profiles can be analyzed in real-time. This information can be used to transmit warnings to the concerned road users. As part of this master thesis data models for treatment of spatiotemporal big data stocks and moving objects are examined for their applicability to identify dangerous situations in traffic. The movement profiles of pedestrians are the focus of the investigation. One of the research questions is how the spatiotemporal data models influence the in 2015 introduced standard *Open Geospatial Consortium (OGC) Moving Features* and whether this standard is suitable to accomplish the required basics of Car2X technology. The investigation occurs on basis of a carried out literature search which is aimed especially on the investigation of space-temporal data models. Afterwards bases and definitions from the area of the traffic flow modelling are introduced. After an introduction to this topic the further consideration of basic spatiotemporal data models and data models for the treatment of moving objects is in the foreground of the investigation. To the investigation of the applicability of introduced data models the development of suitable example queries occurs in the connection under use of the introduced space-temporal operators. It can be seen that existing data models allow the possibility of forecasting impending movements that are applicable for the detection of dangerous situations in traffic and accordingly to warn involved road users. The carried out investigations show that the geoinformatics can make a contribution to the advancement of the Car2X to technology. By the continuation of the development of space-temporal data models and the advancement of suitable standards this influence will further increase during the coming years.

Vorwort

Da sich mein Studium an der Universität Salzburg dem Ende neigt, bietet sich für mich die Gelegenheit, einigen Personen für die Unterstützung während meiner gesamten Studienzeit zu danken.

Als ich im Jahr 2007 nach erfolgreichem Abitur das Bachelorstudium der Geoinformatik und Vermessung an der Fachhochschule Mainz begonnen hatte, wurde mir schnell bewusst, dass es die richtige Entscheidung war, Geoinformatik zu studieren. Nach meinem absolvierten Bachelorstudium konnte ich meinem Arbeitskollegen Kim Wolter während seines UNIGIS-Studiums immer wieder über die Schultern schauen und dabei erkennen, dass ich diesen Studiengang ebenfalls absolvieren möchte. Ich möchte mich daher für seine beratende Unterstützung vor und während meines Studiums herzlichst bedanken.

In diesem Zusammenhang danke ich auch meinem Arbeitgeber Herrn Alois Dhom, der mir während meiner Studienzeit stets mit Verständnis für spontane Urlaubsanträge gegenüber stand und auf dessen Unterstützung ich mich immerfort verlassen konnte.

Ebenfalls war auf die Unterstützung des gesamten UNIGIS-Teams stets verlass, wofür ich mich recht herzlich bedanke.

Aber auch in meinem privaten Umfeld musste ich während meines Studiums die eine oder andere Priorität setzen und dadurch Vereinsarbeit und Freizeit ab und an in den Hintergrund rücken. Ich bedanke mich daher bei meiner Familie und meinen Freunden, die mir bei jeglichen Höhen und Tiefen meines Studiums zur Seite standen.

Im Jahr 2008 verstarb während meines Bachelorstudiums meine Mutter. Auf ihren Rat und ihre Unterstützung konnte ich mich immer verlassen. Hierfür bin ich Dir auf ewig dankbar!

Ein besonderer Dank geht an meine Freundin Christina Weyrich. Für mein Studium habe ich viel Zeit investieren müssen, die wir beide hätten miteinander verbringen können. Dafür, dass Du mir dabei immer zur Seite gestanden hast, möchte ich mich ausdrücklich bei Dir bedanken!

Windesheim, 23. Dezember 2015

Marcus Schink

1 Einleitung

„Die Wissenschaft sucht, allgemeine Regeln aufzustellen, die den gegenseitigen Zusammenhang der Dinge und Ereignisse in Raum und Zeit bestimmen. Für diese Regeln beziehungsweise Naturgesetze wird allgemeine und ausnahmslose Gültigkeit gefordert – nicht bewiesen. Es ist zunächst nur ein Programm, und der Glaube in seine prinzipielle Durchführbarkeit ist nur durch Teilerfolge begründet. [...] Die Tatsache, dass wir aufgrund solcher Gesetze den zeitlichen Verlauf von Erscheinungen auf gewissen Gebieten mit großer Genauigkeit und Sicherheit vorherzusagen vermögen, sitzt tief im Bewusstsein des modernen Menschen, selbst wenn er vom Inhalt jener Gesetze sehr wenig erfasst hat.“

(Albert Einstein 1941)¹

1.1 Motivation

Im Juli 2015 waren etwa 46 Millionen Deutsche im Besitz eines Smartphones und diese Zahl steigt kontinuierlich weiter (Statista, 2015). Heute sind viele dieser Geräte, bedingt durch die stetig fortschreitende technische Entwicklung, mit GPS-Modulen ausgestattet und erlauben, sofern die entsprechenden Ortungsdienste auf dem Gerät aktiviert wurden, eine Positionsbestimmung mit Genauigkeiten besser als 10m (Goodchild, 2009).

Durch die erfassten Bewegungsprofile und der gesammelten Big Data bieten sich der Wissenschaft viele Möglichkeiten zur Auswertung und Analyse menschlicher Bewegungsverhaltens und ihres Sozialverhaltens (Kwan und Neutens, 2014; Kwan et al., 2014; Richardson et al., 2013). Ebenso eröffnen raum-zeitliche Echtzeitdaten, die mittels GPS gewonnen werden können, vielen Bereichen der Wissenschaft sowie der Wirtschaft neue Möglichkeiten der Datenanalyse (Richardson, 2013). Aber auch Privatanwender profitieren von unterschiedlichen Diensten, die auf Bestände raum-zeitlicher Daten zurückgreifen, wie beispielsweise Frühwarnsysteme bei Naturkatastrophen oder die Erforschung von Epidemien und Krankheitserregern (Keon et al., 2014; Rebolj und Sturm, 1999; Richardson, 2013; Richardson et al., 2013; Torrens, 2013; Wang, 2005).

¹ Einstein, Albert: *Aus meinen späten Jahren. Dt. Verl. Anstalt, Stuttgart 1979.*

Als erstes deutsches Flächenland führte Rheinland-Pfalz im Jahr 2015 die Smartphone-Applikation KATWARN ein, die Bürger vor bevorstehenden Katastrophen warnt. (Welt, 2015)

Dennoch verfügt diese Technik über Schattenseiten. So sind, aufgrund der Enthüllungen des ehemaligen US-Geheimdienstmitarbeiters Edward Snowden, viele Details aus den Überwachungsprogrammen der Geheimdienste bekanntgeworden. Die hierbei enthüllten Informationen über moderne Abhörmethoden der NSA zeigen, dass Smartphone-Nutzer jederzeit und unbemerkt ausspioniert werden können. (Focus-Online, 2015; Giga, 2015; Spiegel, 2015; Zeit, 2015)

Speziell die Erfassung von Bewegungsprofilen, ob anonym oder personenbezogen, gerät hierbei besonders in die Kritik und die Forderungen nach verschärften Datenschutzgesetzen werden lauter.

Diese Situation gibt den Anlass, sich im Rahmen dieser Masterthesis näher mit dem Nutzen und den Möglichkeiten der Auswertung von raum-zeitlichen Daten zu beschäftigen und den hierbei potenziellen Einfluss der Geoinformatik zu verdeutlichen. Ebenso soll auf diese Weise die Interdisziplinarität der Geoinformatik in den Vordergrund rücken. Nach Ehlers (2006) ist Geoinformatik als eigenständige Wissenschaft, die unabhängig von Geografie und Informatik agiert, zu betrachten. Daher ist es neben der Entwicklung neuer Analysemethoden und Datenmodellen ebenso die Aufgabe der Geoinformatik, der Bevölkerung die Vorteile dieser Wissenschaft, sowie die durch selbige gebotenen Erleichterungen in vielen Bereichen des täglichen Lebens aufzuzeigen und sie von diesen zu überzeugen.

Bedingt durch die hohe Dichte von Smartphone-Nutzern können anonym erfasste Bewegungsprofile zur Optimierung von Stauprognosen beitragen. Ebenso lassen sich durch die Auswertung von Bewegungsprofilen potenzielle Gefahrensituationen erkennen und entsprechende Warnungen generieren. Goodchild (2007) stellt in seiner Arbeit die Möglichkeiten vor, die sich durch ein flächendeckendes Sensornetzwerk ergeben, in welchem die Bürger selbst als Sensoren fungieren. Viele Hersteller von Navigationsgeräten bieten ihre

Navigationssoftware mittlerweile zusätzlich als App für Smartphones an. Die App ermöglicht den Anwendern Verkehrsinformationen in Echtzeit zu empfangen und diese direkt bei der Routenplanung zu berücksichtigen. Zu solchen Diensten zählt u.a. die App Skobbler, die durch das Sammeln von Bewegungsprofilen den Nutzern ihrer Navigationssoftware Verkehrsinformationen zur Verfügung stellt. (Scout, 2015)

Bisher basieren Verkehrsprognosen in der Regel auf Floating-Car-Daten. Hierbei erfolgt die Erfassung der Verkehrsdaten durch einige, speziell ausgestattete Fahrzeuge, die sogenannten Floating-Cars. (Fabritiis et al., 2008)

Die Modellierung des motorisierten Straßenverkehrs und die hierdurch ermöglichte Prognose der Verkehrsdichte und anderer Parameter ist seit vielen Jahren ein fester Bestandteil der Verkehrsforschung. Im Bereich der Verkehrsforschung stellt es zudem eine wichtige Aufgabe dar, die Bewegung von Fußgängern und anderen nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern zu modellieren. Dieser Bereich der Verkehrsmodellierung ist noch unzureichend erforscht und kann speziell bei der Planung von Großveranstaltungen und Marathonläufen Anwendung finden. (Treiber und Kesting, 2010)

Bewegungsprofile sind dynamische Daten. Daher ist eine Betrachtung eines solchen Datenbestands nur unter Berücksichtigung des Zeitfaktors möglich. Wie Objekte der realen Welt, befinden sich Geodaten in einem Raum-Zeit-Kontinuum und werden deshalb nicht nur durch ihre Lage, sondern auch durch den Zeitpunkt ihrer Existenz definiert. Der Beginn der Entwicklung von Geoinformationssystemen wurde durch technische Innovationen, wie die stetige Weiterentwicklung von Computersystemen oder der Datenerfassung, geprägt. Dabei haben einzelne Fachdisziplinen besonders starken Einfluss genommen. Während zu Anfang die Technologie im Mittelpunkt stand, rückte zum Ende des 20. Jahrhunderts zunehmend die Wissenschaft in den Fokus der Forschungsarbeiten. (Bartelme, 2005 S.1f; Lange, 2013 S.1f)

Die oftmals zeitlich statischen Informationen eines Geoinformationssystems ermöglichen lediglich den Blick auf eine Momentaufnahme der Situation, auch Snapshot genannt. Erst durch die Berücksichtigung der Zeit ist es möglich, Dynamiken und somit auch die zeitlichen Abläufe eines Datenbestandes nachzuvollziehen (Klopprogge und Lockemann,

1983). Durch die Integration von Zeitinformationen und der Erfassung von Geodaten in Echtzeit ergeben sich neue Methoden der Datenanalyse (Goodchild, 2009). Die Geoinformatik ist somit in der Lage, durch gezielte Analysen raum-zeitlicher Datenbestände und der Untersuchung räumlicher und zeitlicher Muster, Prognosen über die zu erwartende Entwicklung eines Datenbestandes zu erstellen.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Eine massenhafte und anonyme Sammlung von Bewegungsprofilen aller Smartphone-Nutzer ist durchaus umstritten und mit hohem Risiko in Bezug auf den nötigen Datenschutz verbunden. Jedoch können die dabei erfassten raum-zeitlichen Daten einen enormen Fortschritt im Bereich der Verkehrsmodellierung ermöglichen. Durch die Sammlung von Bewegungsdaten über einen längeren Zeitraum hinweg können mit den Mitteln der Geoinformatik detaillierte Verhaltensmuster von Verkehrsteilnehmern ermittelt werden. Das im Rahmen dieser Masterthesis entwickelte Konzept soll die Möglichkeit der Bildung eines flächendeckenden Sensornetzwerks aufzeigen, welches die Warnung von Fußgängern und Fahrzeugen vor bevorstehenden Gefahrensituationen ermöglicht. In dem vorgestellten fiktiven Fallbeispiel erfolgt die Erfassung der Bewegungsprofile von Fußgängern über die GPS-Sensoren der mitgeführten Smartphones. Das hier behandelte fiktive Fallbeispiel beruht auf der Annahme, dass alle Fußgänger über ein Smartphone mit aktivem GPS-Modul verfügen.

Die Forschungen der Geoinformatik im Bereich der Verwaltung raum-zeitlicher Daten und der Entwicklung entsprechender Datenmodelle bieten die nötigen Grundlagen, um sich an der Suche nach Modellierungsmöglichkeiten nichtmotorisiertem Verkehrs, wie Fußgängern und Fahrradfahrern, zu beteiligen.

Bis heute zielten Forschungsprojekten darauf ab, Konzepte zur Zeitintegration in Geoinformationssystemen zu erstellen und entsprechende Datenmodelle zu entwickeln. Trotz der hohen Zahl getroffener Erkenntnisse und zahlreicher Konzeptionen gelang es bis heute nicht, all diese Techniken in gängige Systeme zu integrieren (Broßheit et al., 2014). Goodchild (2013) zählt in diesem Zusammenhang sogar einige Argumente und Probleme

auf, die es in naher Zukunft weiter erschweren, werden ein reines raum-zeitliches GIS zu erzeugen.

Die Untersuchung unterschiedlicher Datenmodelle und Konzepte, welche für die Umsetzung und Optimierung von Verkehrssimulationen herangezogen werden können, bilden den Rahmen dieser Masterthesis. Hierbei erfolgen eine nähere Betrachtung der entwickelten Modelle sowie die Diskussion ihrer Tauglichkeit in Bezug auf den geschilderten Anwendungsfall. Durch die getroffenen Erkenntnisse soll der Einfluss der Geoinformatik auf die Entwicklung und Anwendung von Verkehrsmodellen aufgezeigt werden. Das hierbei erstellte Konzept und die hierzu verwendeten Datenmodelle dienen als Grundlage zur Entwicklung entsprechender Softwaresysteme und zeigen Behörden, sowie Softwareentwicklern den aktuellen Forschungsstand der Geoinformatik auf. Im Anschluss können die gestellten Forschungsfragen mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen und dem entwickelten Konzept, sowie der entwickelten Beispielabfragen beantwortet werden.

Besonders der Umgang mit bewegten Objekten steht hierbei im Fokus der Untersuchungen. Der hierzu verfasste abstrakte Standard DIN EN ISO 19141 (2009-12) dient als Grundlage für den 2015 neu eingeführten Standard des *Open Geospatial Consortium (OGC) Moving Features*, der sich aus den beiden Teilen OGC (2015a) und OGC (2015b) zusammensetzt. Durch die Untersuchung verschiedener Datenmodelle zur Behandlung bewegter Objekte erfolgt die Beantwortung der Frage, inwiefern diese Datenmodelle Einfluss auf den nun existierenden *OGC* Standard genommen haben. Genügt dieser Standard zur Behandlung aktueller Themenfelder der Verkehrsforschung?

Anschließend werden durch ein Konzept zur Erfassung, Verwaltung und Auswertung raum-zeitlicher Datenbestände bzw. von Bewegungsprofilen von Verkehrsteilnehmern die Anwendungsmöglichkeiten der behandelten Datenmodelle und des *OGC* Standards *Moving Features* untersucht. Genügen die Fähigkeiten existierender Datenmodelle den Ansprüchen des behandelten Konzepts und sind diese auf das beschriebene Fallbeispiel anwendbar? Hat die Geoinformatik dabei Einfluss auf weitere Forschungsergebnisse im Bereich des Verkehrswesens?

1.3 Lösungsansatz

Die Grundlage dieser Masterthesis bildet die Literaturrecherche. Im Fokus stehen besonders Verfahren und Methoden der Geoinformatik, die zur Analyse und Verwaltung raumzeitlicher Datenbestände herangezogen werden können. Parallel dazu findet eine Vorstellung grundlegender Begrifflichkeiten und Definitionen der Verkehrsforschung statt.

Nach der Erläuterung der Inhalte oben genannter Wissenschaften, erfolgt im nächsten Schritt eine Sammlung von Ansprüchen, die seitens der Verkehrsforschung gegenüber der Geoinformatik zu erwarten sind. Entsprechend dem Thema dieser Masterthesis wird dabei insbesondere Bezug auf raum-zeitliche Daten genommen. Die Suche nach Verbindungen zwischen den beiden Fachdisziplinen steht dabei stets im Vordergrund der Untersuchungen. Existierende raum-zeitliche Datenmodelle oder zuvor vorgestellte Konzepte im Umgang mit raum-zeitlichen Daten werden entsprechend dieser Anforderungen mit der Verkehrsforschung in Einklang gebracht.

Neben der Untersuchung der Anwendbarkeit raum-zeitlichen Datenmodellen, Operatoren, Datentypen sowie Referenzsystemen erfolgt zudem die Untersuchung ihrer Anwendbarkeit auf den Aufgabenbereichen der Verkehrsforschung.

Nach dieser grundlegenden Untersuchung beider Forschungsfelder, erfolgt im Anschluss anhand eines Fallbeispiels die Präsentation eines Konzepts zur Auswertung massenhaft gesammelter Bewegungsprofile von Smartphone-Nutzern. Dabei wird besonderen Wert auf die Analyse raum-zeitlicher Daten gelegt. Die zu Beginn vorgestellten Datenmodelle und Standards dienen dabei als Grundlage für Beispielabfragen rund um das Thema Straßenverkehr. Mittels dieser Beispielabfragen findet eine Überprüfung der Anwendbarkeit der zuvor behandelten raum-zeitlichen Operatoren statt.

1.4 Einordnung und Abgrenzung des Themas

Eine Prognose von Verkehrsstörungen bzw. die Vorhersage des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern kann nur durch Verwendung raum-zeitlicher Daten erfolgen. Bereits seit vielen Jahren wird in der Geoinformatik nach Möglichkeiten gesucht, die Zeit als

eigene Dimension in die Analyse räumlicher Daten einzubeziehen. Die in diesem Zusammenhang entwickelten Datenmodelle und Methoden wurden in den vergangenen Jahren nur bedingt in gängige Geoinformationssysteme integriert. (Broßheit et al., 2014)

Diese Masterthesis richtet sich im Speziellen an Personen mit Vorkenntnissen im Bereich der räumlichen Datenanalyse. Mittels der durchgeführten Untersuchungen werden die Potentiale raum-zeitlicher Datenmodelle diskutiert.

Ebenso gelten in dieser Masterthesis grundlegende Kenntnisse im Bereich der GPS-Ortung als Voraussetzung.

Außerdem zeigt diese Masterthesis auf, in wie weit die Möglichkeit besteht bereits bekannte Datenmodelle und Standards zur Verkehrsmodellierung heranzuziehen und ob die Geoinformatik auf diese Weise Einfluss auf die Forschung im Bereich der Verkehrsmodellierung nehmen kann.

Die Entwicklung des erstellten Konzepts wird auf einer Auswahl weniger verkehrsbeeinflussender Parameter durchgeführt. Ziel dieser Arbeit ist es nicht, ein aus verkehrsplanerischer Sicht ausgereiftes Verkehrsmodell zu erzeugen. Vielmehr werden Datenmodelle aus dem Kontext der Geoinformatik aufgezeigt und eine, für den geschilderten Anwendungsfall notwendige, Optimierung durchgeführt und diskutiert.

Der Einfluss von Bewegungsprofilen, deren Bereitstellung durch Mobilfunkbetreiber oder Herstellern von Mobiltelefonen erfolgen kann, soll ebenfalls aufgezeigt werden. Dass das Thema Datenschutz eine entscheidende Rolle in der Realisierbarkeit eines solchen Konzepts darstellt, soll zunächst keine weitere Berücksichtigung finden. Das Aufzeigen der technischen Möglichkeiten steht somit im Vordergrund und wird ferner als Grundlage zu weiterführenden Forschungsarbeiten betrachtet. Hierbei wird allerdings vielmehr auf die Techniken zur Auswertung raum-zeitlicher Datenbestände und bewegter Objekte, als auf die technischen Möglichkeiten des Mobilfunks Bezug genommen.

Die Auswertung raum-zeitlicher Daten mit Hilfe des konzeptionierten Datenmodells zeigt Möglichkeiten auf, durch Mustererkennung Verkehrsteilnehmer vor gefährlichen Verkehrssituationen zu warnen. Bereits existierende Projekte und Produkte zur Auswertung von raum-zeitlichen Verkehrsdaten werden kurz angeschnitten. Der Schwerpunkt

der Arbeit soll das Potential der Geoinformatik aufgezeigt werden, Einfluss auf diesen Forschungsbereich der Verkehrsforschung zu nehmen.

1.5 Struktur und Aufbau

Nach der kurzen Diskussion des Einflusses raum-zeitlicher Daten auf die Verkehrsforschung werden mögliche Potentiale aufgezeigt, die sich durch eine Verknüpfung der Geoinformatik und der Verkehrsforschung ergeben.

Das zweite Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand der Geoinformatik in Bezug auf die Behandlung raum-zeitlicher Daten. Richtungsweisende Forschungsergebnisse der vergangenen Jahre werden kurz aufgezeigt. Näher erfolgt die Betrachtung von Datenmodellen, die zur Darstellung bewegter Objekte dienen und zu deren Analyse herangezogen werden können. Hierbei stellt auch die Behandlung von Verfahren aus dem Bereich der Geographie oder der Datenbanken einen wesentlichen Punkt dar. Eine Vorstellung der Grundlagen der Verkehrsplanung erfolgt im darauffolgenden Unterkapitel. Inhalt dieses Kapitels ist zudem die Diskussion gängiger Erfassungsmethoden, sowie die Erläuterung einiger Grundlagen der Verkehrsforschung.

Das dritte Kapitel dieser Masterthesis stellt eine erste Verbindung beider Wissenschaften dar. Die Untersuchung von Formeln zur Ermittlung makroskopischer und mikroskopischer Größen der Verkehrsplanung dient zunächst zur näheren Analyse des benötigten Datenbestandes. Durch die Vorstellung raum-zeitlicher Datentypen, Operatoren unterschiedlicher Datenmodelle und Standards sowie jeweils entsprechender Anwendungsbeispiele wird eine Verknüpfung zwischen Geoinformatik und Verkehrsforschung erzielt. Als nächstes werden räumliche und zeitliche Referenzsysteme bzgl. ihrer Anwendungsmöglichkeiten in der Verkehrsforschung untersucht und entsprechende Anwendungsbeispiele aufgezeigt. Des Weiteren beinhaltet dieses Kapitel die Grundlagen zeitlicher Topologie.

Nach der Grundlagenarbeit der ersten Kapitel erfolgt in Kapitel 4 eine Konzeptionierung auf Grundlage der zuvor präsentierten Datenmodelle, Konzepte und Standards. Die Konzeptionierung erfolgt unter Berücksichtigung der einzelnen Arbeitsschritte, die sich von der Datenerfassung, über die Datenspeicherung, bis zur Datenanalyse erstrecken.

Im 5. Kapitel dieser Masterthesis werden die in den vorherigen Kapiteln gesammelten Erkenntnisse in Form von Anwendungsbeispielen und Beispielabfragen weiter diskutiert und auf ihre Praktikabilität untersucht. Dabei wird auch ein Blick auf etwaige Fehlerquellen der in Kapitel 4 beschriebenen Arbeitsschritte geworfen.

In Kapitel 6 erfolgt die Beantwortung der gestellten Forschungsfragen. Zudem wird ein Ausblick auf das Potential der Geoinformatik im Umgang mit bewegten Objekten und raum-zeitlichen Big-Data-Beständen geliefert. Es werden kurze Einblicke auf aktuelle und zukunftssträngige Forschungsprojekte gegeben und der dabei herrschende Einfluss der Geoinformatik aufgezeigt.

2 Grundlagen und Definitionen

Das vorhergehende Kapitel hat die Brisanz der Integration von Zeitinformationen speziell bei der Untersuchung bewegter Objekte aufgezeigt. Dabei wurde u.a. verdeutlicht, dass die Erfassung von Bewegungsprofilen nicht unumstritten ist. Es soll im weiteren Verlauf dieser Masterthesis aufgezeigt werden, dass die Auswertung von Bewegungsprofilen auch zur Sicherheit von Verkehrsteilnehmern beitragen kann. Insbesondere wird dabei auf die Erfassung von Bewegungsprofilen nicht motorisierter Verkehrsteilnehmer Bezug genommen. Im Folgenden sind zunächst einige Grundlagen bzgl. des Umgangs mit raumzeitlichen Daten im Umfeld der Geoinformatik sowie Grundlagen und Definitionen der Verkehrsforschung dargestellt, die zum besseren Verständnis der durchgeführten Untersuchungen dienen.

Prognosen dienen speziell im wissenschaftlichen Kontext zur Vorhersage zukünftiger Ereignisse. In der Regel sind hierzu Erfahrungswerte, die beispielsweise durch die gezielte Analyse von Daten, die über einen längeren Zeitraum hinweg erfasst wurden, notwendig. Eine Prognose von Verkehrsbehinderungen und die Vorhersage von Verkehrseignissen und Parametern, wie der Fließgeschwindigkeit oder der Verkehrsdichte, sind ein wichtiges Instrument im Bereich der Verkehrsplanung.

Auf Grundlage dieser Prognosen ist es u.a. möglich, Verkehrsteilnehmer vor bevorstehenden Ereignissen zu warnen und somit die Sicherheit im Straßenverkehr zu steigern.

Um solche Prognosen durchführen zu können, werden Verkehrsinformationen über viele Jahre hinweg erfasst und archiviert. Die Kernaufgabe der durchgeführten Prognosen liegt darin, den gegebenen Bestand raum-zeitlicher Daten nach Mustern zu untersuchen. Somit steht bei Verkehrsprognosen nicht nur die Frage nach dem „Wo“ im Vordergrund, sondern auch die des „Wann“ und des „Wie lange“. Daher ist es in diesem Zusammenhang wichtig, die nötigen Mittel im Umgang mit raumzeitlichen Daten zu verstehen und auf das hier geschilderte Fallbeispiel zu übertragen und entsprechende Verknüpfungen beider Fachdisziplinen zu nutzen.

Neben der Sammlung und Archivierung von raum-zeitlichen Daten erhält besonders durch die heutige Mobilfunktechnik die Erfassung von Bewegungsprofilen in Echtzeit

einen immer höheren Stellenwert. Hierbei wächst der Bedarf, bewegte Objekte in Form von Echtzeit-Bewegungsprofilen in Datenbanksysteme zu integrieren und entsprechend verschiedener Anwendungsfälle analysieren zu können. Zur Analyse des aktuellen Verkehrsgeschehens sind raum-zeitliche Echtzeitdaten der Verkehrsteilnehmer notwendig. Dabei ist es besonders wichtig, die Dynamik bewegter Objekte bzw., bezogen auf das behandelte Fallbeispiel, die Dynamik der Fortbewegung von Fußgängern und anderen Verkehrsteilnehmern in Echtzeit analysieren zu können. Entscheidend ist bei diesen Untersuchungen insbesondere, dass nicht die aktuelle Position eines Verkehrsteilnehmers als statische Lageinformation übermittelt wird, sondern auch Angaben wie Geschwindigkeit, Bewegungsrichtung usw. zur Analyse heranzuziehen sind.

Im Rahmen dieser Masterthesis werden die Forschungsstände speziell im Bereich der Verkehrsprognose bzw. der Modellierung von Fußgängern mit dem Stand der Forschung im Bereich der Raum-Zeit-Integration im Umfeld der Geoinformatik betrachtet. Dazu werden aus beiden Fachdisziplinen zunächst einige Grundlagen und Definitionen vorgestellt. Anschließend stellt die Behandlung bewegter Objekte den Kern der Untersuchungen dar.

2.1 Raum-Zeit-Integration in Geoinformationssystemen

Eine der bedeutendsten Aufgaben der Geoinformatik ist es, die Umwelt und ihre Themen möglichst realistisch darzustellen und zu modellieren, um auf diese Weise repräsentative Analyseergebnisse erzielen zu können. Hierzu ist es notwendig, neben den räumlichen Informationen eines Sachverhalts, auch die zeitliche Komponente in die Datenstruktur zu integrieren.

Die Entwicklung räumlicher und zeitlicher Datenmodelle bzw. Datenbanken wurde in ihren Anfängen zunächst getrennt durchgeführt und führte erst in den letzten Jahren zur gemeinsamen Entwicklung raum-zeitlicher Datenmodelle. (Erwig et al., 1999)

Die Umsetzung dieser Datenmodelle in Form von raum-zeitlichen Informationssystemen, basierend auf gängigen Datenbanksystemen, ist immer wieder Gegenstand aktueller Forschungsprojekte. So beispielsweise die Umsetzung mittels Oracle (Zhao et al., 2011) oder PostgreSQL (Broßheit et al., 2014).

Neben der allgemeinen Untersuchung der Zeitintegration in Geoinformationssystemen wurden in der Vergangenheit bereits einige fachspezifische Forschungsprojekte zu diesem Thema durchgeführt. So sei beispielsweise auf die Arbeit von Bendix et al. (1999) verwiesen, in welcher das Verhalten von Nebel mit Hilfe eines 4D-GIS untersucht wird. Mit der Untersuchung des menschlichen Verhaltens in Raum und Zeit beschäftigt sich Kwan (2013) und geht hierbei auch auf die Auswertung menschlicher Bewegungsprofile ein.

Nach Richardson et al. (2013) kann die Forschung im Bereich der Geoinformation einen Beitrag zum besseren Verständnis der Ausbreitung und Behandlung von Krankheiten leisten. Im Bereich der GIS-basierten Analyse von Luftverschmutzungen, die durch Straßenverkehr ausgelöst werden, sei auf die Arbeit von Rebolj und Sturm (1999) verwiesen. Auch im Umfeld der Naturkatastrophen sind einige Forschungsprojekte vorzufinden, die sich mit der Behandlung raum-zeitlicher Daten beschäftigen. Die Modellierung und Visualisierung von Überflutungen, ausgelöst durch Tsunami-Wellen, ist Thema der Arbeit von Keon et al. (2014). Torrens (2013) behandelt in seiner Arbeit das raum-zeitliche Verhalten von Menschen während eines Erdbebens bzw. dem hierdurch ausgelösten Zusammensturz von Gebäuden und präsentiert ein entsprechendes Modell zur Visualisierung dieser Situation.

Ein weiterer Themenbereich wird durch Tanikawa und Hashimoto (2009) abgedeckt. Mittels 4D-GIS werden hier Analysen durchgeführt, um die Anhäufung von städtischen Abfällen, die beispielsweise bei dem Abriss von Gebäuden entstehen, räumlich und zeitlich vorherzusagen und ggf. rechtzeitig auf Recycling-Methoden zurückgreifen zu können. Das raum-zeitliche Verhalten und die Entwicklung des Zustandes von überträgigen Bauwerken im Bereich einer alten Bergbauregion wird von Hillmann (2009) mit Hilfe eines eigens entwickelten 4D-GIS untersucht. Raum-zeitliche Muster in Temperaturdaten werden in Wu et al. (2015) ermittelt. Döner et al. (2011) untersuchen anhand eines Fallbeispiels die Umsetzung eines Kanalnetzkatasters mit Hilfe eines 4D-GIS.

Die aufgeführten Beispiele zeigen die Brisanz dieses Themas und verdeutlichen, dass die Forschung im Bereich dynamischer Datenbestände und der Raum-Zeit-Integration im Umfeld der Geoinformatik stetig voranschreitet.

2.1.1 Snapshots und der erhöhte Bedarf an Speicherplatz

Peuquet und Duan (1995) zeigen auf, dass Geoinformationssysteme in der Regel nur zur Darstellung der Gegenwart bzw. eines bestimmten Zeitpunktes dienen und hierbei keine Dynamik gegeben ist. Zur Darstellung menschlicher Tätigkeiten und zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Mensch und Umwelt in städtischen und regionalen Bereichen ist es hingegen erforderlich den Faktor Zeit zu berücksichtigen. Bereits existierende Geoinformationssysteme, die die Verwaltung raum-zeitlicher Daten ermöglichen, stellen in der Regel lediglich hintereinander gereihe Snapshots dar. Hierbei erfolgt die Speicherung des Datenbestandes S_i zu einem Zeitpunkt t_i . (vgl. Abbildung 1) Snapshots verfügen daher über diverse Nachteile. So können die Änderungen zwischen zwei benachbarten Zeitpunkten nur durch direkten Vergleich ermittelt werden. Fehler sind nur dann auffindbar, wenn das reguläre Verhalten der dargestellten Thematik bekannt ist. (Langran und Chrisman, 1988)

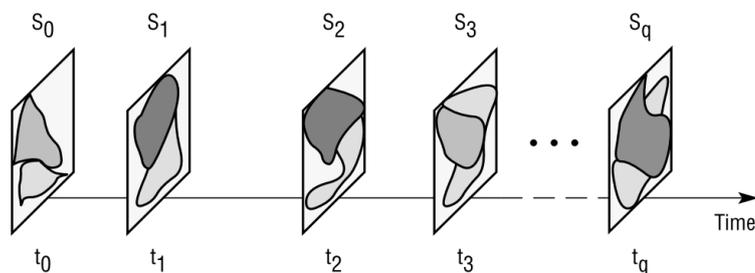


Abbildung 1: Snapshots zur Darstellung raum-zeitlicher Daten. (Peuquet und Duan, 1995)

Beurteilt man in solch einem Fall eine dargestellte Situation hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit, so ist es nach einem Beispiel von Langran und Chrisman (1988) realistischer, dass sich die Landnutzung eines Bereichs mit fortschreitender Zeit von Weidefläche zu Bauland verändert als umgekehrt. Denn Ereignisse, welche zur Veränderung des Datenbestandes zwischen Zeitpunkt t_i und t_{i+1} geführt haben, werden durch Snapshots nicht dargestellt. Ein weiterer Nachteil stellt die redundante Datenspeicherung dar, die zu ei-

nem erhöhten Speicherbedarf führt, da zu jedem Snapshot auch alle unveränderten Datensätze erneut abgespeichert werden (Peuquet, 1999; Peuquet, 2001; Peuquet und Duan, 1995).

Das Fehlen von Informationen über die Ereignisse, die zur Änderung des Datenbestandes zwischen zweier benachbarter Zeitpunkte geführt haben bzw. das Verhältnis zwischen verschiedenen Zeitpunkten und die Interpolation der Zustände zwischen diesen Zeitpunkten, ist lange ein fester Bestandteil der Forschung. Hier sei u.a. auf die Arbeiten von Allen (1983), Allen (1984), Allen und Koomen (1983), Kahn und Gorry (1977), Le (2013), Le et al. (2013) und Vilain (1982) verwiesen.

Nach Peuquet und Duan (1995) steigt der Bedarf an Tools zur Auswertung raumzeitlicher Daten, welche beispielsweise durch Fernerkundung erfasst werden, stetig an. Das Hauptziel ihrer Forschung ist es, diese Daten so verwalten zu können, dass eine effektive Analyse des Datenbestandes ermöglicht wird.

So präsentieren Peuquet und Duan (1995) das Datenmodell „*The Event-based Spatio Temporal Data Model*“ (ESTDM). Dessen Aufbau ist Abbildung 2 zu entnehmen. In Teil (a) dieser Abbildung ist eine einfache Karte mit drei Flächen unterschiedlicher Werte dargestellt. Teil (b) zeigt im oberen Bereich eine Zeitreihe und unterhalb zwei Tabellen. Hier werden die Änderungen zum Zeitpunkt t_i nach ihren Werten sortiert. Auf diese Weise ist die Einsparung von Speicherplatz ermöglicht, da lediglich eine Speicherung der Komponenten erfolgt, die sich zu dem jeweiligen Zeitpunkt t_i verändert haben.

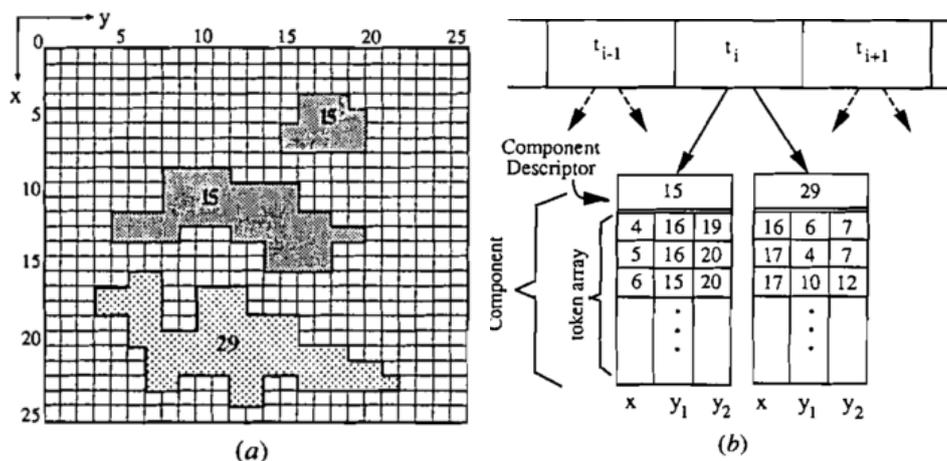


Abbildung 2: Event-based SpatioTemporal Data Model (ESTDM) (Peuquet und Duan, 1995)

In Abbildung 3 ist das zeitliche Raster zur Darstellung raum-zeitlicher Daten nach Langran (1992) dargestellt. Hier wird den Pixeln eines Rasters nicht nur ein einzelner Wert zugewiesen, sondern eine variable Wertetabelle, in welcher eine zeitlich sortierte Auflistung aller Veränderungen erfolgt. Diese Vorgehensweise ermöglicht im Gegensatz zur Snapshot-Methode das Speichern raumzeitlicher Daten, ohne Informationen redundant zu hinterlegen, da lediglich die Änderungen einer bestimmten Position gespeichert werden. Dies führt im Vergleich zur Snapshot-Methode zu einem geringeren Speicherbedarf. (Langran, 1992)

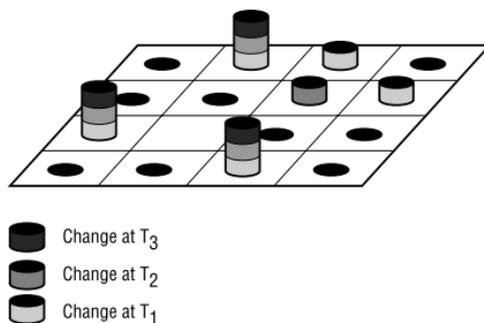


Abbildung 3: Zeitliches Raster zur Darstellung raum-zeitlicher Daten. (Langran, 1992)

Besonders um die Zuverlässigkeit eines Datenbestandes mit Hilfe der gelieferten Zeitanangaben beurteilen zu können, erweist sich bei der Zeitintegration in GIS eine Unterteilung der Zeit in zwei einzelne Dimensionen als sinnvoll. In diesen sogenannten bitemporalen Systemen wird zwischen der Datenbankzeit und der Ereigniszeit unterschieden. Während durch die Datenbankzeit die Änderungen an dem Datensatz bzw. der Zeitpunkt der Datenerfassung verwaltet werden, gibt die Ereigniszeit an, zu welchem Zeitpunkt das angegebene Ereignis stattgefunden hat. Beide Dimensionen liefern unterschiedliche Informationen über einen Datensatz und können somit unabhängig voneinander für raum-zeitliche Analysen herangezogen werden. (Özsoyoğlu und Snodgrass, 1995; Schaeben et al., 2003; Snodgrass et al., 1998; Worboys, 1994)

Geoinformationssysteme wie Quantum GIS wurden in der Vergangenheit bereits durch Funktionalitäten bzw. Tools, wie in diesem Fall dem „Time Manager“ erweitert und bie-

ten die Möglichkeit, Datenbestände bzw. Snapshots verschiedener Zeitpunkte zu verwalten (Graser, 2011). Aber auch im Bereich der Webentwicklung findet die Verwendung von Zeitreihen ihren Einsatz (Hocevar et al., 2004).

Die Aufarbeitung und Diskussion unterschiedlicher Modelle zur Zeitintegration in Geoinformationssysteme sind Thema vieler wissenschaftlicher Arbeiten. Hierzu sei auf die Arbeit von Theodoulidis und Loucopoulos (1991) verwiesen. In dieser Arbeit wird besonders darauf hingewiesen, dass sich Zeitmodelle auf relative oder auch absolute Zeit beziehen können. Während sich die absolute Zeit auf einen genauen Zeitpunkt bezieht, finden bei der Angabe relativer Zeit Bezugspunkte, wie beispielsweise Bezeichnungen des allgemeinen Sprachgebrauch, wie „vorgestern“ oder „übermorgen“, Verwendung.

Ebenso wird in ihrer Arbeit der Unterschied zwischen linearer und nichtlinearer Zeit näher beleuchtet. Gängige Zeitmodelle verfügen in der Regel über eine lineare Zeitachse. Speziell bei Vorhersagemodellen ist es nach Theodoulidis und Loucopoulos (1991) notwendig, auch Alternativen bei der Betrachtung der Zukunft zu berücksichtigen und von einer verzweigten Zeitachse auszugehen. In diesem Fall wird dann von nichtlinearer Zeit gesprochen.

2.1.2 Zeitliches Schema nach DIN EN ISO 19108

Die fortschreitende Forschung nach Möglichkeiten der Integration von Zeit in Geoinformationssysteme gab dem Europäischen Komitee für Normung den Anlass, im Jahr 2002 eine entsprechende Europäische Norm *Geographic information – Temporal schema* (ISO 19108:2002) zu entwickeln. Diese Norm ist bei dem Deutschen Institut für Normung e.V. unter DIN EN ISO 19108 (2005-05) zu finden. Das hierin definierte zeitliche Schema dient der Standardisierung im Umgang mit raum-zeitlichen Daten im Bereich der Geoinformatik und wird in der Modellierungssprache Unified Modeling Language (UML) präsentiert. Gehört eine UML-Klasse der ISO 19100-Reihe an, so wird ihr Name mit dem Präfix „TM_“ versehen. Nach dieser Norm ist die Zeit eine eigene Dimension und verfügt über Geometrie und Topologie. Im Gegensatz zu anderen räumlichen Dimensionen bewegt sich die Zeit immer vorwärts, kann jedoch in beide Richtungen gemessen werden.

Unter Beachtung dieser Grundlagen werden die verschiedenen Klassen des Schemas einzeln definiert und näher erläutert. Hierzu zählt beispielsweise `TM_Instant`. Diese Klasse stellt eine null-dimensionale geometrische Primitive dar, dessen Lage auf dem Zeitstrahl durch das Attribut „Position“ definiert wird. Ferner werden Klassen zur Beschreibung der Dauer, zeitlicher Perioden oder auch der zeitlichen Reihenfolge definiert. Neben Definitionen im Bereich der zeitlichen Geometrie wird zudem auf die Topologie der Zeit eingegangen und es werden Typen temporaler Referenzsysteme erläutert. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird an geeigneter Stelle auf Inhalte und Definitionen dieser Norm verwiesen. (DIN EN ISO 19108, 2005-05)

Eine mögliche Implementierung der DIN EN ISO 19108 (2005-05) mittels PostgreSQL und PostGIS und die daraus resultierenden Möglichkeiten in der Auswertung raumzeitlicher Daten wird von Broßheit et al. (2014) präsentiert.

2.1.3 Gegenwart, Vergangenheit und Zukunft

Spricht man von raumzeitlichen Daten, so spielt die Aktualität der gegebenen Daten eine wichtige Rolle. Die Frage, wann ein Datensatz aktuell ist und wann veraltet, lässt sich nicht pauschal beantworten, sondern erfordert je nach Art der gelieferten Daten eine individuelle Beurteilung. Nach Klopprogge und Lockemann (1983) stellt es beispielsweise für eine Bodenstation, welche die Positionsdaten von Satelliten erfasst, ein erhebliches Problem dar, die gegenwärtige Position der Satelliten zu benennen, wenn es zwischen dem Zeitpunkt der Datenübermittlung zum Satelliten und der entsprechenden Antwort zu Verzögerungen im Bereich von Sekunden oder auch Stunden kommen kann. Demnach werden in der entsprechenden Datenbank ältere, dafür aber zuverlässigere Positionsdaten hinterlegt. Diese Vorgehensweise führt dazu, dass sich der vorhandene und als aktuell betrachtete Datenbestand aus Daten unterschiedlichen Alters zusammensetzt. Zur besseren Beurteilung der Aktualität eines Datenbestandes bietet sich daher die Einführung von Zeitstempeln an. (Klopprogge und Lockemann, 1983)

Stehen der Datenbank aktuellere Datensätze zur Verfügung, stellt sich die Frage, wie in diesem Fall mit dem alten Datenbestand umzugehen ist. Alte Daten mit neueren Daten zu überschreiben stellt nicht immer die optimale Lösung dar. Vielmehr ist es nach Schueler

(1977) möglich, den Altbestand durch die neuen Datensätze zu ergänzen. Dies ist beispielsweise bei der Erfassung von Bewegungsprofilen notwendig. Wird eine neue Position eines Objekts erfasst, wird die alte Position somit nicht überschrieben, sondern bleibt mit ihrem alten Zeitstempel bestehen.

Diese Ansätze zeigen, dass durch die Erweiterung eines Geodatenbanksystems nicht, wie bisher üblich, lediglich auf die Genauigkeit der gelieferten Lageinformationen zu achten ist, sondern auch die Genauigkeit und Aktualität der gelieferten Zeitangaben berücksichtigt werden müssen. Zur Ermittlung möglichst zuverlässiger und aussagekräftiger Prognosen ist es daher notwendig, die Qualität der vorhandenen Daten beurteilen zu können.

Durch Datenmodelle unterschiedlichster Fachdisziplinen lassen sich Vorhersagen über die Entwicklung eines Datenbestandes bzw. einer Situation treffen. Populäre Vorhersagemodelle sind beispielsweise in der Meteorologie vorzufinden.

Aber auch bei der Beobachtung bewegter Objekte, wie beispielsweise Fußgängern, ist es möglich, durch ihre aktuelle Geschwindigkeit sowie die aktuelle Orientierungsrichtung bevorstehende Bewegungen zu prognostizieren. (Sistla et al., 1997)

Durch aktuell erfasste Verkehrsinformationen und die über Jahre hinweg gesammelten Verkehrsdaten lassen sich Staus vorhersagen. Hierbei spielt besonders die Erkennung raum-zeitlicher Muster eine Rolle. So ist das Verkehrsaufkommen zu Ferienbeginn auf bestimmten Straßenabschnitten deutlich höher, als an anderen Tagen. Dies trifft auch auf das Verhalten von Fußgängern zu. So bricht beispielsweise bei einem plötzlichen Zusammensturz eines Gebäudes unter den im Umkreis befindlichen Fußgängern Panik aus (Torrens, 2013). Der übliche Bewegungsablauf dieser Menschengruppen verändert sich abrupt. Das Ergebnis sind Massenpaniken, die durch wissenschaftliche Untersuchungen bereits im Vorfeld verhindert werden könnten.

2.1.4 Raum-zeitliche Modellierung bewegter Objekte

Speziell mit der raumzeitlichen Modellierung bewegter Objekte beschäftigt sich die Arbeit von Erwig et al. (1999). Die hierin getroffenen Erkenntnisse liefern weitreichende Möglichkeiten im Umgang mit bewegten Punkten und Flächen. Betrachtet werden diese

Bewegungen in drei Dimensionen, die sich aus dem zweidimensionalen Raum und der Zeit als dritte Dimension zusammensetzen.

Frank (1998) stellt die Untersuchung bewegter Objekte als besondere Herausforderung für die Geoinformatik dar. So ist die Distanz zweier Punkte nicht nur durch die Lage, sondern auch durch die Zeit, die benötigt wird, um von einem Punkt zum anderen zu gelangen, zu ermitteln.

Nach Erwig et al. (1999) finden die drei Grundelemente Punkte, Linien und Flächen in einer räumlichen Datenbank ihre Gültigkeit nicht nur im zweidimensionalen Raum, sondern sind auch in drei- oder höherdimensionale Räume übertragbar. Diese Grundelemente sind auch in der Verkehrsforschung von großer Bedeutung. So kann ein Straßennetz durch Linien, ein Ort entlang dieser Strecke durch einen Punkt oder eine Region durch eine Fläche dargestellt werden (Güting, 1994). Die Möglichkeit diese Objekte auch unter Berücksichtigung ihrer zeitlichen Komponente zu betrachten, ist daher eine wesentliche Grundlage für die weiteren Untersuchungen dieser Masterthesis.

Von Erwig et al. (1999) werden allgemeine Operatoren bewegter Objekte, wie beispielsweise die Dauer einer Zeitspanne, ein Zeitpunkt oder auch der Start- oder der Endzeitpunkt einer Zeitspanne, definiert. So kann mit Hilfe des definierten Operators *mdistance* die Distanz zweier bewegter Punkte *mpoint* berechnet werden.

Bewegte Punkte verfügen über zeitlich variierende Positionsangaben. Die zeitliche Ausdehnung oder Veränderung der Form wird hierbei nicht berücksichtigt. Während ein Punkt im zweidimensionalen Raum tatsächlich als Punkt dargestellt wird, definiert ein bewegter Punkt im dreidimensionalen Raum (x,y,t) , unter Berücksichtigung seiner Bewegung, eine Kurve (vgl. Abbildung 4). Hierbei ist es die Aufgabe der Anwendung, die Bewegung des Objekts mit ausreichenden Beobachtungen zu erfassen. Die dabei erfassten Daten werden durch die Anwendung als Funktion beschrieben und entsprechend mittels des Datentyps *mpoint* in der Datenbank hinterlegt. Die Beschreibung einer solchen Kurve sollte nach Erwig et al. (1999) durch eine Polynomfunktion höheren Grades beschrieben werden, wie beispielsweise eine Polynomfunktion dritten Grades, welche auch

als kubisches Polynom bezeichnet wird. Dies ist damit zu begründen, dass die Geschwindigkeit und Beschleunigung durch Ableitung der ursprünglichen Funktion ermittelt werden kann. Handelt es sich aber um eine lineare Funktion, so wäre die erste Ableitung der Funktion, welche den Verlauf der Geschwindigkeit darstellt, ein konstanter Wert. Die Zweite Ableitung und somit die Beschleunigung, ist Null und nicht der Realität entsprechend. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Kurve durch mehrere einzelne Funktionen beschrieben werden sollte, welche jeweils ein einzelnes zeitliches Intervall repräsentieren. Diese aneinander gereihten Funktionen werden als Spline bezeichnet. Zur Beschreibung des raum-zeitlichen Verlaufs eines Punktes wird für jede räumliche Dimension eine separate Kurve definiert, wodurch es ermöglicht wird, bewegte Objekte in höherdimensionalen Räumen, wie beispielweise dem vierdimensionalen Raum (x,y,z,t) , zu behandeln. (Erwig et al., 1999)

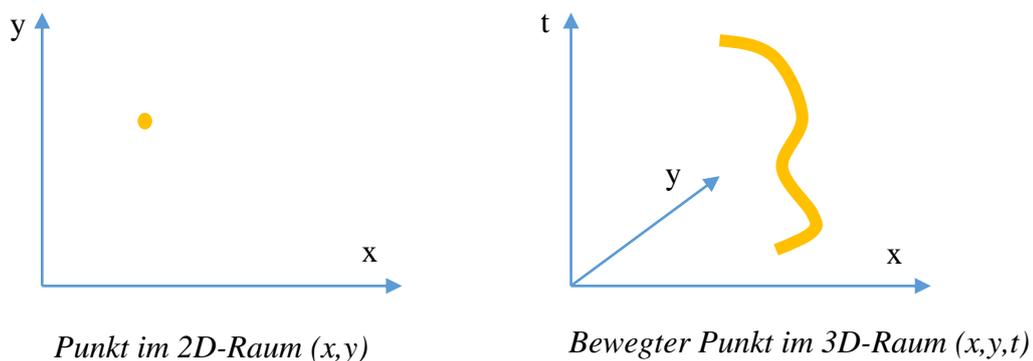


Abbildung 4: Bewegter Punkt im dreidimensionalen Raum (x,y,t)

Nach Erwig et al. (1999) wird ein bewegter Punkt $r(t)$ im dreidimensionalen Raum (x,y,t) , der zur besseren Veranschaulichung mittels einfacher linearer Funktionen beschrieben wird, im zeitlichen Intervall $[t_1, t_2]$ wie folgt dargestellt:

$$\mathbf{r}(t) = (\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t)) \quad \text{Wobei gilt: } x(t) = at + b \quad \text{und} \quad y(t) = ct + d$$

Formel 1: Bewegter Punkt $r(t)$ im dreidimensionalen Raum (x,y,t) nach Erwig et al. (1999)

Doch liefert die Verwendung kubischer Polynome durch ihre Definition mittels vier Parametern nach Erwig et al. (1999) natürlichere Ergebnisse.

Zudem bedarf es gerade im Straßenverkehr, zusätzlich zur Positionsangabe im zweidimensionalen Raum, der Angabe von Höheninformationen, wodurch sich die räumliche Lage eines Verkehrsteilnehmers mittels dreidimensionaler Koordinaten definiert. Unter Hinzunahme der Zeit als zusätzliche Dimension, wird die Position eines Verkehrsteilnehmers durch vier Dimensionen (x,y,z,t) bestimmt.

Entsprechend definiert sich ein bewegter Punkt $r(t)$ im vierdimensionalen Raum (x,y,z,t) im zeitlichen Intervall $[t_1, t_2]$ durch folgende Funktion:

$$r(t) = (x(t), y(t), z(t))$$

Wobei gilt:

$$x(t) = at^3 + bt^2 + ct + d$$

$$y(t) = et^3 + gt^2 + ht + j$$

$$z(t) = kt^3 + lt^2 + mt + n$$

Formel 2: Bewegter Punkt $r(t)$ im vierdimensionalen Raum (x,y,z,t)

Die nach Formel 2 erstellten Funktionen werden anschließend unter Verwendung des Datentyps *mpoint* in eine Datenbank übertragen. Mit entsprechenden Operatoren lassen sich die gespeicherten Bewegungsprofile in Bezug auf raum-zeitliche Fragestellungen analysieren.

Solche Operatoren wurden ebenfalls von Erwig et al. (1999) eingeführt und bieten eine fundierte Grundlage für die Auswertung raum-zeitlicher Datenbestände. Der Wert des Ergebnisses in Formel 3 ist eine sich zeitlich verändernde reelle Zahl. Das ist dadurch zu begründen, dass sich der Abstand zweier bewegter Punkte ebenfalls zeitlich verändern kann. Neben diesem und weiterer Operatoren führten Erwig et al. (1999) den Operator *trajectory* ein. Durch diesen Operator wird ein *mpoint* in die zweidimensionale Ebene projiziert. Wie in Formel 4 dargestellt, ist das Ergebnis dieser Projektion eine Linie.

$\underline{mpoint} \times \underline{mpoint} \rightarrow \underline{mreal} \quad \mathbf{mdistance}$

*Formel 3: Operator *mdistance* nach Erwig et al. (1999)*

<u><i>mpoint</i></u>	→	<u><i>line</i></u>	trajectory
----------------------	---	--------------------	-------------------

Formel 4: Operator trajectory nach Erwig et al. (1999)

Die vorgestellten Operatoren lassen sich in SQL-Queries integrieren, um auf diese Weise die gewünschten Abfrageergebnisse zu erhalten. Analog zu den Beispielen nach Erwig et al. (1999) lassen sich Abfragen im Bereich der Verkehrsforschung erzeugen und die vorgestellten Datentypen in das entsprechende Datenmodell integrieren.

Voraussetzung ist, dass die Anwendung, welche letztendlich auf die vorgestellten Datentypen und Operatoren zurückgreift, genaueste Kenntnisse über den Bewegungsverlauf der beschriebenen Objekte besitzt, diesen durch die zuvor beschriebenen Polynomfunktionen modelliert und als *mpoint* in eine Datenbank überträgt. (Erwig et al., 1999)

Ein bewegtes Objekt setzt voraus, dass seine Bewegung mindestens durch zweidimensionale Lageinformationen, sowie der Angabe der Zeit als eigene Dimension, definiert wird.

Güting et al. (2000) präsentieren erstmals einen vollständigen Entwurf abstrakter raumzeitlicher Datentypen, die eine Unterstützung bewegter Objekte in Datenbanken ermöglichen. Bereits von Erwig et al. (1999) werden die Unterschiede bzw. die Vorteile und Nachteile der abstrakten und diskreten Modellierung vorgestellt. Während abstrakte Modelle ein Konzept einfach und klar widerspiegeln, sind diskrete Modelle einfacher zu implementieren und schneller in Datenbanksysteme zu integrieren.

Die nach Güting et al. (2000) zunächst sehr detailliert beschriebenen einfachen Datentypen, zu denen *Integer*, *real*, *string* und *bool* zählen, sowie die räumlichen Datentypen für Punkte, Linien und Flächen werden im Folgenden als bekannt vorausgesetzt. Vielmehr stehen in diesem Abschnitt die Definition von zeitlichen Datentypen sowie der Umgang mit bewegten Objekten, im Vordergrund.

Zur besseren Zuordnung und Unterscheidung der erzeugten Datentypen besitzen die Typen der Kategorie *moving* den Präfix *m*. Hierdurch ergeben sich nach Güting et al. (2000) u.a. die Datentypen *mpoint*, *mpoints*, *mregion* und *mreal*.

Durch die, nach Güting et al. (2000) eingeführten, raumzeitlichen Operatoren, können Abfragesprachen entstehen, die Analysen im raum-zeitlichen Kontext ermöglichen.

Wie bereits durch Erwig et al. (1999) begonnen, werden in der Arbeit von Güting et al. (2000) Beispiele aufgezeigt, die diese Operatoren in einfachen Anwendungsfällen näher erläutern. Hierbei wird insbesondere auf Fragen eingegangen, wann, ob oder wie lange sich ein bestimmtes Objekt an einer bestimmten Position im Raum befunden hat. Besonders in der Verkehrsplanung sind solche Abfragen unumgänglich und ermöglichen eine gezielte Analyse existierender Datenbestände. Diese und die im Folgenden genannten Operatoren und Definitionen werden in den Kapiteln 4 und 5 durch Anwendungsbeispiele genauer behandelt.

Einen weiteren Ansatz liefert das Datenmodell *Moving Objects Spatio-Temporal* (MOST) nach Sistla et al. (1997). Während sich die zuvor beschriebenen Datenmodelle auf die Modellierung bereits geschehener Bewegungsabläufe konzentrieren, stellt MOST eine Möglichkeit dar, die Bewegungen von Objekten zu prognostizieren. Dieses Datenmodell erlaubt Abfragen, die beispielsweise alle Orte selektieren, welche ausgehend von der aktuellen Position innerhalb einer Zeit t zu erreichen sind. In dieser Forschungsarbeit werden zudem drei unterschiedliche Typen von Datenbankabfragen vorgestellt. Eine *instantaneous query* (Dt. sofortige Abfrage) liefert lediglich Ergebnisse, die sich auf den aktuellen Zeitpunkt der Abfrage beziehen. So kann das Ergebnis einer solchen Abfrage nach kurzer Zeit veraltet sein, wenn nach allen Hotels gefiltert wird, die in den nächsten 20 Minuten erreichbar sind. Die 20 Minuten beziehen sich daher auf den Moment, zu welchem die Abfrage gestellt wurde. Eine weitere Möglichkeit bietet die Durchführung einer *continuous query* (Dt. kontinuierliche Datenbankabfrage). Dabei wird die Abfrage in regelmäßigen Zeitabständen erneut gestellt, wodurch sich der Ausgangszeitpunkt entsprechend verändert und die ausgegebenen Datensätze aktualisiert werden. Die dritte Art von Datenbankabfrage stellt die *persistent query* (Dt. ständige Abfrage) dar. Mit dieser Abfragemethode lassen sich Datensätze ermitteln, die sich über einen bestimmten Zeitraum hinweg auf bestimmte Weise verändern. So lassen sich nach einem Beispiel von Sistla et al. (1997) alle Objekte ermitteln, die innerhalb eines Zeitraums von 10 Minuten ihre Geschwindigkeit in X-Richtung verdoppeln. Eine solche Abfrage kann durch die

beiden zuvor genannten Abfragevarianten nicht erfolgen, da bei einer *instantaneous query* nur die Selektion von Geschwindigkeiten des aktuellen Zeitpunkt stattfindet. Ebenso erfolgen durch eine *continuous query* lediglich sofortige Abfragen in regelmäßigen Zeitabständen, wodurch das gewünschte Ergebnis ebenso wenig erfüllt werden kann. (Sistla et al., 1997)

Dieses Datenmodell bietet im Gegensatz zu dem Datenmodell nach Erwig et al. (1999) den Vorteil, dass auch zukünftige Ereignisse durch Datenbankabfragen ermitteln werden können. Hierzu erfolgt durch Sistla et al. (1997) eine Vorstellung entsprechender Operatoren, die solche Abfragen ermöglichen. Auf diese Operatoren wird in Kapitel 4 genauer eingegangen.

2.1.5 Bewegte Objekte nach DIN EN ISO 19141 und OGC Moving Features

Seit Februar 2015 existiert der internationale Standard des Open Geospatial Consortium *OGC Moving Features*. Dieser Standard dient als Implementierungsspezifikation des abstrakten Standards *Geoinformation - Schema für sich bewegende Objekte (DIN EN ISO 19141, 2009-12)*. (Asahara et al., 2015)

Mit dem Standard *OGC Moving Features* wird speziell die Übermittlung von Bewegungsprofilen spezifiziert. Diese findet entweder als XML- oder CSV-Schnittstelle statt. (OGC, 2015a; OGC, 2015b)

In Kapitel 2.1.4 wurden bereits grundlegende Konzepte und Datenmodelle zur Behandlung bewegter Objekte betrachtet. Im Gegenzug des zuvor behandelten Modells nach Erwig et al. (1999), nutzt der Standard *OGC Moving Features* zur Interpolation von Bewegungsprofilen lineare Funktionen. Obwohl diese Vorgehensweise bereits als Nachteil angesehen wurde, erweist es sich als einfache Alternative zur Interpolation mittels kubischer Polynome. Nach *OGC Moving Features* besteht das Bewegungsprofil aus einzelnen Segmenten, die über die gleiche ID *mfid* verfügen. Diese ID kann beispielsweise die ID eines Fußgängers oder eines Fahrzeugs sein. Jedes Segment verfügt zudem über einen eigenen Start- und Endzeitpunkt, sowie eine Anfangs- und Endposition. Die Koordinaten werden mittels *gml:posList* übermittelt.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit den Segmenten mit *mf:Attr* entsprechende Attribute zuzuweisen.

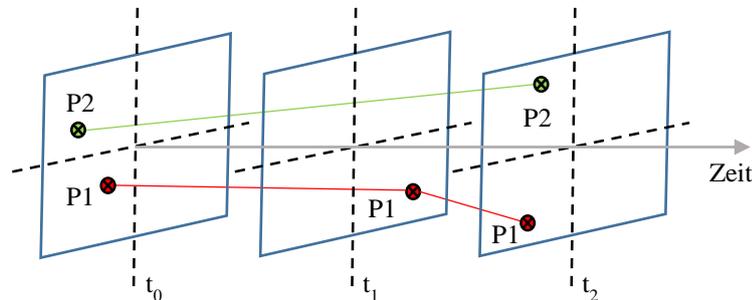


Abbildung 5: Darstellung von Bewegungsprofilen nach OGC Moving Features und DIN EN ISO 19141 (2009-12)

In Anlehnung an ein Beispiel nach OGC (2015b) wird in Abbildung 5 zur Veranschaulichung des zugrundeliegenden Datenmodells die Darstellung der Bewegungsprofile zweier bewegter Punkte P1 und P2 erläutert. Zu sehen ist, dass die Bewegung beider Punkte zum Zeitpunkt t_0 beginnt. Während die Bewegung von P2 von t_0 bis t_2 linear verläuft, verändert sich die Bewegung von P1 zum Zeitpunkt t_1 .

Das dargestellte Datenmodell in Abbildung 5 wurde zur Erzeugung des OGC Moving Features Standard aus der ISO DIN EN 19141 (2009-12) übernommen und wird als *foliation model* bezeichnet. Dargestellt ist dabei die Zeitachse, welche senkrecht durch drei zweidimensionale Flächen verläuft. Jede dieser Flächen verfügt über ein räumliches Koordinatensystem und gibt die jeweilige Position der beobachteten bewegten Punkte zu dem entsprechenden Zeitpunkt an. Demnach stellt jede Fläche einen zeitlichen Snapshot der dargestellten Bewegungen dar.

Mit Hilfe dieser Angaben kann der Verlauf des bewegten Objekts in Raum und Zeit rekonstruiert werden.

Die folgenden XML-Ausschnitte zeigen Teile der nach OGC (2015b) genannten Beispielscodes zur Anwendung der OGC Moving Features. Die Ausschnitte wurden zur besseren Veranschaulichung angepasst und mit anderen Werten versehen.

```

<mf:foliation>
  <mf:LinearTrajectory gml:id="LT01" mfIdRef="person01" start="8" end="100">
    <gml:posList>10.0 1.0 11.0 2.0</gml:posList>
    <mf:Attr>walking,1</mf:Attr>
  </mf:LinearTrajectory>
  <mf:LinearTrajectory gml:id="LT02" mfIdRef="person02" start="22" end="140">
    <gml:posList>13.0 5.0 14.0 6.0</gml:posList>
    <mf:Attr>walking,2</mf:Attr>
  </mf:LinearTrajectory>
  <mf:LinearTrajectory gml:id="LT03" mfIdRef="person01" start="100" end="210">
    <gml:posList>11.0 2.0 17.0 10.0</gml:posList>
    <mf:Attr>walking,2</mf:Attr>
  </mf:LinearTrajectory>
</mf:foliation>

```

Code 1: XML-Ausschnitt *mf:foliation* nach OGC (2015b)

Dieser XML-Ausschnitt zeigt den Tag *mf:foliation*, der die einzelnen Segmente der Bewegungsprofile sowie ihre Koordinaten beinhaltet. Dargestellt ist hierbei die Bewegung zweier Personen. Person 1 läuft im Zeitraum 8-100 von Position 10.0/1.0 nach 11.0/2.0 und von dort ab dem Zeitpunkt 100 bis zum Zeitpunkt 210 in Richtung Position 17.0/10.0. Ab dem Zeitpunkt 22 bewegt sich Person 2 von Position 13.0/5.0 und erreicht zum Zeitpunkt 140 die Position 14.0/16.0. Während das Bewegungsprofil von Person 1 in diesem Beispiel durch zwei Segmente beschrieben wird, verfügt Person 2 lediglich über eine lineare Trajektorie.

Zur Vervollständigung des gezeigten XML-Ausschnitts sind zuvor einige Definitionen erforderlich. Hierzu zählen beispielsweise die Angabe des entsprechenden Koordinatensystems mittels EPSG-Code, sowie der verwendeten Zeiteinheit. Die Zeiteinheit kann zwischen Sekunden, Minuten und einer absoluten Zeitangabe erfolgen. Als Standard ist hier die Angabe mittels Sekunden festgelegt. Desweiteren wird die Bounding-Box und das zeitliche Intervall der angegebenen Bewegungsprofile definiert. Die Angabe der räumlichen Bounding-Box erfolgt mit Hilfe des zuvor definierten Koordinatensystems. Zur Angabe des zeitlichen Intervalls wird eine absolute Zeitangabe in Form von Datum und Uhrzeit verwendet.

```

<mf:sTBoundedBy offset="sec">
  <gml:EnvelopeWithTimePeriod srsName="urn:xogc:def:crs:EPSG:6.6:4326">
    <gml:lowerCorner>50.23 9.23</gml:lowerCorner>
    <gml:upperCorner>50.31 9.27</gml:upperCorner>
    <gml:beginPosition>2015-11-17T12:33:41Z</gml:beginPosition>
    <gml:endPosition>2015-11-17T12:37:11Z </gml:endPosition>
  </gml:EnvelopeWithTimePeriod>
</mf:sTBoundedBy>

```

Code 2: XML-Auszug *mf:sTBoundedBy* nach OGC (2015b)

Mit Hilfe des Tags *mf:member* erfolgt die Definition der bewegten Objekte *mf:MovingFeature*.

```
<mf:member>
  <mf:MovingFeature gml:id="Person01">
    <gml:name>Max Mustermann</gml:name>
  </mf:MovingFeature>
</mf:member>
<mf:member>
  <mf:MovingFeature gml:id="Person02">
    <gml:name>Erika Musterfrau</gml:name>
  </mf:MovingFeature>
</mf:member>
```

Code 3: XML-Ausschnitt *mf:member* nach OGC (2015b)

Die Definition der verwendeten Attribute erfolgt im Abschnitt *mf:header*. Im folgenden Beispiel sind entsprechend zwei Attribute vorgesehen. Der Abschnitt kann je nach Anwendungsfall durch zusätzliche Attribute erweitert werden. In diesem Fall beschränken sich die Attribute auf die Angabe des Bewegungsstils, sowie des Typcodes der jeweiligen Person.

```
<mf:header>
  <mf:VaryingAttrDefs>
    <mf:attrDef>
      <xsd:simpleType name="state">
        <xsd:restriction base="xsd:NMTOKEN">
          <xsd:enumeration value="walking"/>
          <xsd:enumeration value="staying"/>
          <xsd:enumeration value="running"/>
        </xsd:restriction>
      </xsd:simpleType>
    </mf:attrDef>
    <mf:attrDef>
      <xsd:simpleType name="typecode">
        <xsd:restriction base="xsd:integer">
          <xsd:enumeration value="1"/>
          <xsd:enumeration value="2"/>
          <xsd:enumeration value="97"/>
        </xsd:restriction>
      </xsd:simpleType>
    </mf:attrDef>
  </mf:VaryingAttrDefs>
</mf:header>
```

Code 4: XML-Ausschnitt *mf:header* nach OGC (2015b)

Ein weiteres Attribut, welches in einem der Beispiele des OGC Standards verwendet wird, dient zur Angabe der Orientierung eines Verkehrsteilnehmers.

```
<mf:header>
  <mf:VaryingAttrDefs>
    <mf:attrDef name="direction" type="xsd:double">
      <mf:AttrAnnotation>
        Orientierung: Der angegebene Wert gibt den Winkel zwischen Norden
        und der Bewegungsrichtung der jeweiligen Person in Radiant an.
      </mf:AttrAnnotation>
    </mf:attrDef>
  </mf:VaryingAttrDefs>
</mf:header>
```

Code 5: XML-Ausschnitt *mf:header*. Angabe der Bewegungsrichtung eines Verkehrsteilnehmers nach OGC (2015b)

Die hier aufgeführten XML-Auszüge und Definitionen des Standards *OGC Moving Features* zeigen, dass die in Kapitel 2.1.4 vorgestellten Datenmodelle und Konzepte in Teilen bei der Festlegung dieses Standards berücksichtigt wurden. So finden sich einige Grundzüge des nach Erwig et al. (1999) definierten Datentyps *mpoint* wieder. Dies zeigt beispielsweise die Vorgehensweise bei der Speicherung von Teilsegmenten eines Bewegungsprofils. Allerdings wird nach dem OGC Standard auf die, von Erwig et al. (1999) empfohlene Verwendung von kubischen Polynomfunktionen verzichtet und stattdessen auf lineare Interpolationen zurückgegriffen.

Des Weiteren zeigt das in Code 5 definierte Attribut, dass auch die Orientierung eines bewegten Objekts berücksichtigt wird. Diese Vorgehensweise ist bereits dem Konzept nach Sistla et al. (1997) zu entnehmen, wodurch eine Prognose von zukünftig zu erwartenden Bewegungsabläufen ermöglicht wird.

Dabei ist zu erkennen, dass durch *OGC Moving Features* einige Forschungsergebnisse der vergangenen Jahre, sowie der abstrakte Standard DIN EN ISO 19141 (2009-12) berücksichtigt und in Form einer klaren Implementierungsspezifikation festgelegt wurden.

Da besonders bei der Übertragung von Bewegungsprofilen, die je nach Anwendungsfall Positionsinformationen in Intervallen kleiner einer Sekunde übertragen, mit einem erhöhten Datendurchsatz zu rechnen ist, wurde zusätzlich zu dem vorgestellten XML-Schema

ein zweiter Teil des OGC Moving Features Encoding eingeführt. In diesem Teil des Standards werden die zuvor präsentierten Bestandteile des XML-Schemas in ein einfaches CSV-Format übertragen. (Asahara et al., 2015; OGC, 2015a; OGC, 2015b)

2.2 Grundlagen der Verkehrsplanung und Verkehrsprognose

Während sich die Geoinformatik über Jahrzehnte hinweg mit der Forschung zur Integration der Zeit in Geoinformationssysteme beschäftigt, gibt es auch Fachbereiche, die bereits viele Jahre von den hierbei erzielten Ergebnissen profitieren, ohne über eine direkte Verbindung zur Geoinformatik zu verfügen. Einer dieser Fachdisziplinen ist die Verkehrsforschung. Zum besseren Verständnis fachspezifischer Problemstellungen werden im Folgenden die wichtigsten Begrifflichkeiten der Verkehrsforschung vorgestellt und im Einzelnen erläutert.

2.2.1 Erfassungsmethoden von Verkehrsdaten

Die Erfassung von Verkehrsdaten erfolgt mit Hilfe unterschiedlicher technischer Methoden. Je nach gewählter Erfassungsmethode variieren die Zeitintervalle, sowie der Umfang der Daten. Daher ist im Vorfeld die Entscheidung zu treffen, welche Informationen für den jeweiligen Anwendungsfall benötigt werden.

Floating-Car-Daten

Nach Treiber und Kesting (2010 S.7) stellt die Erfassung von Verkehrsdaten mittels Floating-Cars eine gängige, aber sehr kostenintensive Erfassungsmethode dar. Unter Floating-Cars sind Fahrzeuge zu verstehen, die mit Sensoren ausgestattet sind und die die benötigten Daten erfassen, indem sie sich mit dem fließenden Verkehr bewegen. Neben den hohen Kosten, die durch die verbaute Technik entstehen, stellt es einen weiteren Nachteil dar, dass durch diese Methode lediglich Verkehrsinformationen einzelner Fahrzeuge erfasst werden. (Treiber und Kesting, 2010 S.7)

Zu den erfassten Daten zählen bei der Floating-Car-Methode u.a.:

- Geschwindigkeit
- Position
- Geschwindigkeitsdifferenz zu vorausfahrenden Fahrzeugen
- Abstand zu anderen Fahrzeugen
- Diverse Fahrzeuginformationen, wie Gas- und Bremspedaldruck, sowie Blinker

Um die Dichte an Floating Cars mit möglichst geringen Kosten zu erhöhen, werden stellenweise Taxis mit entsprechenden Sensoren ausgestattet (Lorkowski et al., 2003; Schäfer et al., 2003).

Smartphone-Applikationen wie beispielsweise *GPS Navigation & Maps – Scout* (ehemals *Skobbler*), der Telenav GmbH, geben auf ihrer Firmenwebsite Einblick auf den Inhalt der erfassten Bewegungsprofile. Ein Blick auf diese Daten zeigt, dass mit ihrer Hilfe die zurückgelegte Wegstrecke eines Smartphones problemlos rekonstruierbar ist. Durch die Sammlung der aktuellen Position in Form von X- und Y-Koordinaten, dem eingeschlagenen Kurs sowie den entsprechenden Zeitinformationen, lassen sich in Verbindung mit dem aktuellen Straßenabschnitt detaillierte Rückschlüsse auf das Bewegungsprofil eines Smartphone-Nutzers treffen. Als Datengrundlage wird hierzu der freie Online-Kartendienst OpenStreetMap genutzt. Die Erfassung und Übermittlung der Daten erfolgt in einem Intervall von etwa drei Minuten. Sollte zum Zeitpunkt der Übermittlung keine Internetverbindung bestehen, werden die Daten nachträglich übertragen. Mit Hilfe dieser Informationen ist es möglich, die aktuelle Geschwindigkeit zu ermitteln. Scout verspricht dem Anwender auf seiner Website, die erfassten Daten lediglich für die eigenen Dienste zu verwenden und jedes Bewegungsprofil mit einer zufälligen ID zu versehen, um Rückschlüsse auf das entsprechende Smartphone zu vermeiden. (Scout, 2015)



Abbildung 6: Auszug der gesammelten Daten der Navigations-App Skobbler (Scout, 2015)

Diese Art der Datenerfassung ermöglicht nicht nur die Erfassung von Bewegungsprofilen motorisierter Verkehrsteilnehmer, sondern auch von Fußgängern. Besonders Smartphones bieten eine ideale Grundlage zur Erfassung von Positionsinformationen ihrer Besitzer. Auf diese Weise lassen sich flächendeckend Bewegungsprofile von Fußgängern erfassen und für weitere Analysen nutzen.

Trajektorien

Ein weiterer Schritt der Optimierung von Verkehrsinformationen stellt nach Treiber und Kesting (2010) die fortschreitende Entwicklung von Navigationsgeräten dar. Viele Hersteller dieser Geräte sammeln anonymisierte Daten, um auf diese Weise ihre Routenplanungen zu verbessern und Verkehrsstörungen zu berücksichtigen. (Treiber und Kesting, 2010 S.7)

Neben der Erfassung von Verkehrsdaten mittels Floating Cars, gibt es nach Treiber und Kesting (2010 S.7) die Möglichkeit, über erhöht angebrachte Kameras am Straßenrand oder Aufnahmen aus Flugzeugen, entsprechende Daten zu erfassen. Die hierbei erfassten Daten werden als Trajektorien bezeichnet. Um aus den erfassten Videoaufnahmen die gewünschten Daten zu extrahieren, bedarf es spezieller Softwareprodukte. Aus Trajektorien ermittelte Verkehrsinformationen verfügen, gegenüber der Ermittlung

mittels der Floating-Car-Methode, über mehr Details. Zwar entfallen durch das Fehlen entsprechender Sensoren die zuvor genannten Informationen zu den Pedalaktivitäten, des Blinkers usw., jedoch können anhand dieser Methode Informationen über den befahrenen Fahrstreifen sowie Fahrstreifenwechsel ermittelt werden. Während bei der Floating-Car-Methode lediglich die Sammlung von Informationen vereinzelter Fahrzeuge stattfindet, stellen Trajektorien Daten die Möglichkeit dar, das Verkehrsgeschehen lückenlos zu erfassen. (Treiber und Kesting, 2010 S.7f)

Querschnittsdaten

Neben den beiden zuvor genannten Möglichkeiten der Datenerfassung, ist die Ermittlung von Verkehrsinformationen mittels Querschnittsdaten zu nennen. Mit Hilfe von Querschnittsdetektoren, wie beispielweise Induktionsschleifen, lassen sich mikroskopische Größen des Straßenverkehrs erfassen. Hierbei werden mittels Induktion die Zeitpunkte $t_\alpha = t_\alpha^0$, zu welchem die Fahrzeugfront, sowie $t_\alpha = t_\alpha^1$, zu welchem das Fahrzeugheck die Schleife passiert, erfasst. Passiert ein Fahrzeug eine sogenannte Doppelinduktionsschleife, welche aus zwei einzelnen Induktionsschleifen besteht, die in der Regel einen Abstand von 1m besitzen, kann dessen Geschwindigkeit ermittelt werden. (Treiber und Kesting, 2010 S.13f)

Diese Methode der Datenerfassung mittels induktionsbasierter Zählstellen liefert nach Treiber und Kesting (2010 S.13f) u.a. folgende Informationen:

- Fahrzeuglänge
- Fahrzeugtyp
- Brutto-/Netto-Zeitlücken zwischen hintereinanderfahrenden Fahrzeugen
- Brutto-/Nettoabstände

Durch diese Methode werden mikroskopische Daten, d.h. Daten zu einzelnen Fahrzeugen erfasst. Zur Verringerung der zu übermittelnden Datenmengen, erfolgt in der Regel in festen zeitlichen Intervallen eine Mittelung dieser Daten. Die Daten stellen dann entsprechend makroskopische Verkehrsinformationen dar. (Treiber und Kesting, 2010 S.15f)

Makroskopische Daten beinhalten u.a. Informationen zum Verkehrsfluss, dem Belegungsgrad, zu dem harmonischen und dem arithmetischen Geschwindigkeitsmittel sowie zur Geschwindigkeitsvarianz. (Treiber und Kesting, 2010 S.15f)

Die durch die genannten Erfassungsmethoden gewonnenen Daten sind raumzeitliche Daten. Sie haben einen Lagebezug und werden mit entsprechenden Zeitinformationen erfasst und abgespeichert.

2.2.2 Verkehrsmodellierung

Allgemein lässt sich die Verkehrsmodellierung in zwei Methoden unterteilen, die Verkehrsflussdynamik und die Verkehrsplanung. Zwar werden mittels beider Methoden dynamische Verkehrsphänomene behandelt, dennoch gibt es hierbei einige grundlegende Unterschiede.

Tabelle 1 ist eine thematisch sortierte Gegenüberstellung dieser Unterschiede zu entnehmen. Hierbei wird deutlich, dass gerade die Modellierung der Verkehrsflussdynamik eine wichtige Grundlage für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Masterthesis darstellt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung einzelner Aspekte der Verkehrsflussdynamik und der Verkehrsplanung

	Verkehrsflussdynamik	Verkehrsplanung
Zeitlicher Aspekt betrachteter Zeitraum	Stunden	Tage / Jahre
Objektiver Aspekt Infrastruktur / Verkehrsnachfrage	fest	dynamisch
Subjektiver Aspekt Was wird untersucht?	menschliches Fahrverhalten: Fahrstreifenwechsel, Änderung der Fahrtrichtung, Beschleunigung usw.	Routenwahl, Entfernungen, Verkehrsmittelwahl etc.
Anwendung	Ermittlung der Stauwahrscheinlichkeit nach Änderung diverser Parameter, wie Geschwindigkeitsbeschränkungen	Untersuchung von Mitteln zur Verringerung der Verkehrsnachfrage

Eine Modellierung des Verkehrsflusses lässt sich durch eine Kombination aus mathematischen Methoden und Verkehrsdaten realisieren. Diese Verkehrsdaten sind hierbei als empirische Aussagen zu betrachten, die eine Kalibrierung und somit eine Optimierung einzelner Parameter der Modelle ermöglichen.

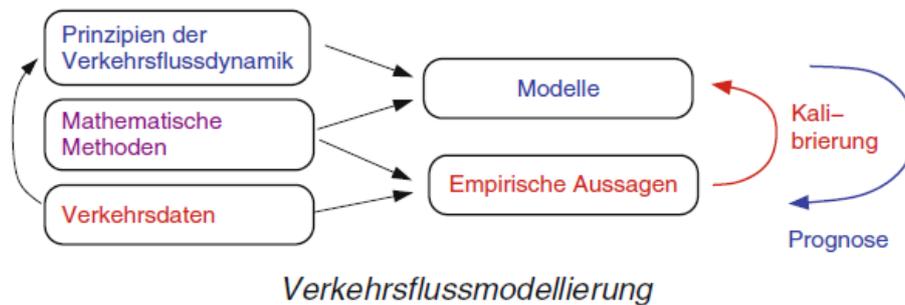


Abbildung 7: Schema der Verkehrsflussmodellierung nach Treiber und Kesting (2010)

Auf Grundlage dieser kalibrierten Modelle lassen sich anschließend Prognosen des Verkehrsflusses erstellen. Der Zusammenhang dieser einzelnen Komponenten ist Abbildung 7 zu entnehmen.

Nach Treiber und Kesting (2010) lassen sich die Modelle der Verkehrsflussdynamik inhaltlich in drei Klassen unterteilen, die im Folgenden vorgestellt werden:

Makroskopische Modelle

Die Gesamtheit des Verkehrsflusses, ohne gesonderte Berücksichtigung einzelner Fahrzeuge, wird durch *makroskopische Modelle* untersucht.

Größen makroskopischer Modelle nach Treiber und Kesting (2010):

- Verkehrsdichte $\rho(x, t)$
- Verkehrsfluss $Q(x, t)$
- mittlere Geschwindigkeit $V(x, t)$
- Geschwindigkeitsvarianz $\sigma_v^2(x, t)$

Anwendung makroskopischer Modelle:

Makroskopische Modelle eignen sich besonders zur Schätzung der Verkehrslage und ermöglichen es, diese Informationen an Navigationsgeräte zu übermitteln, um sie bei der Routenplanung zu berücksichtigen.

Mikroskopische Modelle

Im Gegensatz zu den makroskopischen Modellen ermöglichen *mikroskopische Modelle* eine Untersuchung einzelner Fahrzeuge.

Die Gesamtheit dieser einzelnen Fahrzeuge bzw. Teilchen stellt den Verkehrsstrom dar.

Größen mikroskopischer Modelle nach Treiber und Kesting (2010):

- Positionen $x_\alpha(t)$
- Geschwindigkeiten $v_\alpha(t)$
- Beschleunigungen $a_\alpha(t)$
- Zeitlücken zwischen einzelnen Fahrzeugen

Anwendung mikroskopischer Modelle:

Da mikroskopische Verkehrsmodelle einzelne Verkehrsteilnehmer beschreiben, eignen sie sich besonders zur Untersuchung des menschlichen Fahrverhaltens. Auch der Einfluss von Geschwindigkeitsbegrenzungen und Überholverboten auf den gesamten Verkehr lässt sich durch diese Modelle untersuchen. Auch bei der Bewegung von Fußgängern wird in der Regel jede Person als einzelnes Objekt behandelt. Hierzu existieren jedoch spezielle Fußgängermodelle. (Treiber und Kesting, 2010 S.53)

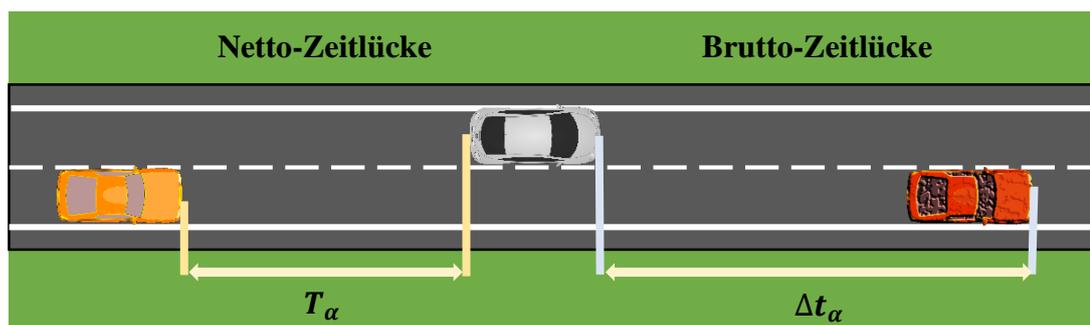


Abbildung 8: Brutto-/Netto-Zeitlücken voreinander fahrender Fahrzeuge

Bei den Zeitlücken, welche zwischen zwei voreinander fahrenden Fahrzeugen vorliegt, kann zwischen Brutto-Zeitlücke und Netto-Zeitlücke unterschieden werden. Die Netto-Zeitlücke drückt den zeitlichen Abstand der Fahrzeugfront des hinteren Fahrzeuges zum

Fahrzeugheck des vorderen Fahrzeugs aus. Brutto-Zeitlücken stellen den zeitlichen Abstand beider Fahrzeugfronten dar. (Treiber und Kesting, 2010 S.14f)

Abbildung 8 stellt den Unterschied dieser beiden Zeitlücken grafisch dar. Die Darstellung der Netto-Zeitlücke erfolgt hierbei durch die Variable T_α , während die Variable Δt_α die Brutto-Zeitlücke definiert.

Die dritte Klasse wird durch die *mesoskopischen Modelle* gebildet, die sich aus Größen makroskopischer und mikroskopischer Modelle zusammensetzen. Für die weitere Bearbeitung dieser Masterthesis sind sie nicht von Bedeutung. (Treiber und Kesting, 2010 S.54)

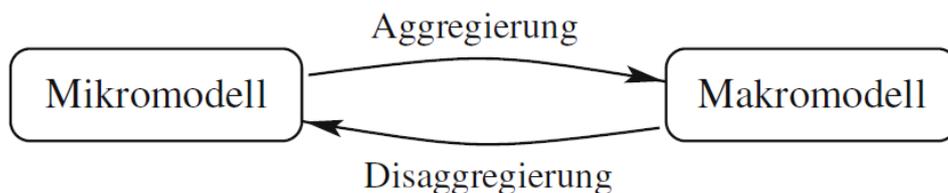


Abbildung 9: Aggregation und Disaggregation mikroskopischer und makroskopischer Modelle nach Treiber und Kesting (2010 S.54)

Abbildung 9 zeigt schematisch die Aggregation mikroskopischer Modelle zu Makromodellen und die Disaggregation makroskopischer zu mikroskopischen Modellen. Durch die Zusammenfassung mikroskopischer Größen lassen sich makroskopische Größen, wie beispielsweise das arithmetische Mittel der Geschwindigkeit aller Einzelfahrzeuge, bestimmen. Ebenso ist es mit höherem Aufwand möglich, durch Disaggregation aus makroskopischen Größen mikroskopische Größen zu generieren. (Treiber und Kesting, 2010 S.53f)

3 Anwendung raum-zeitlicher Daten in der Verkehrsforschung

In Kapitel 2 erfolgte die Präsentation von Grundlagen und Definitionen der Geoinformatik aus dem Bereich der raum-zeitlichen Datenmodellierung sowie der Verkehrsplanung. Es konnte dabei erkannt werden, dass in den vergangenen Jahren viele Forschungsprojekte die Integration von Zeit in Geoinformationssystemen behandelten und die Einführung entsprechender Standards erfolgte. Bei der Definition von Begriffen der Verkehrsforschung erfolgte die Präsentation verschiedener Erfassungsmethoden von Verkehrsdaten. Die Definition verschiedener Verkehrsmodelle zeigte zudem, dass besonders bei der Behandlung der Bewegungsprofile von Fußgängern, die Bewegungen jedes einzelnen Fußgängers betrachtet werden sollten. Dies ist deshalb besonders zu berücksichtigen, da zur Warnung vor bevorstehenden Kollisionen mit Fußgängern, nicht nur die Erfassung der Bewegungsprofile von Fahrzeugen, sondern auch die der einzelnen Fußgänger erforderlich ist. Im Folgenden soll jedoch speziell die Auswertung der Bewegungsprofile von Fußgängern betrachtet werden. Die Erfassung dieser Bewegungsprofile sowie deren Übermittlung zum Serversystem erfolgt mit Hilfe der von den Fußgängern mitgeführten Smartphones. (vgl. hierzu Kapitel 4)

Im Rahmen der Verkehrsplanung spielt die Analyse raum-zeitlicher Daten eine wichtige Rolle. Dieser Forschungsschwerpunkt ist ebenso im Bereich der Geoinformatik vorzufinden. Die in den vergangenen Jahren im Umfeld der Geoinformatik durchgeführten Forschungsprojekte im Umgang mit raum-zeitlichen Daten bieten eine entscheidende Grundlage, um die hierbei getroffenen Erkenntnisse in den Bereich der Verkehrsplanung zu übertragen. Um diese Zusammenhänge näher untersuchen zu können, ist es zunächst notwendig, die Anforderungen der Verkehrsplanung bezüglich raum-zeitlicher zusammenzustellen.

Raum-zeitliche Daten sind dynamische Daten, sofern sie eine zeitliche Veränderung von Datensätzen widerspiegeln. Besonders im motorisierten, wie auch im nichtmotorisierten Verkehr setzen sich diese Daten aus Positionen zu bestimmten Zeitpunkten zusammen.

Daraus lassen sich Geschwindigkeiten und auch, sofern entsprechende Zeitintervalle gegeben sind, Beschleunigungswerte ableiten.

Die in Kapitel 2.2.1 präsentierten Erfassungsmethoden ermöglichen es u.a. stetig aktuelle Positionsdaten von Fahrzeugen bzw. Fahrzeugströmen zu erfassen. Hierdurch ist es existentiell wichtig, diese Datensätze entsprechend ihres Erfassungszeitpunkts im direkten Zusammenhang mit ihrer Positionsinformation zu erfassen und nachhaltig zu verwalten. Dies ermöglicht ein Zurückgreifen auf ältere Verkehrsdaten. Die Entscheidung über die Aktualität und Qualität des gebotenen Datenbestandes, sowie über die notwendige Heterogenität der Datenqualität, ist ein wichtiger Bestandteil der Prognostizierung von Verkehrssituationen.

Durch die hier vorgestellten Erfassungsmethoden, kann sich der erhaltene Datenbestand aus Verkehrsdaten unterschiedlicher Genauigkeiten zusammensetzen. Sowohl in der Lage-, als auch in der Zeitinformation liegen demnach unterschiedliche Auflösungen vor, die bei späteren Analysen in Einklang gebracht werden müssen. Diese Unterschiede in der zeitlichen, wie auch räumlichen Positionsgenauigkeit erfordern Operatoren, die auch eine Analyse eines inhomogenen Datenbestandes erlauben. Hierzu zählen u.a. Abfragen bezüglich der zeitlichen Topologie, sowie der relativen Position unter verschiedenen Zeitpunkten.

3.1 Dynamische Datenbestände der Verkehrsflussmodellierung

Um die Anforderungen der Verkehrsflussmodellierung an die Geoinformatik und hierbei im Speziellen an den Umgang mit raumzeitlicher Daten definieren zu können, ist es zunächst notwendig die Inhalte der dynamischen Verkehrsdatenbestände zu untersuchen. Bei dieser Untersuchung wird weniger ein Blick auf die verkehrstechnischen Daten, als auf die raumzeitlichen Informationen dieser Datensätze geworfen.

Verkehrsdaten liefern in erster Linie Informationen über den Ort und den Zeitpunkt der Datenerfassung. Durch unterschiedliche Erfassungsmethoden, die in Kapitel 2.2.1 präsentiert wurden, liegen jedoch Lage- und Zeitinformationen unterschiedlicher Qualitäten vor. Um mit Hilfe der erfassten raumzeitlichen Daten verlässliche Prognosen erstellen zu können, ist eine Vergleichbarkeit der einzelnen Datenbestände unumgänglich.

Wie in Kapitel 2.1.3 betrachtet, stellt es nach Klopprogge und Lockemann (1983) ein erhebliches Problem dar, wenn ein aktueller Datenbestand benötigt wird, die aktuellen Daten der verschiedenen Sensoren jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst wurden. In diesem Fall wird dann der letzte Zeitpunkt gewählt, zu welchem eine Datenerfassung auf möglichst allen Sensoren stattgefunden hat, um auf diese Weise die Zuverlässigkeit des Datenbestandes zu steigern.

Durch Treiber und Kesting (2010) erfolgt die Präsentation gängiger Formeln zur Berechnung makroskopischer und mikroskopischer Größen. Mittels dieser Formeln lassen sich die wichtigsten Bestandteile der Verkehrsflussdaten ermitteln und somit Aufschlüsse über die Anforderungen an ein Geoinformation gewinnen.

Auszug der Formeln zur Berechnung mikroskopischer Größen:

Fahrzeuglänge: $l_\alpha = v_\alpha(t_\alpha^1 - t_\alpha^0)$

Formel 5: Fahrzeuglänge nach Treiber und Kesting (2010)

Brutto-Zeitlücken zwischen Fahrzeugen: $\Delta t_\alpha = t_\alpha^0 - t_{\alpha-1}^0$

Formel 6: Brutto-Zeitlücken zwischen Fahrzeugen nach Treiber und Kesting (2010)

Bruttoabstände: $d_\alpha = v_{\alpha-1}\Delta t_\alpha$

Formel 7: Bruttoabstände nach Treiber und Kesting (2010)

Formel 5 ermittelt die Fahrzeuglänge l_α , indem die Differenz der Zeitpunkte zu welchem das Fahrzeug α den Sensor mit der Fahrzeugfront t_α^0 und dem Fahrzeugheck t_α^1 überquert hat, mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v_α multipliziert wird.

Diese Formel zeigt, dass neben der einfachen Verwaltung von Positionsdaten auch eine Verwaltung von Zeitpunkten benötigt wird, um den Ansprüchen der Verkehrsflussmodellierung gerecht zu werden.

Formel 6 dient zur Berechnung der Brutto-Zeitlücken zwischen zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen. Das Ergebnis stellt die Differenz Δt_α des Zeitpunktes t_α^0 , zu welchem das hintere, und $t_{\alpha-1}^0$, zu welchem das vordere Fahrzeug den Sensor überfährt, dar. Mit Δt_α liegt neben Zeitpunkt und Position die Anforderung vor, Zeitspannen zu verwalten.

Formel 7 liefert als Ergebnis eine Distanz d_α zwischen zwei bewegten Objekten, in diesem Fall zwei Fahrzeuge.

Mikroskopische Modelle übermitteln, wie in Kapitel 2.2.2 erläutert, Informationen zu einzelnen Verkehrsteilnehmern. Durch die Anwendung makroskopischer Modelle, dessen Größen durch Aggregation mikroskopischer Größen ermittelt werden können, lassen sich Verkehrssituationen, in Form von Verkehrsströmen, über längere Zeiträume untersuchen. In der Verwaltung makroskopischer Größen bezieht sich die Dynamik der angegebenen Informationen weniger auf explizite Zeitpunkte, sondern vielmehr auf Zeitspannen. Aufgrund dieser Gegebenheit ist es ebenso erforderlich Zeitspannen in einem entsprechenden Geoinformationssystem verwalten zu können.

3.2 Zeitliche Datentypen

Die in Kapitel 3.1 durchgeführte Untersuchung zeigt, dass ein Geoinformationssystem bzw. sein zugrundeliegendes Datenmodell in der Lage sein muss, Zeitpunkte sowie Zeitspannen verwalten zu können. Ebenso ist hierbei eine, für Geoinformationssysteme ohnehin übliche, Verwaltung von Lageinformationen notwendig. Allerdings ist im weiteren Verlauf zu untersuchen, ob hierzu die Verwaltung einfacher Punktinformationen ausreicht oder in der Verkehrsflussmodellierung Linien und Flächen Verwendung finden. Des Weiteren ist besonders bei der Untersuchung von Verkehrseignissen und des Bewegungsverhaltens von Verkehrsteilnehmern die Verwaltung bewegter Objekte zu betrachten. Gerade in der Forschung raumzeitlicher Datenmodelle spielen Untersuchungen von bewegten Objekten eine wesentliche Rolle. Durch die Erfassung und Angabe von Geschwindigkeit und Beschleunigung ist es erforderlich, einen besonderen Blick auf den Umgang mit bewegten Objekten zu werfen.

Die Dynamik von Verkehrsdaten kann je nach Modelltyp durch verschiedene Typen bewegter Objekte dargestellt werden. Mikroskopische Modelle erfordern zum größten Teil die Anwendung bewegter Punkte. Makroskopische Modelle spiegeln im Gegenzug Verkehrssituationen und keine einzelnen Objekte wieder. Hierbei ist fallspezifisch zu entscheiden, ob bewegte Linien oder bewegte Flächen Anwendung finden. Die Anwendung bewegter Linien beschränkt in der Regel auf die Darstellung von sich bewegenden Verkehrsströme. Betrachtet man in makroskopischen Verkehrsmodellen die Auslastung eines speziellen Straßenabschnitts, so ändert sich dessen Lage in der Regel nicht, sondern es findet lediglich eine zeitliche Veränderung der jeweiligen verkehrsspezifischen Attribute statt.

Einen für den weiteren Verlauf der Untersuchung entscheidenden Ansatz stellt die Zusammenfassung der für die Modellierung von Verkehrsflüssen benötigten Datentypen dar. Hierbei ist besonders zu beachten, in welcher Form zeitliche, wie auch räumliche Daten in den vorgestellten Modellierungsansätzen angewandt werden. Im Umfeld der Verkehrsplanung sind viele verschiedene zeitliche Datentypen vorzufinden. So ist es beispielsweise entscheidend, ob von einem Zeitpunkt oder einer Zeitspanne gesprochen wird. Viele Ereignisse treten einmalig auf, während andere Ereignisse in regelmäßigen, als auch in unregelmäßigen Intervallen mehrfach auftreten, bzw. sich über einen längeren Zeitraum hinweg ereignen.

Auch die Lageinformationen werden durch die drei Basistypen Punkt, Linie und Fläche repräsentiert. Wie bereits in Kapitel 2.1.4 dargestellt, existieren Ansätze, um speziell diese Basistypen als bewegte Objekte zu verwalten. Hieraus ergeben sich dann die bewegten Objekte *mpoint*, *mline* und *mregion*. Die Darstellung der einzelnen Bestandteile aus dem Umfeld der Verkehrsflussmodellierung erfolgt mittels verschiedener Datentypen. Diese sind zum Teil die genannten Basistypen, wie *Line*, *Point* und *Region*, stellenweise jedoch auch bewegte Objekte, wie *mpoint*, *mline* oder *mregion*.

Ereignisse und Bestandteile des Verkehrsgeschehens sortiert nach Datentypen	
Bewegte Punkte (mpoint):	Punkt (teilweise zeitlich beschränkt)
<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsteilnehmer: <ul style="list-style-type: none"> ○ motorisierte Fahrzeuge ○ nicht motorisierte Fahrzeuge ○ Fußgänger 	<ul style="list-style-type: none"> • Unfälle • Gegenstände auf Fahrbahn • Baustellen • Verkehrsschilder • Schranken
Bewegte Linien (mline):	Linie (teilweise zeitlich beschränkt)
<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsströme • Stau 	<ul style="list-style-type: none"> • Straßennetz • Sperrungen
Bewegte Flächen (mregion):	Fläche (teilweise zeitlich beschränkt)
<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsstörungen • Veranstaltungen • Wetterereignisse 	<ul style="list-style-type: none"> • Siedlungen • Ballungsbereiche (Pendlerzonen usw.)

Tabelle 2: Ereignisse und Bestandteile des Verkehrsgeschehens sortiert nach Datentypen.

Tabelle 2 zeigt einen Auszug einiger Daten aus dem Umfeld der Verkehrsforschung. Die linke Spalte der Tabelle zeigt eine Übersicht von bewegten Objekten, sortiert nach *mpoint*, *mline* und *mregion*. Demnach sind Verkehrsteilnehmer dem Datentyp *mpoint* zugewiesen. Verkehrsströme und Staus erhalten den Datentyp *mline*, da sich ihre Ausmaße im Laufe der Zeit verändern können. Bewegte Flächen sind beispielsweise Verkehrsstörungen, Veranstaltungen und Wetterereignisse. Auch ihre Ausmaße können sich mit der Zeit verändern, ebenso ihre Position.

In der rechten Spalte der Tabelle sind hingegen Objekte aufgelistet, deren Position oder Ausmaße sich in aller Regel nicht verändern. Allerdings kann ihre Existenz unter Umständen durch einen Start- und Endzeitpunkt zeitlich begrenzt sein. Hierzu zählen beispielsweise Unfälle, Gegenstände auf der Fahrbahn, kleine Baustellen, Verkehrsschilder oder Schranken, welche als Punkte definiert werden. Als Linie sind die Segmente des Straßennetzes oder Sperrungen zu behandeln. Siedlungen oder Ballungsbereiche werden

als Flächen behandelt. Zu beachten ist jedoch, dass die Zuweisung der genannten Datentypen immer vom entsprechenden Anwendungsfall abhängt und die dargestellte Tabelle lediglich eine mögliche Vorgehensweise aufzeigt.

Diese Zuordnung verdeutlicht, dass eine Verknüpfung der beiden Fachgebiete Verkehr und Geoinformatik im weitesten Sinne bereits existiert. Neben den räumlichen und zeitlichen Datentypen sind besonders die Datentypen bewegter Objekte zu berücksichtigen. Wie in Tabelle 2 aufgeführt, verfügen Verkehrsdaten über verschiedene Komponenten, die bei Analysen als dynamische Daten zu behandeln sind. Um Verkehrsdaten raumzeitlichen Analysen zu unterziehen, können somit, die in DIN EN ISO 19108 (2005-05) und Güting et al. (2000) eingeführten Datentypen, sowie die entsprechenden Operatoren verwendet werden.

In Kapitel 2.1.2 wurde gezeigt, dass durch die Einführung der DIN EN ISO 19108 (2005-05) in der Geoinformatik eine klare Norm zum Umgang mit raumzeitlichen Daten geschaffen wurde. Dabei wurde auch auf die, durch Güting et al. (2000) definierten, Datentypen verwiesen. Die hier gesammelten Anforderungen der Verkehrsflussmodellierung lassen sich mit diesen Datentypen in Verbindung bringen. Ebenso stellen die, durch DIN EN ISO 19108 (2005-05) definierten, Zeittypen eine Grundlage dar, die zur Verkehrsflussmodellierung benötigten Daten nach dem Typ ihrer Zeitinformation zu sortieren und somit für eine verständliche Strukturierung zu sorgen.

Verkehrsdaten liefern neben räumlichen Informationen auch Zeitangaben, die nach DIN EN ISO 19108 (2005-05) in unterschiedliche Typen unterteilt werden können. So ist bei Zeitangaben u.a. zwischen Zeitpunkten und Zeitspannen zu unterscheiden.

Diese Grundlagen bieten die Möglichkeit, entsprechende raum-zeitliche Datenmodelle zu generieren, die zur Erfüllung der Anforderungen der Verkehrsflussmodellierung dienen.

3.3 Zeitliche Operatoren

Nachdem nun die erforderlichen Datentypen zusammengetragen wurden, ist es für die weiteren Untersuchungen notwendig, mit der Ermittlung der benötigten Operatoren fort-

zufahren. Hierzu müssen die Aufgabenstellungen der Verkehrsflussmodellierung klar definiert werden. Zusätzlich ist die Frage zu klären, welche Genauigkeiten die zeitlichen, aber auch räumlichen Datenbestände erfüllen müssen, um schlussendlich zuverlässige Analyseergebnisse zu ermöglichen.

Im Rahmen der Verkehrsforschung wird sich besonders mit der Frage beschäftigt, welchen Einfluss ein bestimmtes Ereignis auf den Verkehrsfluss hat. Um diese Frage beantworten und Prognosen über das zu erwartende Verkehrsaufkommen stellen zu können, muss der Verkehrsfluss möglichst realitätsnah zu diesem bestimmten Ereignis modelliert werden. Auch ist es für die Warnung von Verkehrsteilnehmern entscheidend, wie zuverlässig die erstellten Analyseergebnisse sind.

Wie auch in der räumlichen Geometrie, wird in der zeitlichen Dimension zwischen geometrischen Primitiven unterschieden. Diese lassen sich in Zeitpunkte und Zeitspannen unterteilen. In DIN EN ISO 19108 (2005-05) repräsentieren diese beiden Primitiven die Unterklassen der abstrakten Klasse *TM_GeometricPrimitive*. Hierbei stellt die Unterklasse *TM_Instant* Zeitpunkte dar, die als nulldimensionale geometrische Primitive zu betrachten sind und über das Attribut *position* verfügen, das die Position des Zeitpunktes entlang der Zeitachse definiert. Die Angabe eines Zeitpunktes erfolgt nach DIN EN ISO 19108 (2005-05) stets in Bezug auf ein zeitliches Referenzsystem. Diese Definition eines Zeitpunktes ist direkt auf das vorliegende Fallbeispiel zu übertragen. Auch im Straßenverkehr sind Ereignisse, wie beispielweise Unfälle, klar einem Zeitpunkt zuzuordnen.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Zeitpunkt, zu welchem der jeweilige Unfall geschehen ist, nicht immer ausschlaggebend für daraus resultierende Verkehrsbehinderungen sein muss. Vielmehr ist entscheidend, wie lange ein Straßenabschnitt durch den Unfall beeinträchtigt bzw. voll gesperrt ist. In diesem Fall ist die, ebenfalls in der DIN EN ISO 19108 (2005-05) vorzufindende, Definition der Unterklasse *TM_Period* anzuwenden. Im Gegensatz zum nulldimensionalen Zeitpunkt stellt eine Periode ein eindimensionales geometrisches Primitiv dar, das die Ausdehnung der Zeit entlang der Zeitachse, beginnend an einem Startpunkt und endend an einem Endpunkt, definiert. Nach DIN EN ISO 19108 (2005-05) besteht hierbei die Bedingung, dass der Startzeitpunkt immer vor dem Endzeitpunkt liegen muss.

Ein Unfall, der zunächst durch einen Zeitpunkt definiert wurde, kann sich somit durch Kombination mit der ausgelösten Behinderung zu einer zeitlichen Periode weiterentwickeln. Der Zeitpunkt, zu welchem sich der Unfall ereignete, stellt in diesem Fall den Startpunkt der zeitlichen Periode dar. In diesem Fall verändert sich neben der zeitlichen Ausdehnung auch ggf. die räumliche Ausdehnung des betrachteten Objekts. Ein Unfall, der zuvor als punktuellere Ereignis, zu einem bestimmten Zeitpunkt, definiert wurde, stellt nach Berücksichtigung der resultierenden Verkehrsstörung, ein Objekt mit zeitlich veränderlicher Ausdehnung dar.

3.3.1 Relative Position zweier TM_Primitive

Auf Grundlage dieser beiden Klassen liefert DIN EN ISO 19108 (2005-05) Operatoren, die insbesondere zeitliche Abfragen ermöglichen. Hierzu zählen u.a. Abfragen zur Bestimmung der relativen zeitlichen Position eines Primitiv zu einem anderen Primitiv (*TM_Order.relativePosition*). Neben der Bestimmung der relativen Position zweier Zeitpunkte zueinander ermöglicht dieser Operator auch die Ermittlung der relativen Position eines Zeitpunktes zu einer Periode. Bereits Allen (1983) behandelte die unterschiedlichen relativen Positionen, die zwei zeitliche Objekte zueinander einnehmen können.

Relative Position eines Zeitpunktes A zu einem weiteren Zeitpunkt B



Abbildung 10: Relative Position eines Zeitpunktes A zu einem Zeitpunkt B

Tabelle 3: Bedingungen und Rückgabewerte der relativen Position eines Zeitpunktes A zu einem Zeitpunkt B nach DIN EN ISO 19108 (2005-05)

Bedingung (IF)	Rückgabe
A.position < B.position	Vorher
A.position = B.position	Gleich
A.position > B.position	Danach

Durch die Überprüfung dieser Bedingungen lassen sich Abfragen gestalten, die ermitteln, ob ein Zeitpunkt A vor, zeitgleich oder nach einem Zeitpunkt B stattgefunden hat. Dieser Operator ermöglicht es besonders in der Analyse von Verkehrsdaten, die zeitliche Abfolge von Ereignissen, die sich rund um das Verkehrsgeschehen ereignet haben, zu bestimmen. Hierbei lässt sich u.a. beantworten, ob ein Verkehrsunfall vor, während oder nachdem ein Fahrzeug eine bestimmten Position passiert hat, stattfindet.

Ebenso bietet der Operator *TM_RelativePosition* die Möglichkeit die Relative Position einer Periode A zu einem Zeitpunkt B zu bestimmen.

Relative Position einer Periode A zu einem Zeitpunkt B



Abbildung 11: Relative Position einer Periode A zu einem Zeitpunkt B

Tabelle 4: Bedingungen und Rückgabewerte der relativen Position einer Periode A zu einem Zeitpunkt B nach DIN EN ISO 19108 (2005-05)

Bedingung (IF)	Rückgabe
$A.end.position < B.position$	Vorher
$A.end.position = B.position$	Endet bei
$A.begin.position < B.position$ AND $A.end.position > B.position$	beinhaltet
$A.begin.position = B.position$	Beginnt bei
$A.begin.position > B.position$	Danach

Im Gegensatz zur relativen Position zweier Zeitpunkte muss bei dieser Abfrage beachtet werden, dass eine Gegenüberstellung zweier unterschiedlicher zeitlicher Primitive erfolgt. Durch die Berücksichtigung des Start- $A.begin.position$ und Endzeitpunktes $A.end.position$ der Periode A, liefert der Rückgabewert nicht nur die Information,

ob der Zeitpunkt B vor oder nach der Periode A liegt, sondern auch, ob die Periode A zu Zeitpunkt B beginnt, endet oder ob sich der Zeitpunkt B innerhalb der Periode A befindet. Mit diesem Operator ist es im Rahmen der Verkehrsforschung u.a. möglich, Unfälle zu selektieren, welche sich beispielsweise während eines bestimmten Unwetters aufgetreten sind. Das Unwetter wird in diesem Fall als Periode betrachtet, während ein Unfall genau zu einem bestimmten Zeitpunkt geschehen ist.

Relative Position eines Zeitpunktes A zu einer Periode B

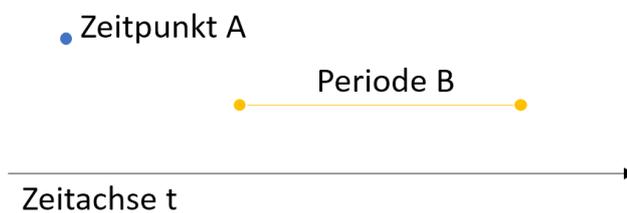


Abbildung 12: Relative Position eines Zeitpunktes A zu einer Periode B

Tabelle 5: Bedingungen und Rückgabewerte der relativen Position eines Zeitpunktes A zu einer Periode B nach DIN EN ISO 19108 (2005-05)

Bedingung (IF)	Rückgabe
A.position < B.begin.position	Vorher
A.position = B.begin.position	Beginnt
A.position > B.begin.position AND A.position < B.end.position	Während
A.position = B.end.position	Endet
A.position > B.end.position	Danach

Hingegen umgekehrt ist die Vorgehensweise, wenn die relative Position eines Zeitpunktes A zu einer Periode B bestimmt werden soll. Hier kann als Rückgabewert während geliefert werden, wodurch ausgedrückt wird, dass der Zeitpunkt A während Periode B stattfindet. Dieser Operator ermöglicht u.a. die Untersuchung, welches Wetter zum Zeitpunkt eines Unfalls herrschte oder ob der Unfall während oder kurz nach einem Starkregen vorgefallen ist. Hierbei sind ebenfalls die Wetterereignisse als Perioden zu verwalten,

während Unfälle als einzelne Zeitpunkte angenommen werden. Speziell im Pendlerverkehr fällt auf, dass während den Schulferien oder während Grippewellen ein niedrigeres Verkehrsaufkommen auf den Straßen zu verzeichnen ist, als außerhalb dieser zeitlich begrenzten Ereignissen. So ermöglicht dieser Operator auch eine Selektion aller Unfälle, die sich während oder außerhalb der Ferienzeit ereignet haben. Kombiniert mit dem Ort des Unfallgeschehens und der Betrachtung der genauen Tageszeit, lassen sich somit Rückschlüsse darauf ziehen, ob es während der Ferienzeit zu weniger Verkehrsunfällen im Pendlerverkehr kommt, als außerhalb der Ferienzeit.

Relative Position einer Periode A zu einer Periode B

Einen ebenfalls nicht unerheblichen Beitrag zur Analyse von Verkehrsdaten bietet der Operator zur Bestimmung der relativen Position einer Periode A zu einer weiteren Periode B. Wie bereits in den zuvor präsentierten Operatoren, werden auch hier zur Überprüfung der gesetzten Bedingungen die Anfangs- und Endzeitpunkte der Perioden untereinander verglichen.



Abbildung 13: Relative Position einer Periode A zu einer Periode B

Die Gültigkeit eines Datensatzes definiert sich, sofern vorhanden, über dessen Start- und Endzeitpunkte. In der Verkehrsforschung ist dies u.a. bei der Angabe von Staus gegeben. Ein Stau ist somit durch eine zeitliche Periode zu definieren, die zu einem Zeitpunkt t_A beginnt und zu einem Zeitpunkt t_E endet. Betrachtet man im Rahmen der Verkehrsforschung Ereignisse wie Schulferien unterschiedlicher Bundesländer, Grippewellen, Bahnstreiks oder andere zeitlich begrenzte verkehrsbeeinflussende Faktoren als zeitliche Perioden, so können deren Zusammenhänge mittels dieses Operators näher untersucht werden.

Diese Vorgehensweise ermöglicht die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen unterschiedlichen Verkehrsstörungen und potentiellen Verursachern, wie beispielweise Ferienzeiten der einzelnen Bundes- und Nachbarländer, Bahnstreiks, Grippewellen usw. Die hier genannten Faktoren können je nach ihrer Intensität zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen auf einzelnen Straßenabschnitten führen.

Tabelle 6: Bedingungen und Rückgabewerte der relativen Position einer Periode A zu einer Periode B nach DIN EN ISO 19108 (2005-05)

Bedingung (IF)	Rückgabe
A.end.position < B.begin.position	Vorher
A.end.position = B.begin.position	Trifft
A.begin.position < B.begin.position AND A.end.position > B.begin.position AND A.end.position < B.end.position	Überlappt
A.begin.position = B.begin.position AND A.end.position < B.end.position	Beginnt
A.begin.position = B.begin.position AND A.end.position > B.end.position	Beginnt bei
A.begin.position > B.begin.position AND A.end.position < B.end.position	Während
A.begin.position < B.begin.position AND A.end.position > B.end.position	Beinhaltet
A.begin.position = B.begin.position AND A.end.position = B.end.position	Ist gleich
A.begin.position > B.begin.position AND A.begin.position < B.end.position AND A.end.position > B.end.position	Überlappt von
A.begin.position > B.begin.position AND A.end.position = B.end.position	Endet
A.begin.position < B.begin.position AND A.end.position = B.end.position	Endet bei
A.begin.position = B.end.position	Getroffen von
A.begin.position > B.end.position	Danach

3.3.2 Zeitlicher Abstand und zeitliche Länge nach DIN EN ISO 19108

Die Klasse *TM_Separation* liefert zwei weitere Operatoren, die ebenfalls Bestandteil der DIN EN ISO 19108 (2005-05) sind. Mit Hilfe der Operatoren *length()* und *distance()* lassen sich sowohl die Länge einer zeitlichen Periode, als auch die Distanz zweier zeitlicher Primitive ermitteln.

Die hierbei gelieferten Rückgabewerte sind dem Datentyp *TM_Duration* zuzuordnen, der sich in die Untertypen *TM_PeriodDuration* und *TM_IntervalLength* unterteilt.

length(): Dieser Operator liefert die Länge von *TM_GeometricPrimitive*. Wird dieser Operator auf *TM_Instant* angewandt, so ist das Ergebnis stets Null. Zur Ermittlung der Länge einer zeitlichen Periode wird der Abstand zwischen dem Anfangs- und dem Endzeitpunkt dieser Periode ermittelt.

Anwendungsbeispiel: In Bezug auf die Verkehrsflussmodellierung bedeutet dies, dass ein durch einen Zeitpunkt definierten Unfall, keinerlei Informationen darüber vorliegen, wie lange der entsprechende Streckenabschnitt behindert bzw. gesperrt ist. Hierzu ist es notwendig, die Sperrung bzw. Behinderung als Periode zu verwalten, um mittels dieses Operators die Dauer der Verkehrsbehinderung ermitteln zu können.

distance(): Der Operator *distance()* dient zur Bestimmung der zeitlichen Distanz zwischen zwei zeitlichen Primitiven. Als Distanz wird hierbei der Abstand der beiden nächstgelegenen *TM_GeometricPrimitives* ermittelt. Bei zwei zeitlichen Perioden wird somit der Abstand zwischen dem Endzeitpunkt der ersten und dem Anfangszeitpunkt der zweiten Periode bestimmt. Überlappen oder berühren sich zwei Primitive, so ist der ermittelte Abstand NULL. Zur Ermittlung des zeitlichen Abstands sollten beide *TM_TemporalPositions* dem gleichen zeitlichen Referenzsystem *TM_ReferenceSystem* angehören.

Anwendungsbeispiel: Der Operator *distance()* dient im Rahmen des hier gezeigten Fallbeispiels beispielsweise zur Ermittlung des zeitlichen Abstandes zweier Fahrzeuge. Dabei muss lediglich der Abstand zwischen den beiden Zeitpunkten ermittelt werden, zu welchen die beiden Fahrzeuge sich an der gleichen Position befunden haben. Passiert Fahrzeug A zum Zeitpunkt t_i und Fahrzeug B zum Zeitpunkt t_{i+1} die glei-

che Induktionsschleife, so liefert *distance()* den zeitlichen Abstand dieser beiden Fahrzeuge. In Abbildung 8 wird dieser zeitliche Abstand zweier Fahrzeuge grafisch dargestellt.

3.4 Referenzsysteme

Zur Sammlung und Untersuchung der Anforderungen, welche seitens der raumzeitlichen Geoinformationssysteme gegenüber der Verkehrsflussmodellierung zu erfüllen sind, erscheint es als unumgänglich, diesen räumlichen und zeitlichen Referenzsystemen die nötige Aufmerksamkeit zu widmen. Im Rahmen dieser Untersuchung wird zusätzlich auf die gegebenen, sowie die erforderlichen Genauigkeiten der Lage- und Zeitinformationen eingegangen. (Widmann, 2001)

3.4.1 Räumliche Referenzsysteme in der Verkehrsforschung

Der Lagebezug in der Verkehrsforschung findet in der Regel, je nach gewähltem Verkehrsmodell, innerhalb eines Netzwerks und somit eines Knoten-Kanten-Modells statt. Eine räumliche Positionsangabe kann dabei auf unterschiedliche Weisen erfolgen. (Fellendorf und Haupt, 2003). Gleiches gilt auch für die Angabe zeitlicher Positionen.

Die Geoinformatik beschäftigt sich in erster Linie mit der Verwaltung räumlicher Daten. Räumliche Lageinformationen können auf unterschiedliche Weisen übermittelt werden. Bezogen auf das hier behandelte Fallbeispiel, kann die Angabe von Lageinformation der Verkehrsdaten zum einen durch Bezug auf das Straßennetz erfolgen und zum anderen durch die Angabe absoluter Koordinaten. Betrachtet man beispielsweise Querschnittsdaten, die durch Induktionsschleifen erfasst wurden, so wird deren Lage durch die Position der entsprechenden Induktionsschleife definiert.

Die hierbei erfassten Daten dienen dann als Näherungswert für den jeweiligen Straßenabschnitt. Anders verhält es sich bei der Verarbeitung von Floating-Car-Daten. Im Gegensatz zu den Querschnittsdaten, die sich in ihrer Position lediglich der entsprechenden Zählstelle zuweisen lassen, bieten Floating-Car-Daten Lageinformationen jedes einzelnen Fahrzeugs, sofern dieses mit entsprechenden Sendern ausgestattet ist. Die Koordinaten der Floating-Cars liegen dann als GPS-Koordinaten vor.

3.4.2 Zeitliche Referenzsysteme in der Verkehrsforschung

Mit Blick auf die Definitionen und Festsetzungen der DIN EN ISO 19108 (2005-05) lassen sich drei unterschiedliche Arten von zeitlichen Referenzsystemen betrachten. Hierzu zählen zum einen die klassische Zeitangabe mittels Kalender und Uhrzeit, ordinale Referenzsysteme sowie zeitliche Koordinatensysteme.

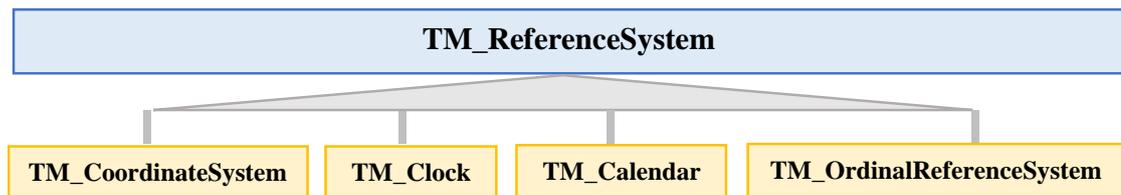


Abbildung 14: Untergliederung der Klasse *TM_ReferenceSystem* nach DIN EN ISO 19108 (2005-05)

Kalender / Uhrzeit – *TM_Calendar* / *TM_Clock*

Zur Angabe von Zeitinformationen mittels Kalender und Uhrzeit setzt ISO 8601 (2006-09) die Verwendung des Gregorianischen Kalenders sowie die Uhrzeit in einem lokalen 24-Stundenformat oder der Koordinierten Weltzeit (UTC) voraus. Für diese Zwecke dienen die, in DIN EN ISO 19108 (2005-05) präsentierten, Typen *TM_Clock* und *TM_Calendar* des Pakets *TM_ReferenceSystem*.

Der Typ *TM_Calendar* bietet die Möglichkeit, Zeitinformationen mittels Datumsangabe tagessgenau entsprechend dem System des gregorianischen Kalenders anzugeben.

Bezug zu Verkehrsflussmodellierung

Speziell bei der makroskopischen Verkehrsmodellierung genügt die Angabe eines Datums, um die entsprechende mittlere Geschwindigkeit innerhalb eines Straßenabschnittes anzugeben. Um die mittlere Geschwindigkeit zwischen beispielsweise 12:00 Uhr und 15:00 Uhr eines Kalendertages zu übermitteln, ist es notwendig, die zeitliche Auflösung durch Hinzunahme des Typs *TM_Clock* zu erweitern. Aber auch bei der Verwaltung von Tagesbaustellen kann die Uhrzeit eine entscheidende Rolle spielen. So ist beispielsweise auf einigen Straßenabschnitten mit einer größeren Verkehrsbehinderung zu rechnen,

wenn die Baumaßnahme zu den Zeiten des Berufsverkehrs stattfindet, als zu Zeiten schwächeren Verkehrsaufkommens. Die reine Angabe eines Kalenderdatums genügt daher in der Regel nicht.

Zeitliches ordinales Referenzsysteme – TM_OrdinalReferenceSystem

In zeitlichen ordinalen Referenzsystemen werden einzelne Ereignisse untereinander gemäß ihrer relativen Position sortiert. Dabei verfügt die zeitliche Abfolge der betrachteten Ereignisse über einen höheren Stellenwert als ihre zeitlichen Abstände. Diese Art von zeitlichen Referenzsystem bietet sich besonders dann an, wenn zwar bekannt ist, dass ein Ereignis A vor einem Ereignis B stattgefunden haben kann, aber der genaue zeitliche Abstand beider Ereignisse nur unzureichend oder gar nicht bekannt ist. Aufbauend auf einer Ordinalskala findet die Sortierung einzelner Ereignisse gemäß ihrer zeitlichen Abfolge statt. Ereignisse, die in ihrer zeitlichen Abfolge in einem gesonderten Verhältnis zueinander stehen, sind dabei Teil einer separaten Epoche. Somit stellt ein zeitliches ordinales Referenzsystem eine chronologische Aneinanderreihung solcher ordinalen Epochen dar. (19108, 2005-05; Frank, 1998)

Bezug zur Verkehrsflussmodellierung

Durch den Grundsatz, Ereignisse lediglich nach ihrer zeitlichen Abfolge zu sortieren, stellen zeitlich ordinale Referenzsysteme eine durchaus nützliche Alternative zur konservativen Zeitangabe mittels Datum und Uhrzeit bzw. der Verwendung eines zeitlichen Koordinatensystems dar. Nicht alle Ereignisse, die sich im Verkehrsgeschehen ereignen, sind an eine feste Uhrzeit gebunden. So ist es durchaus interessanter, ob ein Stau vor oder nach einem Verkehrsunfall in direkter Umgebung entstanden hat. Wann sich der Unfall exakt ereignet hat, ist hierbei nebensächlich. Es ist vielmehr interessant, ob er zur Entstehung des Staus geführt hat oder ob der Unfall vielleicht sogar durch den Stau ausgelöst wurde.

Zeitliche Koordinatensysteme – `TM_CoordinateSystem`

Eine Zeitangabe mittels zeitlichem Koordinatensystem erfolgt unter Verwendung des Typs `TM_CoordinateSystem`. Bei dieser Variante besteht das zeitliche Koordinatensystem aus einer Skala mit gleichbleibenden Zeitintervallen. Die Ermittlung von Distanzen zwischen zeitlichen Positionen wird dabei im Gegensatz zur Angabe mittels Datum und Uhrzeit erleichtert. Der Typ `TM_CoordinateSystem` beinhaltet die beiden Attribute *origin* und *interval*. Das Attribut *origin* definiert den Ursprung des Koordinatensystems in Form des Typs `DateTime`. Hierbei dient der Gregorianische Kalender zur Angabe des Datumsformats und UTC zur Angabe der Uhrzeit. *Interval* legt in Form eines `CharacterStrings` das Basisintervall der Koordinatensystemskala fest.

Zusätzlich zu diesen beiden Attributen bietet `TM_CoordinateSystem` zwei Operatoren – `transformCoord` und `transformDateTime` - zur Transformation zwischen üblichen Zeitangabe mittels Datum und Uhrzeit und dem vorliegenden Koordinatensystem.

Bezug zur Verkehrsflussmodellierung

Ein zeitliches Koordinatensystem kommt in der Verkehrsplanung im Grunde dann zum Einsatz, wenn der zeitliche Abstand zweier Ereignisse lediglich in Sekunden angegeben wird und ausgehend von einer bekannten Uhrzeit, alle weiteren Uhrzeiten oder Kalendertage bestimmt werden. Als Beispiel wäre hier die Vorgehensweise der Smartphone-Applikation Scout zu nennen.

getTimeToDestination

```
public long getTimeToDestination()
```

Returns the time left to reach the destination from this advice.

Returns:

the time left to reach the destination, in seconds

Abbildung 15: Auszug aus der API-Dokumentation des Scout-Dienstes. (Scout, 2015)

Hier erfolgt die Angabe der Zeit bis zur Ankunft am Zielort in Sekunden. Ist die aktuelle Uhrzeit bekannt, kann ausgehend von dieser die Uhrzeit bestimmt werden, zu welcher der Zielort erreicht wird. Aufschluss hierüber gibt ein Auszug der Dokumentation der Skobbler API. Dort ist, wie in Abbildung 15 dargestellt, unter der Klasse `SKRouteAdvice`

die Methode *getTimeToDestination* zu finden. Diese liefert einen Rückgabewert des Typs *long*, die Anzahl an Sekunden, die benötigt werden, um von der Position des Smartphones zum Zielort zu gelangen. (Scout, 2015)

3.5 Topologie zeitlicher Objekte

Zeitliche Objekte verfügen untereinander ebenso über ein topologisches Verhältnis wie räumliche Objekte. In Kapitel 3.3.1 wurden die hierzu definierten Bedingungen bereits vorgestellt. Durch DIN EN ISO 19108 (2005-05) wird ein Typ eingeführt, der zur Verwaltung zeitlich topologischer Beziehungen einzelner zeitlicher Primitive Verwendung findet. Dieser Typ heißt *TM_TopologicalPrimitive* und verfügt über zwei weitere Unterklassen *TM_Edge* und *TM_Node*. Eine eindimensionale Kante (*TM_Edge*) wird stets aus zwei nulldimensionalen Knoten (*TM_Node*) gebildet. Eine Kante stellt damit eine Verbindung zweier Knoten und somit zweier Zeitpunkte dar. Auf diese Weise wird nicht die zeitliche Position übermittelt, sondern die zeitliche Verbindung zweier Objekte. Dies kann besonders dann Anwendung finden, wenn lediglich die Chronologie zeitlicher Objekte von Interesse ist, so wie es beispielsweise in zeitlichen ordinalen Referenzsystemen geschieht. Die Klassen *TM_Edge* und *TM_Node* ermöglichen allerdings auch eine direkte Verbindung zu einem entsprechenden geometrischen Primitiv. So können Verbindungen zwischen einem *TM_Edge* und einer entsprechenden Zeitspanne, sowie einem *TM_Node* und einem entsprechendem Zeitpunkt hergestellt werden. Dies lässt eine Verbindung topologischer und geometrischer Primitiver zu. Knoten repräsentieren die Anfangs- bzw. Endzeitpunkte einer Kante. Hierbei kann ein Knoten als Anfangs- oder Endzeitpunkt mehrerer Kanten genutzt werden. Eine Verbindung mehrerer Knoten und Kanten wird als topologischer Komplex (*TM_TopologicalComplex*) bezeichnet. Ein topologischer Komplex besteht somit aus mehreren miteinander verknüpften topologischen Primitiven. Zu beachten ist dabei, dass ein topologisches Primitiv Bestandteil lediglich eines topologischen Komplexes sein darf. Teilen sich mehrere Kanten einen Knoten, so ist es auf diese Weise möglich neben linearen, auch nichtlineare Zeitverläufe darzustellen, wie es bereits in 2.1.1 beschrieben wurde. (DIN EN ISO 19108, 2005-05)

4 Konzeptionierung

In Kapitel 3 wurden die Anforderungen der Verkehrsforschung an raum-zeitliche Geoinformationssysteme präsentiert. Dabei stand speziell die Betrachtung der Zeitkomponente im Vordergrund. Anhand von Beispielen wurde die Topologie zeitlicher Objekte näher untersucht und ein Bezug zur Verkehrsforschung hergestellt. Ebenso erfolgte die Vorstellung zeitlicher Datentypen sowie Operatoren. Durch die Untersuchung von Formeln aus dem Bereich der Verkehrsforschung ließ sich der Bedarf zeitlicher Informationen erkennen. Im nächsten Schritt heißt es nun, diese Anforderungen mit den in Kapitel 2 präsentierten raum-zeitlichen Datenmodellen und Konzepten in Einklang zu bringen und entsprechende Optimierungen und Anpassungen vorzunehmen, um auf diese Weise eine Verknüpfung beider Wissenschaften herzustellen. Die folgende Grafik soll einen schematischen Überblick über diese Verknüpfung zwischen Verkehrsforschung und Geoinformatik liefern.

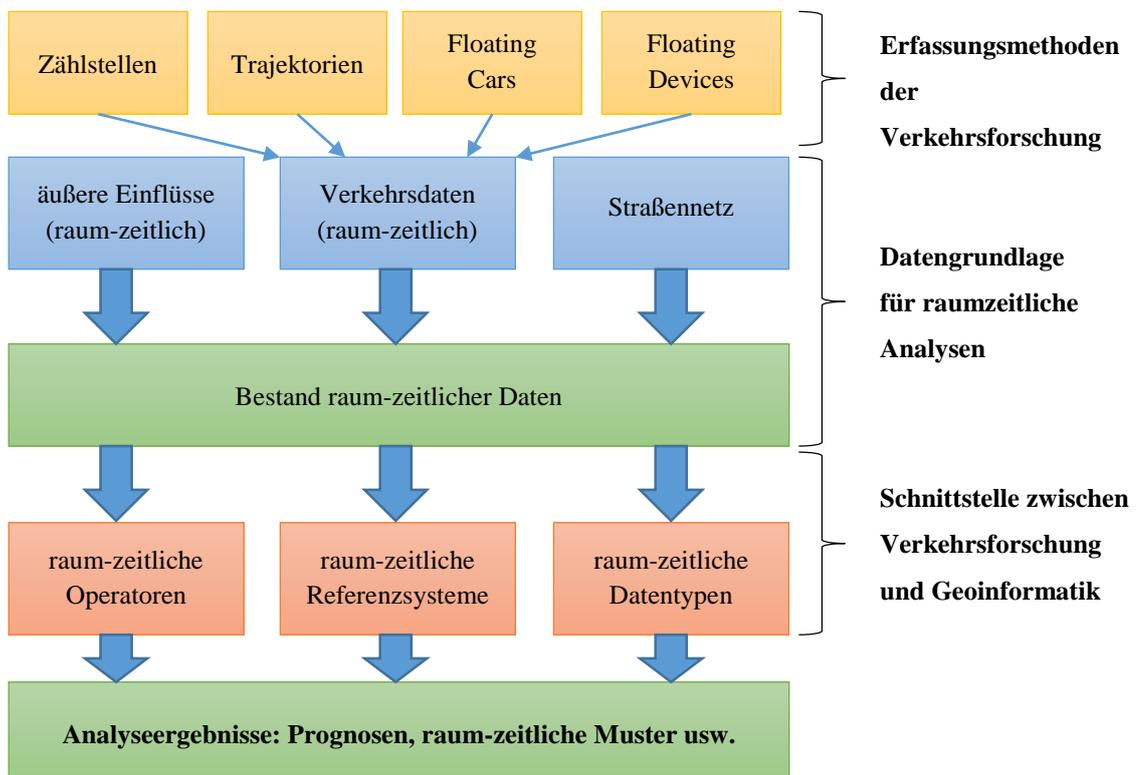


Abbildung 16: Datenerfassung, Datenbestandteile und Weiterverarbeitung raum-zeitlicher Daten in der Verkehrsforschung.

Die obige Grafik zeigt, dass raum-zeitliche Operatoren, Referenzsysteme und Datentypen als Bindeglied zwischen der Verkehrsforschung und der Geoinformatik zu betrachten sind.

Zunächst wurde in Kapitel 2 auf die in den vergangenen Jahren entwickelten unterschiedliche Verfahren und Vorgehensweisen hingewiesen, die bei der Erfassung und Speicherung raum-zeitlicher Datenbestände einen möglichst geringen Speicherbedarf in Anspruch nehmen.

Durch das Vermeiden redundanter Datensätze lässt sich somit das Datenvolumen deutlich verringern. Bezogen auf das hier behandelte Thema Verkehrsforschung und die Erfassung von Bewegungsprofilen, ist die Minimierung von Speicherplatz und des zu übertragenden Datenvolumen von besonderer Bedeutung. Da durch Bewegungsprofile von Smartphone-Nutzern und weiteren Teilnehmern des Straßenverkehrs ein möglichst engmaschiges Sensornetzwerk entstehen soll, ist es notwendig, bedingt durch die Masse der dabei erfassten Daten, nur die Daten zu erfassen, welche für die geplanten Auswertungen von Relevanz sind.

Daher wird eine Anwendung, der in Kapitel 2.1.1 diskutierten klassischen Snapshot-Methode zu erheblichen Problemen führen. Diese Methode hat zur Konsequenz, dass in einem festgelegten zeitlichen Intervall die Speicherung der aktuellen raum-zeitlichen Daten aller Verkehrsteilnehmer erfolgt. Der resultierende Speicherbedarf würde hierdurch so enorm steigen, dass er jegliche Kapazitätsgrenze sprengt. (Asahara et al., 2015)

Somit ist bereits klar, dass die Zuordnung von Positionen eines Objekts nicht über den entsprechenden Zeitpunkt erfolgen kann. Sinnvoller ist es hier, lediglich dann neue Datensätze anzulegen, wenn tatsächlich ein Positionswechsel eines einzelnen Objekts stattgefunden hat (siehe auch Kapitel 4.1.3).

Zur Konzeptionierung eines entsprechenden Datenmodells und der Erarbeitung einer Verbindung zwischen den Wissenschaften der Geoinformatik und Verkehrsforschung, erweist es sich als sinnvoll, zunächst die in Kapitel 2 getroffenen Aussagen bzgl. bisher abgehandelter Forschungsprojekte der Geoinformatik in direkten Bezug zu dem hier diskutierten Themenbereich, der Verkehrsmodellierung, zu bringen.

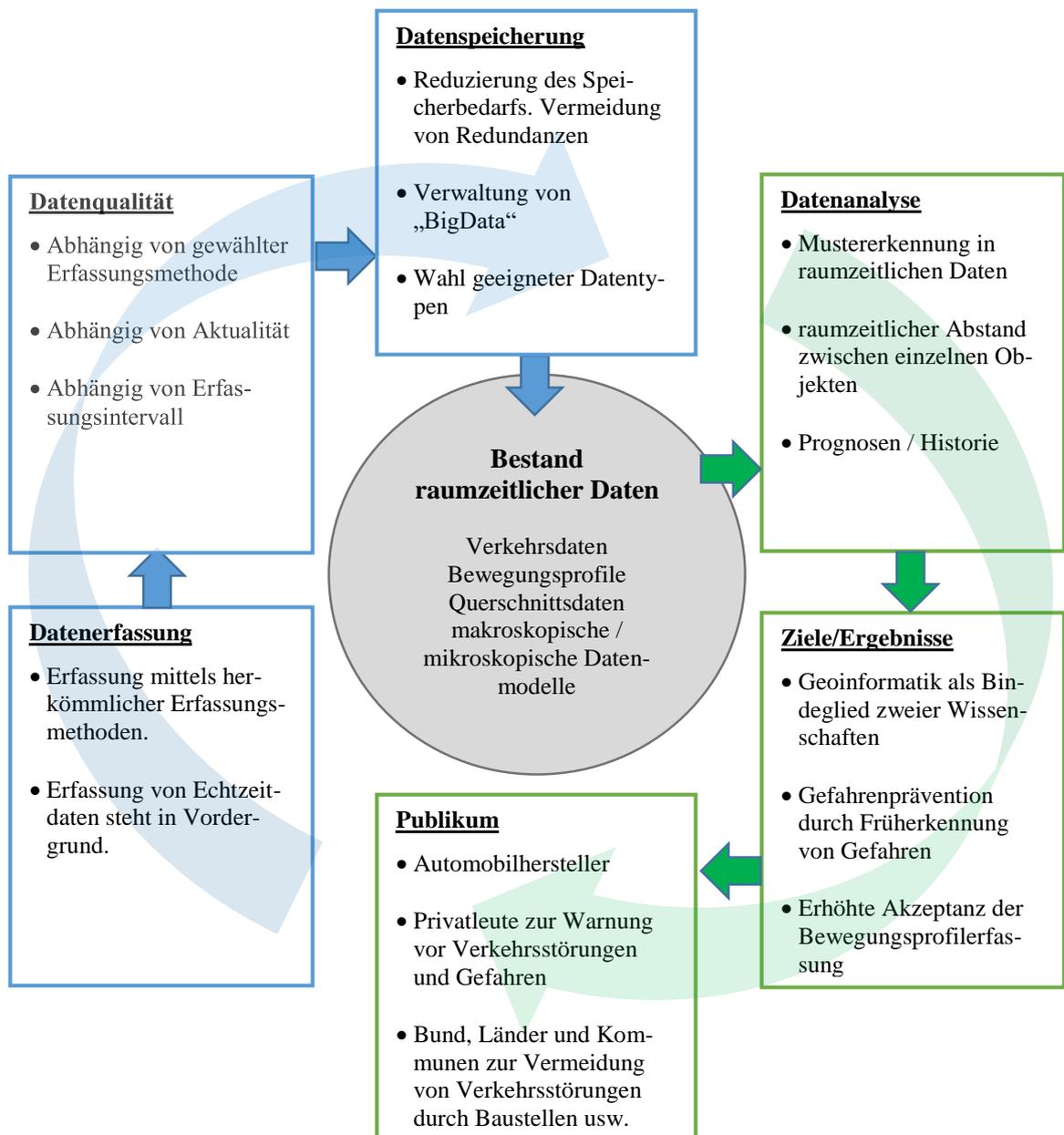


Abbildung 17: Konzeptionierung - Ablaufdiagramm

Hierzu zeigt Abbildung 17 die Entwicklung von der Erfassung raumzeitlicher Daten, über die Datenspeicherung, bis hin zu Datenanalyse des erfassten Datenbestandes, sowie der durch diese erreichten Analyseergebnisse. Zudem wird das anzusprechende Publikum festgelegt. Auf Grundlage dieses Ablaufdiagramms werden im Folgenden die einzelnen Hauptpunkte näher betrachtet und entsprechend des behandelten Anwendungsfalls weiter

diskutiert. Im Zentrum dieses Diagramms stehen die raumzeitlichen Daten. Der linke Bereich des Diagramms stellt mit den blau gekennzeichneten Punkten Datenerfassung, Datenqualität und Datenspeicherung die Hauptpunkte der Datenerhebung dar. Dem rechten Teil des Diagramms sind die grün hervorgehobenen Punkte der Datenweiterverarbeitung zu entnehmen.

Das Ziel dieser Konzeptionierung ist es, bereits existierende Konzepte und Modelle zur massenhaften Erfassung und Auswertung von raum-zeitlichen Daten bzw. Bewegungsprofilen aufzugreifen und diese in direkten Bezug zur Geoinformatik zu bringen.

In den vergangenen Jahren wurde der Ruf nach automatisiertem Fahren immer lauter. Erste Unternehmen, wie die Firma Daimler, stellen aktuell ihre bisherigen Entwicklungsergebnisse vor. So ist Mercedes-Benz der erste Automobilhersteller, der bereits im Jahr 2013 mit dem Modell S500 Intelligent Drive eine autonome Fahrt von Mannheim nach Pforzheim realisieren konnte. Durch dieses Pilotprojekt konnte Mercedes-Benz beweisen, dass eine autonome Fahrt durch den Stadtverkehr mit der heutigen Technik möglich ist. Auch selbstfahrende Lastkraftwagen gehören zu den aktuellen Entwicklungs- und Testprojekten des Unternehmens. Um diese technischen Innovationen jedoch im öffentlichen Straßenverkehr nutzen bzw. zunächst testen zu dürfen, bedarf es besonders in der Bundesrepublik Deutschland Sondergenehmigungen. (Daimler, 2015)

Auch die Firma Tesla, die in den letzten Jahren insbesondere durch die Entwicklung von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen Bekanntheit erreicht hat, ermöglicht durch das aktuelle Software-Update auf Version 7, ein autonomes Fahren. Diese technische Weiterentwicklung soll zunächst als Unterstützung des Fahrers genutzt werden und nicht zum eigenständigen Fahren des Fahrzeugs dienen. (Tesla, 2015)

Damit autonom fahrende Fahrzeuge den umliegenden Verkehr nicht beeinträchtigen, ist es zunächst wichtig, dass das Fahrzeug eigenständig das Verhalten des umliegenden Verkehrs einschätzen kann. Dies bedeutet, dass Computersysteme die Fahrerfahrung und Reaktion eines Fahrzeugführers sowie die Fähigkeit, Verkehrssituationen korrekt abschätzen zu können, ersetzen muss. Was bei einem menschlichen Fahrzeugführer jedoch über

dessen Sinne und der Beurteilung seines Umfeldes geschieht, stellt sich für das Fahrsystem als komplexe Auswertung raum-zeitlicher Datenbestände heraus.

Das Fahrzeug muss in der Lage sein, Verkehrssituation anhand raum-zeitlicher Muster, die sowohl aus raum-zeitlichen Echtzeitdaten, als auch aus historischen Datenbeständen extrahiert werden, abzuschätzen und auf deren Grundlage entsprechende Manöver einleiten zu können, ohne hierbei den Verkehr zu behindern und andere Verkehrsteilnehmer zu gefährden. Zu diesen Fähigkeiten zählen beispielsweise das automatisierte Registrieren entgegenkommender Fahrzeuge und deren Fahrverhalten. Eine Frühwarnung kann in diesem Fall bereits erfolgen, wenn das entgegenkommende Fahrzeug den Fahrtrichtungsanzeiger aktiviert oder durch Einschlagen des Lenkrads eine Richtungsänderung einleitet, die zum Kreuzen beider Routen führt. Zu den dazu verwendeten Sensoren zählen nach Tesla (2015) jedoch nicht nur ein GPS-System, sondern auch Kamera-, Radar- und Ultraschallsysteme.

In der hier geschilderten Situation warnen sich entgegenkommende Fahrzeuge gegenseitig vor einer möglichen Gefahrensituation und passen ihr Fahrverhalten entsprechend an. Hierzu zählt beispielsweise die Fähigkeit, anhand von Signalen, wie aktivierter Fahrtrichtungsanzeiger oder beginnender Richtungswechsel entgegenkommender Fahrzeuge, zu erkennen, dass diese in Kürze die eigene Route queren werden und es somit zur Kollision kommen könnte.

Dies ist bei Fußgängern jedoch nicht möglich, da diese Ihre Bewegungsrichtung spontan verändern können. Während bei motorisierten Fahrzeugen in der Regel neben GPS-Sensoren auf die Daten von Kamera-, Radar- und Ultraschallsensoren zurückgegriffen werden kann, bietet sich bei der Ortung von Fußgängern die Möglichkeit, die Bewegungsprofilen der mitgeführten Smartphones auszuwerten. Dabei handelt es sich bei modernen Smartphones u.a. um GPS- und Beschleunigungssensoren, Kompass sowie Schrittzähler. Zur Erkennung drohender Zusammenstöße zwischen motorisierten Fahrzeugen und Fußgängern, bietet sich die Auswertung der Bewegungsprofile von Fußgängern an.

Wie kann die Geoinformatik einen Beitrag zu dieser Forschung leisten? Zur Registrierung des umliegenden Verkehrsverhaltens werden raum-zeitliche Daten aller, sich im Umfeld

befindlichen Verkehrsteilnehmer und weitere Störeinflüsse sowie Sensordaten herangezogen und entsprechend spezieller Muster analysiert. Durch diese Analysen lassen sich somit, mittels der Grundlagen der Geoinformatik, Gefahren und weitere Situationen frühzeitig erkennen.

Das hier vorgestellte Konzept soll einen Idealfall beschreiben und auf diese Weise die Vorteile einer flächendeckenden Sammlung von Bewegungsprofilen aufzeigen. Es wird im Weiteren davon ausgegangen, dass nahezu alle Smartphone-Nutzer über ein aktiviertes GPS-Modul verfügen. Hierbei bilden alle Fußgänger durch mitgeführte Smartphones oder anderer Geräte mit entsprechender technischer Ausstattung ein flächendeckendes Sensornetzwerk, welches die Sammlung lückenloser raum-zeitlicher Big-Data ermöglicht.

4.1 Datenerfassung

4.1.1 Auswahl geeigneter Erfassungsmethoden

Die Wahl der Erfassungsmethoden ist abhängig von dem jeweiligen Anwendungsgebiet. Daher ist zunächst grundlegend zu entscheiden, welches Ziel durch die Erfassung der raum-zeitlichen Daten zu erfüllen ist. Je nach gewähltem Ziel steigert oder verringert sich die notwendige Auflösung der räumlichen sowie zeitlichen Daten. Zur Behandlung makroskopischer Verkehrsmodelle genügen daher zeitliche Auflösungen von einer Stunde oder sogar einem Tag. Bei der Untersuchung mikroskopischer Verkehrsmodelle sind hingegen höhere zeitliche Auflösungen einzelner Verkehrsteilnehmer notwendig. Abhängig von dem Anwendungsgebiet sind hierbei Echtzeitdaten notwendig, wie es beispielsweise bei der Sammlung von Verkehrsdaten durch Navigationssystemhersteller gehandhabt wird, um Verkehrsinformationen in Echtzeit bereitstellen zu können. (connect, 2013; TomTom, 2015)

Liegt also, wie in dem hier behandelten Fall, die Absicht vor, möglichst flächendeckende Bewegungsprofile zu erfassen, um aus diesen raumzeitlichen Daten Muster zu extrahieren,

ren, die im Anschluss zur Erzeugung von Prognosen und der Vorhersage von Verkehrsergebnissen herangezogen werden sollen, steigert die Erhöhung der raum-zeitlichen Auflösung ebenfalls die Qualität der ermittelten Ergebnisse.

Zur Ermittlung von Echtzeitpositionsdaten aller Verkehrsteilnehmer, ob Fußgänger, motorisierte oder nichtmotorisierte Fahrzeuge, eignet sich die Übertragung von Bewegungsprofilen über Smartphones und Navigationssysteme. In diesem Beispiel wird von dem Idealfall ausgegangen, dass alle Verkehrsteilnehmer über einen solchen Sensor verfügen und somit von nahezu allen Verkehrsteilnehmern Positionsdaten vorliegen.

Zur Erweiterung des Datenbestandes erfolgt eine Erhebung allgemeiner Verkehrsinformationen, wie Staus, Fließgeschwindigkeiten usw. über herkömmliche Erfassungsmethoden, wie Induktionsschleifen und über Verkehrskameras erfasste Trajektorien. Durch die fortschreitende technische Entwicklung im Bereich der Informationstechnologie und dem stetigen Zuwachs an Smartphone-Nutzern entsteht auf diese Weise ein engmaschiges und hochaufgelöstes Netz an Verkehrsinformationen und Bewegungsprofilen einzelner Verkehrsteilnehmer. Durch diese Kombination aus herkömmlichen Erfassungsmethoden der Verkehrsforschung (vgl. Kapitel 2.2.1) und der Ortung von Smartphones, lassen sich die Positionsdaten unterschiedlichster Verkehrsteilnehmer erfassen.

Doch trotz der hohen Datendichte ist es nicht möglich, den vorhandenen Datenbestand als exaktes und aktuelles Abbild der Realität zu betrachten. Durch Messungenauigkeiten in der zeitlichen und räumlichen Positionsbestimmung, sowie Verzögerungen und Ausfällen in der Datenübertragung sind die Bewegungsprofile nur bedingt als zuverlässig anzusehen. Diese Problematik wurde bereits in Kapitel 2.1.3 durch den Verweis auf die Arbeit von Klopprogge und Lockemann (1983) behandelt. Demnach sind im Vorfeld einer Auswertung einige Maßnahmen zu ergreifen, um eventuelle Messungenauigkeiten zu beseitigen.

So kommt es bei der Positionsbestimmung mittels GPS, bedingt durch wechselnde Satellitenkonstellationen zu Koordinatensprüngen und daraus resultierenden Veränderungen der Positionsgenauigkeit, obwohl sich die tatsächliche Position des Smartphones nicht verändert hat. Dies kann, je nach Intensität der Koordinatensprünge, dazu führen, dass

dem entsprechenden Smartphone bzw. dessen Benutzer eine Bewegung zugeordnet wird, die in diesem Moment gar nicht stattgefunden hat, sondern lediglich durch Messungenauigkeiten entstanden ist. Diese Fehler lassen sich durch den Einsatz von Beschleunigungssensoren, Schrittzählern oder bei Fahrzeugen durch Auslesen des Kilometerzählers verringern. Mit diesen Sensoren kann ermittelt werden, ob die erfasste Koordinatenänderung tatsächlich durch eine Bewegung oder lediglich auf eine Veränderung der Ortungsgenauigkeit zurückzuführen ist. Sie zählen daher zu den Mindestanforderungen für Fahrzeugkommunikationsdienste, wie Car2X Systeme. (ETSI:TR, 2009; Scherping et al., 2010)

Ebenso setzt eine Erfassung von Bewegungsprofilen aller Smartphone-Nutzer voraus, dass an den Geräten das GPS-Modul stets aktiviert ist. Somit wird im Rahmen dieser Konzeptionierung davon ausgegangen, dass an allen Geräten die GPS-Ortung aktiviert ist. Durch die Betrachtung eines solchen Idealfalls lassen sich die Vorteile und Nachteile einer flächendeckenden Erfassung von Bewegungsprofilen verdeutlichen und entsprechende Beispielabfragen unter Verwendung der vorgestellten raum-zeitlichen Operatoren entwerfen. In diesem Fall wird speziell auf die Auswertung der Bewegungsprofile von Fußgängern eingegangen, um bereits Warnungen vor möglichen Gefahrensituationen generieren zu können, bevor ein Fußgänger von Ultraschall- oder anderen Sensoren der Fahrzeuge erfasst werden kann.

Eine weitere Fehlerquelle stellt die Latenzzeit zwischen Sende- und Empfangszeitpunkt eines Datensatzes dar. Zwischen der Übertragung der Positionsdaten zum Server und der anschließenden Übermittlung an umliegende Fahrzeuge kann es je nach Übertragungsgeschwindigkeit zu Zeitdifferenzen kommen. (ETSI:TR, 2009; Lottermann et al., 2012; Mazzola et al., 2015; Nikaein und Krco, 2011; Scherping et al., 2010)

Es erweist sich als sinnvoll, gemäß der in Kapitel 2.1.1 vorgestellten Theorie nach Worboys (1994), eine zweite Zeitachse einzuführen. Dabei wird zwischen dem Zeitpunkt der Datenerfassung und dem Zeitpunkt des Datenempfangs unterschieden. Auf diese Weise besteht stets die Möglichkeit, das Alter der vorliegenden Daten zu ermitteln und somit ihre Zuverlässigkeit zu bewerten.

Die Datenerfassung mittels Mobilfunkgeräte ist zwar in Hinblick auf die große Verbreitung dieser Geräte geeignet, jedoch bieten aktuelle Geräte keine ausreichende Möglichkeit, direkt auf die Daten eines Fahrzeugs zuzugreifen. Dies bedeutet, dass durch das Smartphone nur die Bewegungsinformation des Gerätes ermittelt und zum Server sowie an andere umliegende Geräte übertragen werden können, jedoch keine Informationen über die Verwendung eines Fahrtrichtungsanzeigers, der Pedale oder des Lenkrads. Hierdurch fehlen zur Auswertung wichtige Informationen über bevorstehende Richtungsänderungen eines Fahrzeugs. Bezogen auf die Ortung von Fußgängern oder Fahrradfahrern blieben diese Angaben allerdings ohnehin aus. In diesem Konzept wird daher vorausgesetzt, dass die Ortung von Fahrzeugen über integrierte Ortungssysteme, wie Navigationssysteme o.ä. erfolgt. Auf diese Weise kann eine direkte Verbindung zu den restlichen Fahrzeugparametern erfolgen.

Im weiteren Verlauf dieser Konzeptionierung wird speziell auf die Erfassung, Speicherung und Analyse raumzeitlicher Daten in der *Car2X* Technologie Bezug genommen. Bei der *Car2X* Technologie gibt es verschiedene Ansätze der Kommunikationsfähigkeiten von Fahrzeugen. Während sich beispielsweise *Car2Car* im Speziellen mit der Kommunikation zwischen einzelnen Fahrzeugen im direkten Umfeld beschäftigt, wird in der *Car2Pedestrian* Technologie die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Fußgängern behandelt. Unter *Car2X* ist hingegen die Kommunikation zwischen Fahrzeugen, weiteren Verkehrsteilnehmern, sowie der Infrastruktur, wie Baustellen, Ampelanlagen usw. zu verstehen. Die hierbei verwendeten Bestandteile des Datenbestandes sind in Abbildung 18 dargestellt. (Engel et al., 2013; ETSI:TR, 2009; Scherping et al., 2010)

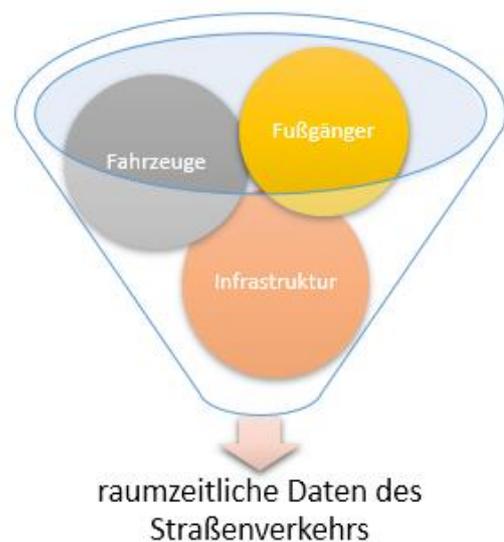


Abbildung 18: Raumzeitliche Daten des Straßenverkehrs

In dieser Konzeptionierung steht die Erfassung der raumzeitlichen Bewegungsdaten von Fußgängern im Vordergrund. Gemäß den nach Scherping et al. (2010) und ETSI:TR (2009) formulierten Anforderungen an Car2X-Systeme erfolgt auch bei der Erfassung von Bewegungsabläufen einzelner Fußgänger eine Datenerfassung in Intervallen weniger hundertstel Sekunden, um ein möglichst lückenloses Bewegungsprofil jedes einzelnen Smartphone-Nutzers zu erzeugen und somit rechtzeitig vor Gefahren warnen zu können. Dieses Erfassungsintervall sollte allerdings nur dann Anwendung finden, wenn eine Änderung der Bewegungsrichtung bzw. eine tatsächliche Veränderung der Position stattfindet. Befindet sich ein Smartphone in Ruheposition, so sollte dies durch weitere Sensoren registriert und bei der Übermittlung der Positionsdaten beachtet werden.

Ein Richtungswechsel eines Fußgängers kann spontaner erfolgen als bei Kraftfahrzeugen. Während der Bewegungsverlauf eines Fahrzeugs an ein bestehendes Straßennetz angeglichen werden kann, um somit den Routenverlauf entlang des existierenden Straßennetzes zu interpolieren, verlaufen die Bewegungen eines Fußgängers in der Regel zufällig. Die in diesem Konzept betrachteten Klassen raum-zeitlicher Daten sowie deren Erfassungsmethoden sind Abbildung 19 zu entnehmen.

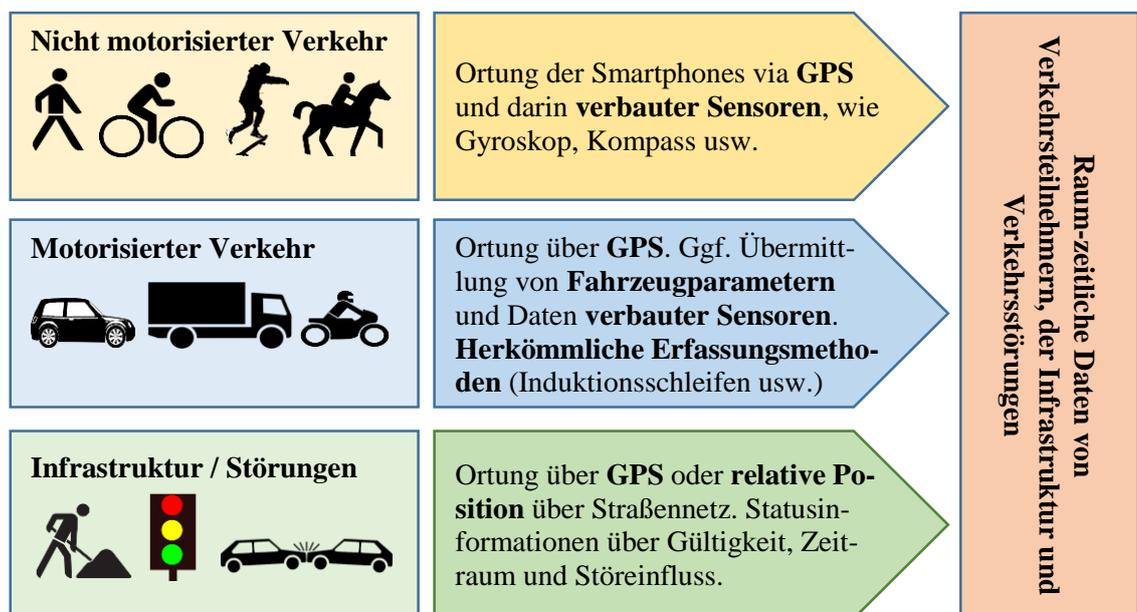


Abbildung 19: Klassen raumzeitlicher Daten im Straßenverkehr und ihre Erfassungsmethoden

4.1.2 Raum-zeitliche Bezugssystem

In Kapitel 4.1.2 wurden, für das betrachtete Fallbeispiel geeignete, Erfassungsmethoden raum-zeitlicher Verkehrsdaten und Bewegungsprofile betrachtet. Hierbei wurde aufgezeigt, dass zur Steigerung der Datenqualität ein Erfassungsintervall von weniger als einer Sekunde zu wählen ist, um Veränderungen des Bewegungsverlaufs eines Verkehrsteilnehmers möglichst zeitnah zu registrieren.

Räumliche Bezugssysteme

Die Wahl geeigneter räumlicher und zeitlicher Bezugssysteme ist von dem jeweiligen Anwendungsfall abhängig.

Bewegen sich die untersuchten Objekte nur entlang eines Straßennetzes, wie es beispielsweise bei Fahrzeugen auf Autobahnen der Fall ist, so ist es ausreichend, die Position jedes Fahrzeugs relativ auf das jeweilige Straßensegment zu beziehen. Dies erfolgt nach Widmann (2001) in Bezug zur Kilometrierung des Straßennetzes oder durch Angabe von Straßenbezeichnungen.

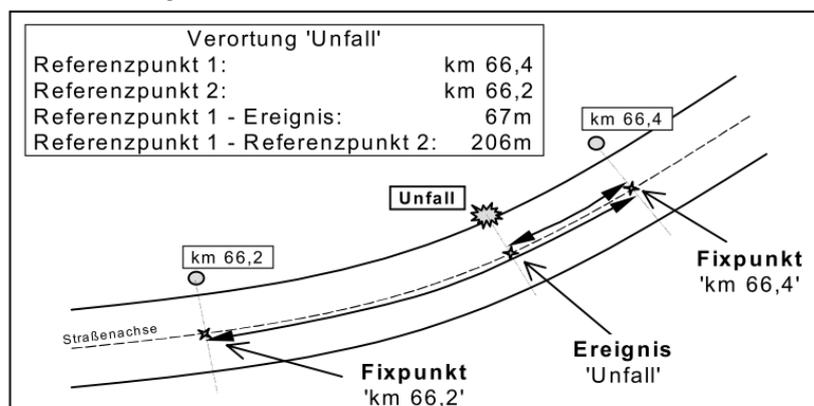


Abbildung 20: Verortung eines Ereignisses im Bezugssystem nach Widmann (2001)

Die Positionsangabe von Unfällen nach Widmann (2001) wird in Abbildung 20 dargestellt. Sollen bei den durchgeführten Analysen jedoch auch Fahrstreifenwechsel oder Bewegungen, die sich nicht eindeutig einem Straßensegment zuordnen lassen, berücksichtigt werden, so empfiehlt es sich, ein weltweit anwendbares Koordinatensystem, wie beispielsweise Geographische Koordinaten zu verwenden. Als geodätisches Referenzsystem

kommt dabei das *World Geodetic System 1984* (WGS84) zum Einsatz, welches in der Regel zur GPS-Positionierung verwendet wird. Eine nachträgliche Zuordnung zu den einzelnen Straßensegmenten ist dann jeder Zeit möglich, da auch das zugrundeliegende Straßennetz im verwendeten Koordinatensystem vorliegt.

Während die Positionen von Autos im Allgemeinen entlang eines Straßennetzes verlaufen, bewegen sich Fußgänger gerade in Innenstädten und dort vorwiegend in Fußgängerzonen oder auf Marktplätzen nahezu willkürlich. Demnach sollte besonders die Ortung von Fußgängern und Fahrradfahrern durch absolute Koordinaten erfolgen.

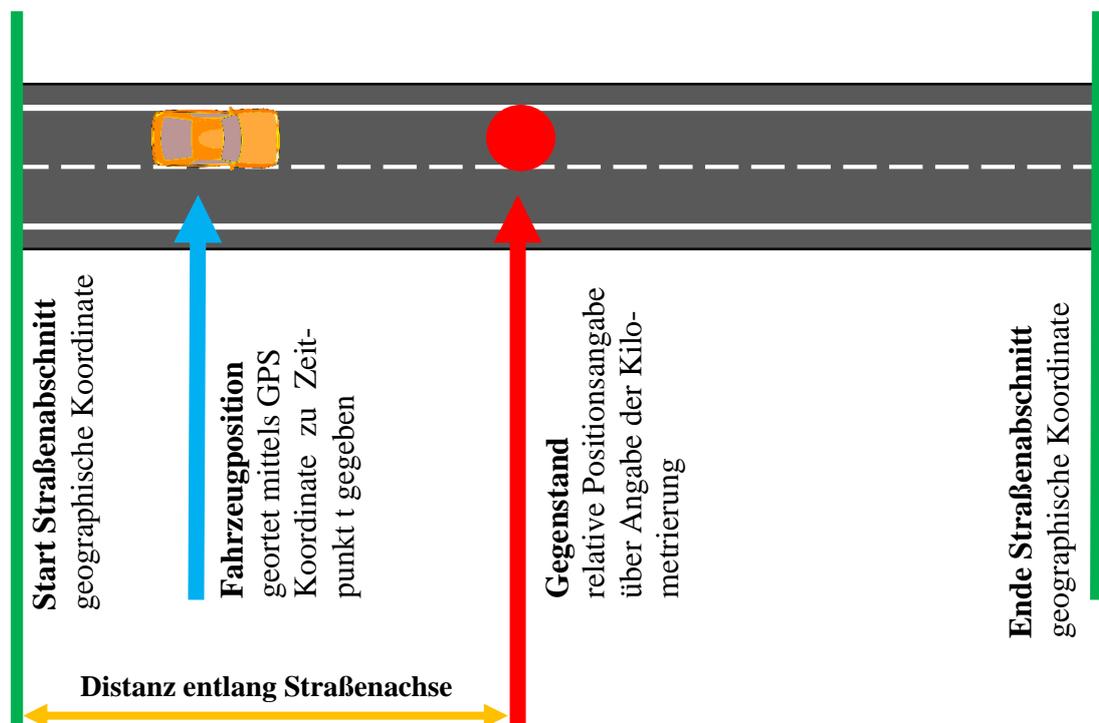


Abbildung 21: Relative im Vergleich zu absoluter Positionsangabe

In Abbildung 21 ist die durch GPS bestimmte Position eines Fahrzeugs und die Position eines, sich auf der Fahrbahn befindenden, Gegenstandes unter Angabe der Kilometrierung grafisch dargestellt. Zu beachten ist hierbei, dass Straßenkilometer gewöhnlich in Abständen mehrerer 100m anhand von entsprechenden Hinweistafeln definiert sind. Die Verortung eines Gegenstandes durch Angabe des Straßenkilometers kann somit lediglich mit einer entsprechend hohen Genauigkeit der Stationierung erfolgen. Vielmehr ist in

diesem Fall eine Warnung entlang des gesamten entsprechenden Straßenabschnittes zu registrieren, um Verkehrsteilnehmer die sich dort aufhalten, vor der Gefahr zu warnen. Eine exakte Umrechnung des angegebenen Straßenkilometers in eine absolute Koordinate mit ausreichender Genauigkeit ist infolgedessen nicht möglich.

Hierbei ist insbesondere die Angabe von „Fußgängern auf der Fahrbahn“ zu berücksichtigen, wie sie oftmals dem Verkehrsfunk zu entnehmen ist. Erfolgt die Positionsangabe über die Straßenkilometrierung, ist es nur bedingt möglich, den Abstand zwischen heranahenden Fahrzeugen und dem Fußgänger zu ermitteln. Wird die Position des Fußgängers jedoch über dessen Bewegungsprofil ermittelt und es liegen absolute Koordinaten vor, ist eine Berechnung der Distanz problemlos möglich.

Die Datenerfassung mittels absoluter Koordinaten liefert den Vorteil, dass die Koordinaten der einzelnen Objekte leichter untereinander vergleichbar sind. Eine nachträgliche Zuordnung zwischen den erfassten geographischen Koordinaten und den entsprechenden Straßensegmenten ist möglich und kann durch Anwendung von Pufferzonen erfolgen. Hierbei werden alle Koordinaten, die sich innerhalb der Pufferzone eines Straßensegmentes befinden, diesem Segment zugewiesen. Es ist dementsprechend jeder Zeit möglich, die Attribute eines Straßensegmentes mit den sich dort befindlichen Verkehrsteilnehmern in Verbindung zu bringen. Um die Ermittlung von zuverlässigen räumlichen sowie raumzeitlichen Abständen verschiedener Objekten zu ermöglichen, müssen die hierzu verwendeten Positionsangaben als absolute Koordinaten erfolgen.

Zeitliche Referenzsysteme

Auch bei der Wahl zeitlicher Referenzsysteme muss stets berücksichtigt werden, dass Zeitinformationen, ebenso wie es bei den räumlichen Koordinaten zutrifft, vergleichbar sein müssen. So hängt die Zuverlässigkeit der Analyseergebnisse maßgeblich von der Qualität der zugrundeliegenden raum-zeitlichen Informationen ab. Erfolgt die Datenerfassung eines Objekts zeitlich nicht synchron zu der Datenerfassung anderer Objekte, sind die dort gesammelten Informationen zumindest in Bezug auf ihre Zeitdimension nicht mit dem restlichen Datenbestand vergleichbar. Es ist somit insbesondere auf eine zeitliche Konsistenz des Datenbestandes zu achten.

Hieraus resultiert, dass die Erfassung zeitlicher Daten bei jedem Bewegungsprofil stets in Bezug zu einem einheitlichen Ursprung erfolgen muss. Es bietet sich hierzu die koordinierte Weltzeit (UTC) an. Bei der allgemeinen Zeitangaben wird sich dementsprechend auf die Angabe von Uhrzeit und Kalenderdatum geeinigt. Dieses zeitliche Referenzsystem wurde in Kapitel 3.4.2 bereits vorgestellt und ist in DIN EN ISO 19108 (2005-05) definiert.

Durch die Positionsbestimmung mittels GPS wird auch die Ermittlung präziser Zeitinformationen ermöglicht. Die Zeitinformationen werden über das GPS-Signal mitgeliefert. Ihre Ungenauigkeit beträgt in etwa 75ns. Mittels dieser Informationen ist eine exakte und synchrone Bestimmung der UTC möglich. (Mansfeld, 2010)

Gemäß den Vorgaben des Standards OGC Moving Features, dient die Angabe von Kalenderdatum und Uhrzeit ausschließlich zur Definition des zeitlichen Intervalls, in welchem sich die beschriebene Bewegung eines Objekts ereignet. Die Anfangs- und Endzeitpunkte einzelner Bewegungsabschnitte erfolgt durch relative Zeitangaben entlang eines zeitlichen Koordinatensystems, das entsprechend der angegebenen Start- und Endzeitpunkt, sowie der Angabe des *offset*-Attributs, welches die Zeiteinheit festlegt, definiert wird. (OGC, 2015a; OGC, 2015b)

4.1.3 Selektive Datenerfassung

Eine kontinuierlich durchgeführte, massenhafte Erfassung von Bewegungsprofilen führt zu einem enormen Bedarf an Speicherplatz. Um diesen Bedarf möglichst gering zu halten, sollte lediglich dann eine Datenerfassung erfolgen, wenn sich eine bedeutende Veränderung zum vorherigen Erfassungszeitpunkt ereignet hat. Dies bedeutet, dass beispielsweise die Position eines parkenden Fahrzeugs nicht im selben zeitlichen Intervall an den Server übertragen werden sollte, wie es bei einem fahrenden Fahrzeug geschieht. Solche Situationen erfordern eine vorherige Filterung der erfassten raum-zeitlichen Daten durch das Smartphone.

In Kapitel 2.1.5 wurde das *Foliation Model* des Standards OGC (2015b) präsentiert. Dieses Modell zeigt, dass die Positionsangabe eines bewegten Objekts nur dann erfolgen muss, wenn sich dessen Orientierungsrichtung verändert. Bewegt sich ein Objekt über

einen längeren Zeitraum konstant, kann dieser Verlauf mit Hilfe einer linearen Funktion interpoliert werden, während sich im selben Zeitraum die Orientierungsrichtung anderer Verkehrsteilnehmer verändert hat.

Auch nach Mazzola et al. (2015) ist es nicht notwendig, bei konstanter Geschwindigkeit Daten in regelmäßigen Abständen zu versenden. In diesem Fall ist jedoch die Übertragung zwischen dem zentralen Server und den umliegenden Fahrzeugen gemeint und somit die Weitergabe der bereits erfassten Daten. Dies soll nicht benötigte Datenströme verhindern und eine Überlastung des Mobilfunknetzes vermeiden. Zudem die Präsentation von Vorgehensweisen, die eine durch das Mobilfunknetz bedingte Verzögerung der Datenübertragung möglichst gering halten. Das nach Mazzola et al. (2015) präsentierte System wird als *server-based Adaptive Cruise Control (SbACC)* bezeichnet und stellt einen adaptiven serverbasierten Tempomaten dar, dessen Daten über das Mobilfunknetz zwischen Fahrzeugen und einem zentralen Serversystem übertragen werden. (Mazzola et al., 2015)

Zur Einsparung von Speicherplatz soll schon vor der Übermittlung der Bewegungsdaten eine Auswertung erfolgen, die über die Relevanz dieser Daten für die weitere Auswertung entscheidet. Dass dieses Verfahren nicht immer zur Anwendung kommt, zeigt die Vorgehensweise des Dienstes Skobbler.

Wie in 3.4.2 dargestellt, synchronisiert die Smartphone-Anwendung alle drei Minuten die aktuellen Positionsdaten inklusive Zeitstempel mit dem Server, sofern zu diesem Zeitpunkt eine Netzwerkverbindung vorhanden ist. Dies bedeutet, dass auch eine Übertragung von Positionsdaten an den Server erfolgt, obwohl sich das Smartphone überhaupt nicht fortbewegt hat.

So sind zur Auswertung von Verkehrssituationen Personen, die sich mit ihren Mobilfunkgeräten gerade in einem Gebäude befinden oder in einem Café an der Ecke sitzen, in der Regel nicht von Bedeutung. Die Selektion dieser ruhenden Objekte erfolgt durch Vergleiche mit weiteren Sensordaten. Sie werden so lange vom Datentransfer getrennt, bis eine erneute Positionsveränderung erfolgt. Solange ein Objekt als ruhendes Objekt regis-

triert ist, gilt die letzte ermittelte Position als Standort des Objekts. Aber auch Mobilfunkgeräte, die sich in einem Fahrzeug befinden und somit nicht den Bewegungsverlauf eines Fußgängers beschreiben, können die Analyseergebnisse erheblich beeinflussen. Hinzu kommen unterschiedliche Ortungsgenauigkeiten zwischen verschiedenen Smartphone-Modellen, die ebenso zu starken Unsicherheiten bei der Beurteilung des gesammelten Datenbestandes führen.

Abbildung 22 zeigt das Ortungsergebnis eines, sich im Inneren eines Wohngebäudes befindenden, Smartphone-Nutzers. Es ist hierbei zu erkennen, dass das Smartphone trotz aktiviertem GPS-Modul auf der nächstgelegenen Hauptstraße geortet wird, obwohl es sich zum Zeitpunkt der Ortung innerhalb eines Gebäudes befunden hat, das durch das blaue Schlüssellochsymbol an der Ecke Hauptstraße / Feingasse markiert ist. Der aufgehellte runde Bereich um die Ortungsposition stellt die Ortungsgenauigkeit dar. Anhand des gezeigten Beispiels ist zu sehen, dass sich die eigentliche Position des Smartphones tatsächlich innerhalb dieses Toleranzbereiches befindet, es durch diese jedoch zu erheblichen Lageabweichungen kommen kann.

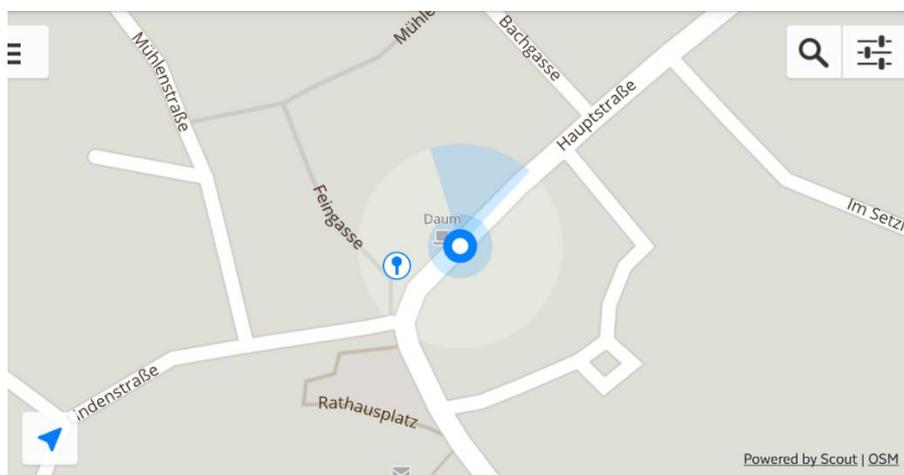


Abbildung 22: Ortungsergebnis eines Smartphones innerhalb eines Gebäudes mit Skobbler.

Diese Situation verdeutlicht auch, dass gerade durch gezeigte Messungengenauigkeiten eine erhebliche Beeinträchtigung der Datengenauigkeit zu erwarten ist, sofern keine selektive Datenerfassung erfolgt.

Das zu erwartende Ausmaß dieser Ortungsfehler wird bei Betrachtung von Abbildung 23 veranschaulicht. In diesem Kartenausschnitt sind eine Schule, eine Kirche, viele Wohn- und Bürogebäude sowie eine Parkanlage zu erkennen. Zur Unterrichtszeit besteht somit die Gefahr, dass eine Ortung der Smartphones aller Schüler des Rabanus-Maurus-Gymnasiums im süd-westlichen Bereich des Kartenausschnitts auf der Kaiserstraße erfolgt. Gleiches gilt für Besucher eines Gottesdienstes der Christuskirche. Findet nicht bereits vor der Übertragung zum Server eine Filterung dieser Positionsdaten statt, erhöht sich der Speicherbedarf, obwohl die erfassten Datensätze nicht den gewünschten Zweck erfüllen, sondern die Ergebnisse verfälschen, indem eine fehlerhafte Ortung von Personen im Straßenraum erfolgt, obwohl sich diese tatsächlich innerhalb von Gebäuden befinden.

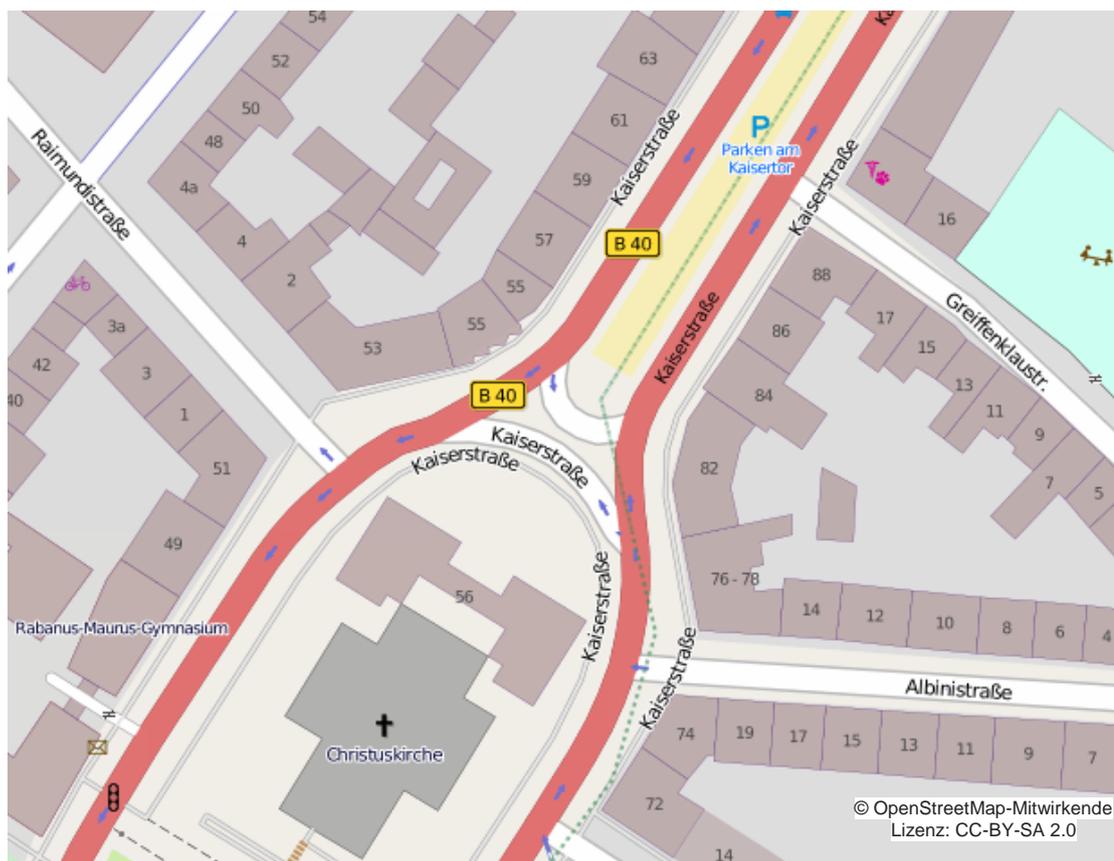


Abbildung 23: Fehlerquellen bei GPS-Ortung anhand eines Kartenausschnitts von OpenStreetMap - Kaiserstraße, Mainz (Lizenz: CC-BY-SA 2.0)

Um diese Art von Fehlerquellen zu vermeiden, bzw. so gering wie möglich zu halten, werden, wie in Mazzola et al. (2015) beschrieben, Toleranzen eingeführt, die eine Selektion zwischen relevanter und irrelevanter Daten ermöglichen. Bei dieser Filterung ist es entscheidend, ob in einem bestimmten zeitlichen Intervall eine vorgegebenen Toleranzgrenze über- bzw. unterschritten wird. Ein weiterer Ansatz ist hierbei die Betrachtung der Ortungsgenauigkeit und einer entsprechenden Gewichtung.

Solche Toleranzgrenzen werden in dieser Masterthesis nur angeschnitten. Stattdessen wird im folgenden Kapitel 5 auf raum-zeitliche Operatoren eingegangen, die zur Filterung großer raum-zeitlicher Datenbestände anwendbar sind und somit zur Einhaltung dieser Toleranzen beitragen können.

4.2 Datenspeicherung

Die Speicherung der erfassten Bewegungsprofilaten erfolgt in einem zentralen Serversystem, das für die Übermittlung von Positionsdaten an alle weiteren Geräte zuständig ist. Zur Auswertung des dadurch entstehenden BigData-Bestandes ist es erforderlich, die Daten in einer Datenbank zu verwalten. Gerade aufgrund der hohen Datenmenge und der, von diesem System erwarteten Gefahrenprävention, ist es besonders wichtig eine hohe Verfügbarkeit garantieren zu können. Aufgrund der zentralen Speicherung aller Daten und der Verwaltung in Datenbanksystemen kann diese hohe Verfügbarkeitsanforderung nahezu einschränkungslos garantiert werden. Ein Ausfall des Serversystems würde zu einer erhöhten Gefahr im Straßenverkehr und speziell zu einer Gefährdung von Menschenleben führen.

Bei der Datenspeicherung und Datenverwaltung mittels Datenbanken ist die Wahl eines geeigneten Datenmodells sowie geeigneter Datentypen entscheidend für die Qualität und Flexibilität späterer Analyseprozesse.

In Kapitel 3.2 wurden raum-zeitliche Datentypen präsentiert, die bei der Erfassung und Speicherung von Bewegungsprofilaten Anwendung finden. Zur Wahl entsprechender Datentypen muss zunächst eine Auflistung der zu erfassenden Daten erfolgen. Dies ist in Kapitel 3.2 bereits in Ansätzen erfolgt und wird im Folgenden auf das in diesem Kapitel präsentierte Konzept präzisiert. Die weiteren Schritte beziehen sich auf die in Kapitel

2.1.4 vorgestellten Datentypen zur Verwaltung bewegter Objekte und der in Kapitel 2.1.5 genannten Standards.

Motorisierte und nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer sowie Fußgänger verfügen im Allgemeinen über zeitlich veränderte Positionsinformationen, sofern sie sich nicht im Ruhezustand befinden. Dies wäre bei Fahrzeugen beispielsweise auf einem Parkplatz zutreffend. Demnach wird die Positionsangabe dieser Verkehrsteilnehmer mittels des Datentyps *mpoint* in der Datenbank verwaltet. In diesem Zusammenhang wird vorausgesetzt, dass die verwendete Software die erfassten Positionsdaten der Verkehrsteilnehmer in Echtzeit durch entsprechende Polynomfunktionen beschreibt und in die Datenbank übertragen kann.

Diese Anforderung wurde in dem vorgestellten Verfahren nach Erwig et al. (1999) erhoben. Jedoch vereinfacht der Standard *OGC Moving Features* die Vorgehensweise bei der Speicherung von bewegten Objekten erheblich. Demnach ist es ausreichend, die einzelnen Abschnitte eines Bewegungsprofils durch Angabe einer Start- und einer Endkoordinate sowie eines Anfangs- und eines Endzeitpunktes zu definieren. Eine Steigerung der Genauigkeit dieser Erfassungsmethode kann durch die Verringerung des Erfassungsintervalls erfolgen. Aufgrund der einfachen Struktur dieser Erfassungsmethode wird diese zur weiteren Konzeptionierung berücksichtigt. Da der OGC (2015b) Standard keine Datentypen, sondern lediglich ein Schema zum Datentransfer bereitstellt, findet die Speicherung der Daten mit den Datentypen nach Erwig et al. (1999) statt.

Neben der Verwaltung bewegter Punkte erfordert die Verkehrsforschung zudem den Umgang mit bewegten Flächen. Diese werden zum Beispiel zur Speicherung von Wetterereignissen oder Großveranstaltungen, wie Demonstrationen, benötigt, da es sich hierbei um bewegte Objekte handelt, die im Laufe der Zeit ihre Position, Form und ihre Ausmaße verändern. Für diese Objekte wird auf den ebenfalls von Erwig et al. (1999) eingeführten Datentyp *mregion* zurückgegriffen.

Die hier gewählten Datentypen zur Speicherung bewegter Objekte verfügen im Gegensatz zu dem Datenmodell nach Sistla et al. (1997) über den Nachteil, dass lediglich die jeweiligen aktuellen Positionen bzw. Bewegungsprofile in der Datenbank hinterlegt und

zur Datenanalyse zur Verfügung stehen. Wohingegen das Datenmodell MOST die Möglichkeit bietet, durch entsprechende Operatoren und der Speicherung der Richtungsvektoren, zukünftige Bewegungsabläufen zu prognostizieren.

Aufgrund dieser Tatsache wird zusätzlich ein Datenbankfeld zur Speicherung der aktuellen Orientierung der einzelnen Objekte angelegt. Auf diese Weise lassen sich die Vorteile beider Datenmodelle kombinieren. Diese Kombination beider Datenmodelle wurde auch in dem Standard *OGC Moving Features* weitestgehend berücksichtigt.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass durch eine zentrale Serveranwendung die Bewegungsdaten aller Verkehrsteilnehmer gesammelt und unter Verwendung des Datentyps *mpoint* in der Datenbank gespeichert werden. Zusätzlich erfolgt die Speicherung der aktuellen Orientierung des Verkehrsteilnehmers unter Angabe eines entsprechenden Zeitstempels. Entsprechend der konzipierten Erkennung ruhender Objekte, die in Kapitel 4.1.3 vorgestellt wurde, werden zusätzlich die Daten verbauter Beschleunigungssensoren, Schrittzählern usw. in der Datenbank hinterlegt.

Mittels dieser Informationen lassen sich sowohl unter Verwendung der von Erwig et al. (1999) definierten Operatoren Abfragen bezüglich aktueller und vergangener Ereignisse durchführen, als auch Prognosen zukünftig zu erwartender Ereignisse mittels der Operatoren des Datenmodells MOST erstellen.

5 Datenmodellierung und Datenanalyse

In den vorhergehenden Kapiteln wurden zum einen unterschiedliche Datenmodelle und Standards in Bezug auf raum-zeitliche Daten und insbesondere bzgl. bewegter Objekte präsentiert. Zum anderen wurde unter Berücksichtigung der dabei getroffenen Erkenntnisse und geltender Standards ein Konzept entwickelt, durch welches die Erfassung, Speicherung und Analyse raum-zeitlicher Daten realisiert werden kann, um mittels der hierdurch ermöglichten Analyseergebnisse Gefahren im Straßenverkehr zu erkennen. Im Speziellen bezieht sich dieses Konzept auf die Bewegungsprofilenerfassung von Fußgängern, ermöglicht durch GPS-Ortung der mitgeführten Smartphones. Die zuvor präsentierten Modelle und Standards verfolgen alle das Ziel, den Umgang mit raum-zeitlichen Daten und bewegten Objekten zu realisieren und zu vereinfachen. Dies geschieht auf unterschiedlichen Wegen, wobei auch einige Gemeinsamkeiten zu erkennen sind.

Im Folgenden findet eine Darstellung dieser Unterschiede und Gemeinsamkeiten statt. Mit Hilfe der Erkenntnisse lässt sich ein geeignetes Datenmodell für die Umsetzung des in Kapitel 4 vorgestellten Konzepts entwickeln sowie die Anwendbarkeit der raum-zeitlichen Operatoren untersuchen, welche durch die verwendeten Datenmodelle und Standards zur Verfügung stehen.

Zu Beginn dieser Untersuchung findet eine Auflistung sowie eine kurze Vorstellung der von Erwig et al. (1999), Güting et al. (2000) und Sistla et al. (1997) eingeführten zeitlichen und raum-zeitlichen Operatoren statt.

Im zweiten Schritt werden die entsprechend des Konzepts aus Kapitel 4 zu erfassenden Daten ihren jeweiligen Entitäten zugeordnet. Dabei erfolgt lediglich die Berücksichtigung von Attributen, die für eine spätere raum-zeitliche Analyse von Relevanz sind. In diesem Zusammenhang besteht die Möglichkeit, die dazu benötigten Datentypen näher zu erläutern und die Entscheidung für die Wahl des jeweiligen Datentyps kurz zu begründen.

Der dritte Teil dieses Kapitels beschäftigt sich mit der Formulierung von geeigneten Beispielabfragen, durch welche eine Verknüpfung der Geoinformatik und der Verkehrsplanung erfolgen soll.

5.1 Operatoren zur Analyse bewegter Objekte

Neben den Datentypen *mpoint* und *mregion*, werden von Erwig et al. (1999) Operatoren vorgestellt, die zur Auswertung raum-zeitlicher Datenbestände dienen. Eine Auswahl dieser Operatoren ist folgender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 7: Raum-zeitliche Operatoren nach Erwig et al. (1999)

OPERATOR	DEFINITION	BESCHREIBUNG
<i>mdistance</i>	$\underline{mpoint} \times \underline{mpoint} \rightarrow \underline{mreal}$	Abstand zweier bewegter Punkte <i>mpoint</i> zu jedem Zeitpunkt <i>t</i> . Das Ergebnis ist eine sich zeitlich verändernde Zahl des Typs <i>mreal</i> .
<i>visits</i>	$\underline{mpoint} \times \underline{mregion} \rightarrow \underline{mpoint}$	<ol style="list-style-type: none"> Argument: Ort, an dem ein <i>mpoint</i> erstmal eine <i>mregion</i> betritt Argument: Zeitpunkt, zu dem ein <i>mpoint</i> erstmals eine <i>mregion</i> betritt
<i>trajectory</i>	$\underline{mpoint} \rightarrow \underline{line}$	Mittels des Operators <i>trajectory</i> wird ein bewegter Punkt <i>mpoint</i> in die Ebene projiziert. Das Ergebnis ist eine Linie.
<i>traversed</i>	$\underline{mregion} \rightarrow \underline{region}$	Mittels des Operators <i>traversed</i> wird eine bewegte Fläche <i>mregion</i> in die Ebene projiziert. Das Ergebnis ist eine Fläche.
<i>inside</i>	$\underline{point} \times \underline{region} \rightarrow \underline{bool}$	Der Operator <i>inside</i> prüft, ob ein Punkt innerhalb einer Fläche liegt. Das Ergebnis kann entweder <i>true</i> oder <i>false</i> lauten – Datentyp <i>bool</i> .
<i>length</i>	$\underline{line} \rightarrow \underline{real}$	Durch den Operator <i>length</i> erfolgt die Ermittlung der Länge einer Linie <i>line</i> .
<i>attime</i>	$\underline{mpoint} \times \underline{time} \rightarrow \underline{point}$	Der Operator <i>attime</i> liefert die Position eines bewegten Punktes zum Zeitpunkt <i>t</i> . Ergebnis ist ein Punkt <i>point</i> .
<i>minvalue</i> / <i>maxvalue</i>	$\tau(\alpha) \rightarrow \alpha$	<i>minvalue</i> bzw. <i>maxvalue</i> geben den Minimal- bzw. Maximalwert eines bewegten Objekts aus.

<i>start/ stop</i>	$\tau(\alpha) \rightarrow \underline{time}$	Diese beiden Operatoren liefern den Anfangs, sowie den Endzeitpunkt der Bewegung eines bewegten Objekts.
<i>duration</i>	$\tau(\alpha) \rightarrow \underline{real}$	Mit dem Operator <i>duration</i> kann die Dauer einer Bewegung ermittelt werden.

Von Güting et al. (2000) wurden die nach Erwig et al. (1999) eingeführten Operatoren und Datentypen aufgegriffen und durch weitere raum-zeitliche Operatoren ergänzt. Zusätzlich zu den Datentypen *mpoint* und *mregion* wird der Datentyp *mline*, der eine bewegte Linie repräsentiert, eingeführt. Die Definition zeitlicher Datentypen kann hierbei entweder durch die Angabe von Funktionen oder durch eine begrenzte Anzahl von einzelnen Wertpaaren, welche Zeitpunkt und Wert einer Bewegung beinhalten, erfolgen. (Erwig et al., 1999; Güting et al., 2000)

Tabelle 8: Raum-zeitliche Operatoren nach Güting et al. (2000)

OPERATOR	DEFINITION
<i>deftime</i>	Gibt die Zeiten der Funktion von bewegten Objekten aus.
<i>rangevalues</i>	Gibt die Werte einer Funktion bewegter Objekte zurück.
<i>locations</i>	Die Bewegung eines <i>mpoint</i> wird durch einzelne Schritten und nicht als kontinuierliche Funktion in die Ebene projiziert.
<i>routes</i>	Dieser Operator liefert die Projektion einer bewegten Linie <i>mline</i> .
<i>closest</i>	Ermittelt Zeitpunkt und Position des geringsten Abstandes eines bewegten Punktes <i>mpoint</i> zu einem Punkt <i>point</i> .
<i>inst / val</i>	<i>intime</i> ermöglicht eine Übertragung eines Typs α in einen Typ, welcher die Werte von α mit Zeitpunkten verknüpft. Diese beiden Operatoren liefern die Komponente Zeitpunkt (instant) bzw. den Wert (value) eines Typs <i>intime</i> .
<i>atinstant / atperiods</i>	Mit diesen Operatoren lässt sich der Bewegungsverlauf eines bewegten Objekts auf einen Zeitpunkt bzw. ein zeitliches Intervall begrenzen.

<i>initial</i> <i>/ final</i>	Diese beiden Operatoren liefern das erste bzw. letzte Wertpaar eines bewegten Objekts.
<i>present</i>	Der Operator <i>present</i> ermöglicht eine Überprüfung, ob zu einem bestimmten Zeitpunkt oder im Laufe eines Zeitintervalls ein Wert gegeben ist.
<i>passes</i>	Prüft, ob ein bestimmter Wert erreicht wurde.
<i>when</i>	Durch diesen Operator lässt sich der Bewegungsablauf auf die Zeiten begrenzen, zu denen eine Bedingung erfüllt wird.
<i>derivative</i>	Mit dem Operator <i>derivative</i> lässt sich die Veränderung der Werte eines bewegten Objekts ermitteln.
<i>speed</i>	Der Operator <i>speed</i> stellt die Geschwindigkeit eines bewegten Objekts zur Verfügung.
<i>turn</i>	<i>turn</i> liefert die Richtungswechsel eines bewegten Objekts.
<i>velocity</i>	Mit <i>velocity</i> wird die Bewegung eines bewegten Punktes in Form von Vektoren geliefert, die ebenfalls als <i>mpoint</i> übermittelt werden.

5.2 Operatoren des Datenmodells MOST

In Kapitel 2.1.4 wurde das Datenmodell MOST nach Sistla et al. (1997) vorgestellt. Hierbei wurde bereits auf Unterschiede zu anderen Datenmodellen hingewiesen. In diesem Datenmodell werden die Koordinaten eines bewegten Punktes als dynamische Attribute betrachtet, die sich entsprechend einer vorgegebenen Funktion im Laufe der Zeit verändern. Diese Attribute bestehen wiederum aus den drei Unterattributen *value*, *updatetime* und *function*. Das Unterattribut *value* liefert den Wert, der entsprechend der Funktion *function* zum Zeitpunkt *updatetime* ermittelt wurde. Dynamische Attribute sorgen für stetig wechselnde Datenbestände und werden durch zeitliche Funktionen beschrieben, welche die Berechnung der Attributwerte zu jedem Zeitpunkt t ermöglichen. Hierbei ist zu beachten, dass die Daten verschiedener Zeitpunkte niemals zur selben Zeit in der Datenbank gespeichert sind. Ein Wert zu einem Zeitpunkt t wird immer durch die gegebene

Funktion berechnet. Demnach liefern Datenbankabfragen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden, verschiedene Ergebnisse. Die an MOST Datenbanken gerichteten Abfragen basieren auf der Abfragesprache *Future Temporal Logic (FTL)*. (Sistla et al., 1997)

Zur weiteren Untersuchung dieses Datenmodells werden im Folgenden einige der nach Sistla et al. (1997) eingeführten raum-zeitlichen Operatoren aufgelistet.

Tabelle 9: Raum-zeitliche Operatoren nach Sistla et al. (1997)

OPERATOR	DEFINITION
<i>BEGIN_TIME / END_TIME</i>	Gibt den Anfangs- bzw. den Endzeitpunkt eines Intervalls an.
<i>DIST</i>	Mit diesem Operator lässt sich die Distanz zweier Objekte ermitteln.
<i>INSIDE / OUTSIDE</i>	<i>INSIDE</i> und <i>OUTSIDE</i> ermöglichen es abzufragen, ob sich ein Objekt innerhalb bzw. außerhalb eines Polygons befindet.
<i>WITHIN_A_SPHERE</i>	Dieser Operator gibt an, ob ein Objekt innerhalb eines Umkreises mit einem vorgegebenen Radius liegt.
<i>UNTIL</i>	Mit <i>UNTIL</i> kann begrenzt werden, bis zu dem Eintritt welches Ereignisses eine Selektion von Daten stattfinden soll.
<i>NEXTTIME</i>	Durch diesen Operator muss eine Bedingung erst das nächste Mal erfüllt werden, damit die Abfrage erfolgt.
<i>EVENTUALLY</i>	<i>EVENTUALLY</i> berücksichtigt Ereignisse in der Zukunft, die eventuell eintreten können.
<i>ALWAYS</i>	Dieser zeitliche Operator selektiert Ereignisse, die in der Gegenwart und der gesamten Zukunft eintreten.

5.3 Beispielabfragen

5.3.1 Analyse bewegter Objekte in Vergangenheit und Gegenwart

Die folgenden Beispiele sollen unterschiedliche Anwendungsfälle der nach Erwig et al. (1999) und Güting et al. (2000) definierten zeitlichen Operatoren aufzeigen. Diese Beispielabfragen stellen nur eine Auswahl möglicher Abfragen dar und sollen dazu dienen, die vorgestellten Operatoren in Bezug auf die in Kapitel 4 formulierte Konzeptionierung zu betrachten und ihre Anwendbarkeit zu untersuchen.

Zur optimalen Einordnung der gezeigten Beispielabfragen in das Fallbeispiel dieser Masterthesis erfolgt die Einführung von Entitäten, die zudem als Grundlage für die weitere Untersuchung dienen. Dabei wird der Schwerpunkt besonders auf die Behandlung von nicht motorisierten Verkehrsteilnehmern bzw. Fußgängern gelegt.

Verkehrsteilnehmer:

Als Verkehrsteilnehmer sind alle Personen und Fahrzeuge, die am Verkehrsgeschehen teilnehmen, zu betrachten. Die Verwaltung von Verkehrsteilnehmern erfolgt über die Angabe einer *id* des Typs *integer* sowie einer Route des Datentyps *mpoint*.

Dies begründet sich dadurch, dass die aktuelle Position eines Verkehrsteilnehmers einen Punkt darstellt, dessen Position sich zeitlich verändern kann. Mittels des Attributs *typ* wird zwischen verschiedenen Typen von Verkehrsteilnehmern, wie beispielsweise Fußgänger, Fahrrad, Auto usw. unterschieden.

```
vtn(id:integer, typ:string, route:mpoint)
```

Wetterereignisse:

Wetterereignisse können Einfluss auf die Sicherheit im Straßenverkehr nehmen. Auch können Fußgänger durch Blitzeis oder Unwetter gefährdet sein. Wetterereignisse sind regulär als großflächige Ereignisse zu verstehen, welche sich in ihrer Lage und räumlichen

Ausdehnung zeitlich verändern. Demnach wird zur Definition der Lage der Datentyp *mregion* verwendet.

```
wet (id:integer, typ:string, lage:mregion)
```

Großveranstaltungen:

Großveranstaltungen können sich in ihrer räumlichen Ausdehnung je nach Besucherzahl zeitlich verändern. Verwendung findet der Datentyp *mregion*.

```
vst (id:integer, typ:string, lage:mregion)
```

Unfälle:

Unfälle stellen in aller Regel punktuelle Ereignisse dar, welche sich zu einem bestimmten Zeitpunkt ereignen.

Daraus resultierende Störungen des Straßenverkehrs sollen dabei nicht berücksichtigt werden. Der Zeitpunkt des Unfalls steht hierbei im Vordergrund.

```
unf (id:integer, typ:string, lage:point, zeitpunkt:datetime)
```

Naturkatastrophen:

Naturkatastrophen stellen unter Umständen eine erhebliche Bedrohung für die Zivilbevölkerung dar. So ist bei Erdbeben, je nach Intensität, ein Einsturz von Bauwerken nicht auszuschließen.

Ebenso können Überschwemmungen oder auch Lawinen viele Opfer fordern. Naturkatastrophen sind in der Regel großflächige Ereignisse, deren räumliche Ausdehnung zeitlich variiert. Die Definition ihrer Lage erfolgt mittels des Datentyps *mregion*.

```
kat (id:integer, typ:string, lage:mregion)
```

Beispielabfragen:

Mit diesen Entitäten lassen sich nun unter Verwendung der zuvor präsentierten Operatoren nach Erwig et al. (1999) und Güting et al. (2000) folgende Fragen beantworten.

1. Welche Fußgänger waren betroffen, als das Unwetter über das Festival „Love Family Park“ in Mainz gezogen ist?

Bei dieser Abfrage erfolgt die Ermittlung der Verschneidung der beiden *mregion* Elemente des Gewitters und des Festivals. Mit Hilfe der Operatoren *visits* und *duration* erfolgt die Ermittlung der Dauer des Aufenthalts eines Fußgängers in dieser Fläche.

Ist die Dauer des Aufenthalts größer *Null*, so hat sich die betroffene Person in dieser Fläche aufgehalten und wird selektiert.

```
SELECT vtn.id
FROM vtn, wet, vst
WHERE
  vtn.typ = "Fußgänger" AND
  wet = "Gewitter" AND
  vst = "Love Family Park Mainz" AND
  duration(visits(vtn.route, (interesection(wet.lage, vst.lage))) > 0
```

2. Welche Fußgänger kommen einem Auto, das sich mit mehr als 20km/h bewegt, näher als 1m?

Mit Hilfe der Operatoren *minvalue* und *mdistance* lässt sich diese Abfrage realisieren. Zunächst werden die Fußgänger und Autos entsprechend ihrem Attribut *typ* selektiert. Deren raum-zeitliche Distanz wird mittels *mdistance* bestimmt und durch *minvalue* der geringste Abstand beider Verkehrsteilnehmer ermittelt. Dieser Abstand muss anschließend kleiner als 1m sein. Hierbei wird bei der Bewegung des Autos nur der Teil des Bewegungsprofils beachtet, in welchem sich das Fahrzeug mit mehr als 20km/h bewegt hat.

```

SELECT fg.id, auto.id
FROM vtn fg, vtn auto
WHERE fg.typ = "Fußgänger" AND auto.typ = "Auto" AND
      minvalue(mdistance(fg.route,
      (trajectory(atperiods(auto.route,
      deftime(at(speed(auto.route) > 20, TRUE)))))) < 1.0

```

3. Zu welchem Zeitpunkt hatte der Fußgänger mit der ID 1234, der als potentieller Augenzeuge gesucht wird, den geringsten Abstand zur Position des Unfalls mit der ID 4711? Wie weit war er von der Unfallstelle entfernt?

Hier erfolgt zunächst eine Definition der Route des Fußgängers mit der ID 1234 und der Lage des Unfalls mit der ID 4711.

Der Operator *closest* gibt mit dem Typ *intime* die Position und den Zeitpunkt des geringsten Abstandes zwischen Fußgänger und Unfallstelle an. Über den Operator *inst* kann der Zeitpunkt dieser Begegnung ausgegeben werden. Die Berechnung der Distanz zwischen beiden Positionen ermöglicht der Operator *distance*.

```

LET ID1234 = ELEMENT(SELECT route FROM vtn WHERE vtn.id = "1234");
LET Unfall = ELEMENT(SELECT lage FROM unf WHERE unf.id = "4711");
LET Entfernung = closest(ID1234, Unfall);

inst(Entfernung);

distance(Unfall, val(Entfernung));

```

4. Welche Personen befanden sich zum Zeitpunkt der maximalen Ausbreitung des Elbe-Hochwassers in der betroffenen Region?

Zur Steigerung der Übersichtlichkeit wird auch hier ein Teil der Abfrage zunächst einer Variablen zugewiesen. So wird aus der Tabelle *kat* der Typ „Elbe-Hochwasser“ selektiert und dessen Geometrieinformationen der Variable *ElbeHW* zugewiesen.

Anschließend wird der Variablen *MaxHW* der Zeitpunkt sowie die maximale Ausdehnung des Elbe-Hochwassers zugewiesen. Hierzu dienen die Operatoren *initial*, *area* und *atmax*.

```
LET ElbeHW = ELEMENT(  
    SELECT lage FROM kat WHERE typ = "Elbe-Hochwasser");  
LET MaxHW = initial(atmax(area(ElbeHW)));
```

Nach diesen Definitionen erfolgt der Hauptteil der Abfrage. In diesem Teil wird aus der Entität *vtn* die ID aller Datensätze selektiert, deren Typ „Fußgänger“ lautet und sich der entsprechende Verkehrsteilnehmer zum Zeitpunkt der maximalen Ausdehnung der Überschwemmung in dem betroffenen Gebiet befunden hat. Dabei findet zur Abfrage des entsprechenden Zeitpunktes der Operator *atinstant* und zur Überprüfung, ob sich der Verkehrsteilnehmer in der Region befunden hat, der Operator *inside* Anwendung.

```
SELECT vtn.id  
FROM vtn  
WHERE vtn.typ = "Fußgänger" AND  
    atinstant(vtn.route, inst(MaxHW)) inside val(MaxHW)
```

5.3.2 Analyse raum-zeitlicher Objekte in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft

Das Datenmodell MOST nach Sistla et al. (1997) bietet durch entsprechende raum-zeitliche Operatoren die Analyse des vorliegenden Datenbestandes bzgl. seiner zu erwartenden Entwicklung. Durch die Verwaltung der Bewegungsvektoren anstelle der Koordinaten von bewegten Objekten lassen sich diese Bewegungen in die Zukunft übertragen und so bei Datenbankabfragen berücksichtigen.

Mit Hilfe der folgenden Beispielabfragen wird die Übertragbarkeit dieses Datenmodells auf das in dieser Masterthesis behandelte Fallbeispiel verdeutlicht.

1. **Um ein Fahrzeug *FZ* gilt eine Sicherheitszone, die durch ein Polygon *SiZo* definiert ist. Welche Verkehrsteilnehmer *VTN* begeben sich in die Sicherheitszone eines Fahrzeugs, das sich mit mehr als 20km/h bewegt?**

Mittels dieser Abfrage lassen sich unmittelbar bevorstehende Gefahren erkennen und ggf. Notfallszenarien einleiten. So könnte ein Fahrzeug zum Ausweichen oder Abbremsen veranlasst werden.

```
RETRIEVE VTN, FZ

WHERE INSIDE (VTN, SiZo)

Until (Fz.Geschwindigkeit < 20)
```

2. **Welche Fußgänger können die Sicherheitszone eines Fahrzeugs innerhalb der nächsten 10 Sekunden erreichen?**

Diese Abfrage ermöglicht es, bevorstehende Gefahrensituationen frühzeitig zu erkennen und die beteiligten Verkehrsteilnehmer zu warnen. Fußgänger, die beispielsweise plötzlich mit ihrem Smartphone in der Hand eine Straße betreten, können so vor einer Kollision mit einem Fahrzeug gewarnt werden. Ebenso kann die Übermittlung einer Warnung an das betroffene Fahrzeug erfolgen.

```
RETRIEVE VTN

WHERE VTN.Typ = "Fußgänger" ^

Eventually_within_10 INSIDE (VTN, SiZo)
```

3. **Welche Fußgänger *VTN* werden in den nächsten 10 Sekunden den Kreuzungsbereich *KB* einer vielbefahrenen Straße erreichen und sich für weitere 8 Sekunden in diesem befinden?**

Auch diese Abfrage ermittelt Fußgänger, die aufgrund ihres aktuellen Bewegungsvektors innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne den Straßenraum betreten und sich für eine bestimmte Zeit in diesem befinden.

Diese Abfrage stellt besonders für herannahende Fahrzeuge eine Frühwarnung dar. Auf diese Weise kann ermittelt werden, ob zum Zeitpunkt, zu welchem ein Fahrzeug den Straßenraum passieren wird, mit Fußgängern zu rechnen ist.

RETRIEVE VTN

```
WHERE VTN.Typ = "Fußgänger" ^
Eventually_within_10 (INSIDE (VTN,KB) ^
Always_for_8 INSIDE (VTN,KB))
```

4. Welche Schulkinder werden in den nächsten 6 Sekunden den Straßenraum SR betreten, sich für 4 Sekunden in diesem befinden und nach 7 Sekunden die Sicherheitszone *SiZo* eines Fahrzeugs erreichen?

Diese Abfrage kann beispielsweise vor Kindern warnen, welche zum Ende eines Schultages unachtsam auf die Straße laufen. Dabei wird zum einen davor gewarnt, dass sich in Kürze Kinder im Straßenraum befinden und dort bis zur Ankunft des Fahrzeugs in diesem verweilen und zum anderen die Gefahr besteht, dass diese die Sicherheitszone des Fahrzeugs betreten. In diesem Fall kann der Fahrzeugführer vor der bevorstehenden Gefahr gewarnt werden.

RETRIEVE VTN

```
WHERE VTN.Typ = "Schulkinder" ^
Eventually_within_6 (
(INSIDE (VTN,SR) ^
Always_for_4 (INSIDE (VTN,SR)) ^
Eventually_after_7 INSIDE (VTN,SiZo)))
```

6 Diskussion

Die Grundlage dieser Masterthesis bildete die Untersuchung von Möglichkeiten zur Integration der Zeit in Geoinformationssysteme. Dabei stellte sich die Entwicklung von Datenmodellen zur Verarbeitung bewegter Objekte als ein interessanter Schwerpunkt in diesem Umfeld heraus. Besonders bei dem behandelten Fallbeispiel, welches die Auswertung von Datenbeständen aus dem Bereich der Verkehrsplanung und des Straßenverkehrs betrifft, spielen die Dynamik und der Bewegungsablauf der Verkehrsteilnehmer eine wichtige Rolle.

Damit eine Auswertung dieser Datenbestände entsprechend ihrer raum-zeitlichen Dimensionierung erfolgen kann, sind raum-zeitliche Datenmodelle zu verwenden. Entsprechend wurden zunächst grundlegende Datenmodelle zur Behandlung bewegter Objekte präsentiert. Es zeigte sich zudem, dass seit dem Jahr 2015 mit *OGC Moving Features* ein Standard existiert, der eine Implementierungsspezifikation des abstrakten Standards *Geoinformation - Schema für sich bewegende Objekte DIN EN ISO 19141 (2009-12)* bietet und somit die Datenhaltung bewegter Objekte standardisiert.

Dabei wurde deutlich, dass die zuvor behandelten Datenmodelle in einigen Bereichen Einfluss auf die Entwicklung dieses Standards genommen haben.

Im weiteren Verlauf wurde ein Konzept entwickelt, um die Anwendung der einzelnen Datenmodelle in Bezug zur Verkehrsforschung zu untersuchen. In diesem Konzept wurde von dem Idealfall ausgegangen, dass jeder Verkehrsteilnehmer beispielsweise über ein Smartphone mit aktiven GPS-Modul verfügt und somit die Übermittlung von Bewegungsprofilen an ein zentrales Serversystem erfolgen kann. Mit dieser grundlegenden Annahme und den behandelten raum-zeitlichen Datenmodellen wurde daraufhin untersucht, ob mit Hilfe der eingeführten raum-zeitlichen Operatoren die Ansprüche der Verkehrsplanung und im Speziellen der Car2X-Technologie erfüllt werden können. Da unter Car2X u.a. die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und weiteren Verkehrsteilnehmern, sowie der umliegenden Infrastruktur zu verstehen ist, können anhand der erfassten Bewegungsprofile bevorstehende Gefahrensituationen frühzeitig erkannt und durch Warnung der beteiligten Verkehrsteilnehmer verhindert werden.

6.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Die durchgeführten Untersuchungen und die auf Grundlage der behandelten raum-zeitlichen Datenmodelle entwickelten Beispielabfragen zeigen, dass die Geoinformatik entscheidende Grundlagen zur Auswertung von Bewegungsprofilen bereitstellt.

Zu Beginn dieser Masterthesis wurden unterschiedliche Forschungsfragen formuliert, die nun nach der Untersuchung verschiedener Datenmodelle beantwortet werden können.

Zunächst stellte sich die Frage, inwieweit die Datenmodelle der vergangenen Jahre Einfluss auf die Entwicklung des Standards OGC Moving Features genommen haben. Hierzu wurden insbesondere drei fundamentale Datenmodelle für bewegte Objekte untersucht.

Seit der Veröffentlichung des Standards *OGC Moving Features* wird zur einheitlichen Verwaltung von Bewegungsprofilen eine Implementierungsspezifikation der *DIN EN ISO 19141 (2009-12)* bereitgestellt, die weiteren Entwicklungen zur Verfügung stehen wird.

Bei der Untersuchung des Standards *OGC Moving Features*, konnte festgestellt werden, dass insbesondere die Speicherung der Bewegungsprofile dem Datenmodell nach Erwig et al. (1999) ähnelt. Auffallend war dabei, dass von Erwig et al. (1999) bei der Speicherung einzelner Abschnitte eines Bewegungsprofils empfohlen wurde, zur natürlicheren Darstellung von Bewegungsabläufen auf kubische Polynomfunktionen zurückzugreifen. Der Standard der *OGC* nutzt hierzu jedoch lineare Funktionen, was nach Erwig et al. (1999) als unnatürlich bezeichnet wurde.

Hier sei jedoch berücksichtigt, dass der *OGC* Standard im Jahr 2015 eingeführt wurde und sich somit auf den aktuellen Stand der Technik beziehen konnte. Heute ist es durchaus möglich, die Position eines Mobilfunkgeräts in geringen Zeitabständen zu ermitteln und an einen Server zu übertragen, während dies zur Veröffentlichung des Datenmodells von Erwig et al. (1999), bedingt durch geringere Bandbreiten des Mobilfunknetzes, sowie der noch nicht so fortgeschrittenen Mobilfunktechnik, nicht im heute gewohnten Umfang möglich war. Aufgrund dieser Gegebenheit können die Erfassungsintervalle heute so gering gewählt werden, dass eine Interpolation zwischen zwei benachbarten Zeitpunkten mittels linearer Funktion ausreicht, um den Bewegungsverlauf eines Mobilfunkgerätes zu

rekonstruieren. Die in dem Standard der *OGC* getroffene Entscheidung, lineare Funktionen zur Interpolation heranzuziehen, genügt demnach zur Modellierung von Bewegungsabläufen, sofern das Erfassungsintervall möglichst gering gehalten wird. Bei der Wahl des Intervalls müssen dann Reaktionszeiten und die Geschwindigkeit der Objekte berücksichtigt werden, um zeitliche Lücken so gering wie möglich zu halten. Diese Entscheidung muss jedoch je nach Anwendungsfall erfolgen.

Im Gegensatz zu den Datenmodellen nach Sistla et al. (1997), Erwig et al. (1999) und Güting et al. (2000) liefert der *OGC* Standard lediglich eine Implementierungsspezifikation, die zur Speicherung der Bewegungsprofile verwendet werden kann. Eine Definition spezieller Operatoren zur Auswertung bewegter Objekte wurde nicht durchgeführt. Hier sollte in Zukunft eine entsprechende Erweiterung entwickelt werden, um auch die Auswertung raum-zeitlicher Datenbestände und im Speziellen von bewegten Objekten durch die *OGC* zu standardisieren. Diese Vorgehensweise könnte die Entwicklung von Anwendungen, die auf eine solche Analyse angewiesen sind, deutlich vereinfachen, da dann nur noch auf diesen Standard zugegriffen werden muss.

Bei der Entwicklung von Softwareprodukten, die zur Auswertung bewegter Objekte und raum-zeitlicher Datenbestände dienen, müssen gewisse Anforderungen erfüllt werden, um speziell bei der Car2X-Technologie die Gefährdung von Verkehrsteilnehmern zu vermeiden. Demnach müssen die genutzten Datenmodelle zunächst die allgemeinen Anforderungen dieser Technik erfüllen und zudem in der Lage sein, Gefahrensituationen zu prognostizieren. *Dementsprechend wurde untersucht, ob der Standard OGC Moving Features die benötigten Grundlagen für diese Technologie erfüllt.*

Diese Frage lässt sich nur bedingt beantworten. Denn zunächst konnten die Untersuchungen zeigen, dass der *OGC* Standard die nötigen Definitionen bietet, um Bewegungsprofile in Form einer XML- oder CSV-Schnittstelle bereitzustellen. Jedoch bietet dieser Standard keine entsprechenden Operatoren, die zur Datenanalyse dienen. Dennoch wird in erster Linie durch die standardisierte CSV-Schnittstelle eine Datenübermittlung von Bewegungsprofilen ermöglicht, die deutlich weniger Speicherplatz in Anspruch nimmt, als die ebenso definierte XML-Schnittstelle. Auf diese Weise kann auch die Übertragung über

Mobilfunknetze beschleunigt werden, was eine Sammlung von Bewegungsprofilen nahezu in Echtzeit ermöglicht. Diese wird speziell in der Car2X-Technologie benötigt, um auch kurzfristig auf bevorstehende Ereignisse hinzuweisen oder den Verkehrsteilnehmer auf sicherheitsrelevante Verkehrssituationen aufmerksam zu machen.

Der *OGC* Standard dient in erster Linie der Bereitstellung entsprechender Bewegungsprofilen. Zur Auswertung wurden durch die behandelten Datenmodelle entsprechende raum-zeitliche Operatoren bereitgestellt. *Im Verlauf dieser Masterthesis wurde untersucht, ob diese Operatoren auf das behandelte Fallbeispiel anwendbar sind.*

In Kapitel 5 wurden die Operatoren der Datenmodelle nach Sistla et al. (1997), Erwig et al. (1999) und Güting et al. (2000) vorgestellt und durch entsprechende Anwendungsbeispiele näher betrachtet. Dabei stellte sich heraus, dass die Operatoren nach Erwig et al. (1999) und Güting et al. (2000) speziell zur Auswertung historischer und gegenwärtiger raum-zeitlicher Datenbestände genutzt werden können. Im Gegenzug hierzu wurden von Sistla et al. (1997) zu dem entwickelten Datenmodell *MOST* Operatoren entwickelt, die die Prognose zu erwartender Bewegungen ermöglichen. So konnten auf Grundlage dieser Operatoren u.a. eine Beispielabfrage entwickelt werden, die eine Selektion aller Fußgänger ermöglicht, die innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne voraussichtlich die Sicherheitszone eines Fahrzeugs betreten.

Die Speicherung der Positionsdaten eines bewegten Objekts erfolgt nach Sistla et al. (1997) durch Angabe der Bewegungsvektoren, anhand welcher die Ermittlung der Position zum Zeitpunkt t ermöglicht wird. Mit Hilfe dieses Vektors lässt sich dann die Bewegung über den aktuellen Zeitpunkt hinweg modellieren.

Eine weitere Forschungsfrage, die zu Beginn dieser Masterthesis formuliert wurde, war die Frage nach dem *Einfluss der Geoinformatik auf weitere Forschungen des Verkehrswesens und im Speziellen der Car2X-Technologie*. Betrachtet man die vorgestellten Standards und Datenmodelle als Grundlagen der Geoinformatik im Umgang mit bewegten Objekten, so ist hier deutliches Potential zur Einflussnahme auf die Car2X-Technologie zu verzeichnen. Besonders die Analyse der Bewegungsprofile von Fußgängern lässt sich durch die Anwendung geeigneter Datenmodelle realisieren. Bei der Literaturrecherche

konnte allerdings festgestellt werden, dass die Umsetzung der entwickelten Datenmodelle nur schleppend voranschreitet und selbst gängige Geoinformationssysteme in der Regel lediglich über die Verwaltung von Snapshots verfügen. Durch entsprechende Erweiterungen gängiger Geoinformationssysteme sollten die Potentiale gezeigter Datenmodelle aufgegriffen werden, um die Interdisziplinarität der Geoinformatik weiter zu verstärken.

6.2 Optimierungen und Potentiale

Die untersuchten Datenmodelle haben die Grundlagen der Geoinformatik im Umgang mit bewegten Objekten aufgezeigt. In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl solcher wissenschaftlichen Arbeiten präsentiert und entsprechende Weiterentwicklungen durchgeführt. Bei der Analyse von Verkehrssituationen sind hierbei einige dieser Punkte in der durchgeführten Konzeptionierung und Untersuchung der Datenmodelle ausgelassen worden, um den Umfang dieser Masterthesis im Rahmen zu halten.

Mit der fortschreitenden Entwicklung der Car2X-Technologie, sowie der Weiterentwicklung von Projekten des autonomen Fahrens, steigt auch entsprechend der Bedarf an Datenmodellen zur Analyse der dabei erfassten raum-zeitlichen Datenbestände und Bewegungsprofilen. Dabei wird besonders die Handhabung der entstehenden Datenmenge weiter im Zentrum der Entwicklung stehen. Ebenso steigt mit Zunahme der Smartphonennutzer auch die Auslastung des Mobilfunknetzes. Um den Datentransfer möglichst gering zu halten, wurde der behandelte OGC Standard bereits um das CSV-Schema erweitert, welches eine Datenübermittlung mit geringerem Datenvolumen ermöglichen soll.

Dieses Thema verfügt daher über genügend Potential, um weiterhin Teil der Forschung im Umfeld der Geoinformatik zu sein.

Für weitere Untersuchungen empfiehlt es sich jedoch, potentielle Fehlerquellen näher zu untersuchen und die Potentiale vergangener Forschungsprojekte bei der Weiterentwicklung und Optimierung dieses Konzepts zu berücksichtigen.

6.2.1 Berücksichtigung des Straßennetzes

Die betrachteten Datenmodelle beziehen sich in erster Linie zunächst auf die Behandlung von bewegten Objekten im Raum, ohne hierbei das Straßennetz zu berücksichtigen, welches die Bewegung von Fahrzeugen maßgeblich beeinflussen kann.

Von Güting et al. (2006) wird diese Einflussnahme berücksichtigt und zwischen bewegten Objekten im Raum und in Netzwerken unterschieden. Hieraus ergeben sich weitere Potentiale der Datenanalyse, die besonders im Umfeld der Verkehrsforschung Berücksichtigung finden sollten. Es besteht somit die Möglichkeit, die Position von Verkehrsteilnehmern relativ zum zugrundeliegenden Straßennetz zu betrachten und entsprechende Analysen durchzuführen.

Entsprechend dieser Entwicklung gibt es viele weitere Forschungsprojekte, die bei einer Fortführung des hier behandelten Themas berücksichtigt werden sollten, um die Qualität der Analyseergebnisse weiter zu optimieren.

Bezogen auf das behandelte Fallbeispiel bleiben dabei jedoch einige Punkte offen, deren Untersuchung weitergeführt werden sollte. So ist die Bewegung von Fußgängern nur schwer einem Straßennetz zuzuordnen. Während die Bewegung von Fahrzeugen in der Regel entlang eines Straßenabschnitts erfolgt, können sich Fußgänger frei bewegen und beispielweise spontan von einem Fußgängerweg in den Straßenraum wechseln.

In Kapitel 5 wurde eine Sicherheitszone um ein Fahrzeug angenommen. Betritt ein Fußgänger diese Zone, so erhalten der Fahrzeugführer, als auch der Fußgänger eine entsprechende Warnung. Mittels der Operatoren nach Sistla et al. (1997) lässt sich ein solches Zusammentreffen prognostizieren. Hierbei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass ein Fahrzeug in der Regel mit einem sehr geringen Abstand entlang von Fußgängerwegen fährt. Bewegt sich ein Fußgänger auf einem Fußgängerweg, während ein Fahrzeug auf der Straße an ihm vorbeifährt, so ist es möglich, dass sich der Fußgänger für kurze Zeit in der Sicherheitszone des Fahrzeugs befindet, obwohl in diesem Fall keine Gefahr besteht. Dies hätte also einen Fehllalarm zur Folge. Diese Problematik könnte beispielsweise gelöst werden, indem Fußgänger, die sich entlang eines Fußgängerweges bewegen, während die Bewegung des Fahrzeugs innerhalb des Straßenraums erfolgt, bei der Analyse

unberücksichtigt bleiben. In diesem Fall wäre der Abschnitt des Fußgängerwegs, in welchem sich der jeweilige Fußgänger bewegt, als dessen Sicherheitszone zu betrachten.

6.2.2 Potentielle Fehlerquellen

Zur Optimierung der Analyseergebnisse zählt die Berücksichtigung und Eliminierung potentieller Fehlerquellen. Diese können großen Einfluss auf die Qualität des Datenbestandes und somit auch auf die Qualität der Analysen nehmen.

In weiterführenden Forschungsarbeiten sollten daher besonders die Genauigkeiten der GPS-Ortung berücksichtigt werden und eine Entwicklung von Methoden im Mittelpunkt stehen, die eine Generierung von Warnungen auch bei geringer Positionsgenauigkeit ermöglichen. Die in Kapitel 4.1.3 aufgezeigten Lageabweichungen sollten bei der Weiterentwicklung durch Berücksichtigung weiterer Sensordaten kompensiert werden. In diesem Zusammenhang sollte die Suche nach Verfahren zur Selektion von Personen, die aufgrund ihres Aufenthalts in geschlossenen Räumen über eine schlechte Ortungsqualität verfügen, ein Teil der Weiterentwicklung darstellen.

Des Weiteren wurde durch die Betrachtung der Vorgehensweise der Smartphone-Applikation Skobbler aufgezeigt, dass bei fehlender Verbindung zum Mobilfunknetz die Übertragung der in diesem Zeitraum stattgefundenen Bewegungen bei Wiederaufnahme der Verbindung erfolgt. Es ist demnach entscheidend, entsprechende Modelle zur Handhabung und Bewertung von bewegten Objekten zu entwickeln, die zum Zeitpunkt einer bevorstehenden Gefahrensituation keine Verbindung zum Mobilfunknetz haben. Diese Verkehrsteilnehmer können demnach nicht vor dieser Situation gewarnt werden, noch ist ihre vorliegende Positionsinformation als aktuell zu betrachten.

Ebenso bleibt die Frage offen, wie mit Smartphones verfahren werden sollte, die sich innerhalb eines Fahrzeugs befinden. Erfolgt eine Registrierung dieser Verkehrsteilnehmer innerhalb der Sicherheitszone des Fahrzeugs? Hierbei wäre denkbar, dass der Verkehrsteilnehmer vor dem Antritt seiner Bewegung die Bewegungsart festlegt. Beispielsweise könnte diese Definition automatisch erfolgen, sobald eine Person den Innenraum eines Fahrzeugs betritt. Somit wären alle Insassen eines Fahrzeugs als solche registriert und würden nicht weiter als Fußgänger behandelt werden.

Des Weiteren muss bei der Ermittlung des Abstands zwischen Fußgängern und Fahrzeugen speziell die räumliche Ausdehnung des Fahrzeugs Berücksichtigung finden. Eine Lösung dieser Problematik kann durch Anpassung der Sicherheitszone erfolgen. So verfügt beispielsweise ein Schwerlasttransport oder ein Bus über eine größere Sicherheitszone, als ein Kleinwagen. Dabei ist jedoch die Position des GPS-Sensors zu berücksichtigen. Wie in Abbildung 8 des Kapitels 2.2.2 dargestellt, hat die Position des GPS-Sensors Einfluss auf den Abstand zwischen zwei Verkehrsteilnehmern. Befindet sich der Sensor beispielsweise an der Front eines Fahrzeugs, so müsste die Länge der Fahrzeuge berücksichtigt werden, sofern der Abstand von zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen ermittelt wird. In dem hier behandelten Konzept, stellt die ermittelte Position das Zentrum des Fahrzeugs dar.

Ferner sollten die Übertragungsgeschwindigkeiten verschiedener Mobilfunknetztypen berücksichtigt werden, die ebenfalls zu einer gewissen Latenz der Datenübertragung und somit einer Minderung der Datenqualität führen können. Überlegungen hierzu wurden bereits in unterschiedlichen Arbeiten durchgeführt. Hier sei u.a. auf die Arbeiten von Scherping et al. (2010), Nikaein und Krco (2011), Lottermann et al. (2012) und Mazzola et al. (2015) verwiesen. In diesen wissenschaftlichen Papers wird insbesondere die Übertragung von Bewegungsdaten via Mobilfunknetz behandelt.

Diese offenen Punkte verdeutlichen weiter, dass eine Zusammenarbeit der Geoinformatik und der Verkehrsforschung sowie weiterer Ingenieurwissenschaften zur Weiterentwicklung der Car2X-Technologie stattfinden muss, um die Qualität der Daten und Analyseergebnisse weiter zu steigern.

6.3 Weitere Schritte und Ausblick

Die Untersuchungen dieser Masterthesis haben gezeigt, dass seitens der Geoinformatik die nötigen Potentiale bereitstehen, die einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Car2X Technologie bieten. Diese Potentiale müssen in weiterführenden Forschungsprojekten aufgegriffen und zur Erstellung entsprechender Datenmodelle und Konzepte genutzt werden.

Es wurde aufgezeigt, dass die Entwicklung des autonomen Fahrens immer weiter fortschreitet. Das Erkennen von Gefahrensituationen gehört ebenso zum vorausschauenden Fahren, wie die Umfahrung von Straßensperrungen oder der Berücksichtigung des Gegenverkehrs. Diese Fähigkeit ist in aller Regel die Aufgabe des Fahrzeugführers. Erfolgt die Steuerung eines Fahrzeugs jedoch durch ein Computersystem, so müssen diese Situationen über Sensoren und durch die Auswertung raum-zeitlicher Daten durch das Fahrzeug selbst erfolgen.

Die im Rahmen dieser Masterthesis durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass auch die Geoinformatik ihren Beitrag zu dieser Technologie leisten kann. Die stetige Zunahme an Smartphone-Nutzern sorgt für eine fortschreitende Verdichtung des Sensornetzwerks, welches zur Bereitstellung von Bewegungsprofilen der Smartphonenuutzer herangezogen werden kann. Es ist ebenso Aufgabe der Geoinformatik, den Anwendern aufzuzeigen, dass die Erfassung von Bewegungsprofilen auch zu ihrer eigenen Sicherheit beitragen wird.

Der nächste Schritt in diesem Thema sollte die Erweiterung des Standards *OGC Moving Features* um entsprechende raum-zeitliche Operatoren sein. Denn nur mit Operatoren, wie sie in den behandelten Datenmodellen eingeführt wurden, ist eine Auswertung raum-zeitlicher Daten bzw. bewegter Objekte möglich.

Hierbei verfügt die Geoinformatik über einen hohen Stellenwert, der durch weitere Forschungsprojekte im Bereich der Car2X-Technologie zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

7 Literaturverzeichnis

- ALLEN, James, 1983. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*, 26:11, 832-843.
- ALLEN, James, 1984. Towards a General Theory of Action and Time. *Artificial intelligence*, 23:2, 251-276.
- ALLEN, James & KOOMEN, Johannes A. Planning Using a Temporal World Model. In: BUNDY, A., ed. 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 08.1983, Karlsruhe. Morgan Kaufmann Publishers, 741-747.
- ASAHARA, Akinori, HAYASHI, Hideki, ISHIMARU, Nobuhiro, SHIBASAKI, Ryosuke & KANASUGI, Hiroshi. International Standard "OGCR Moving Features" to address "4Vs" on locational BigData. IEEE International Conference on Big Data, 29.10.2015 - 01.11.2015 Santa Clara, CA, USA. 1897-1905.
- BARTELME, Norbert, 2005. *Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen. 4. Auflage*. Berlin: Springer Verlag.
- BENDIX, Joerg, BERTHMANN, Frank & REUDENBACH, Christoph. NOAA-AVHRR and 4D GIS-towards a more realistic view of fog clearance. In: STEIN, T. I., ed. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 28.06. - 02.07.1999, Hamburg. Hamburg: IEEE, 2235-2237.
- BROBEIT, Peter, MÜLLER, Matthias & BERNARD, Lars, 2014. Modellierung und Analyse Dynamischer Geoobjekte in einer Geodatenbank. *gis. SCIENCE*, 3, 77-86.
- connect, 2013. *Wer bietet die besten Staumelder* [Online]
URL: <http://www.connect.de/ratgeber/staumeldungen-verkehrsinfos-vergleich-navi-apps-festeinbau-1894203.html> [Zuletzt aufgerufen: 28.11.2015].
- Daimler, 2015. *Daimler treibt autonomes Fahren nachhaltig und umfassend voran* [Online]
URL: <http://media.daimler.com/dcmmedia/0-921-614316-49-1801960-1-0-0-0-1-0-0-0-1-@aj.a1.s191408-0-0-0-0.html?TS=1448820031356> [Zuletzt aufgerufen: 29.11.2015].
- Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 19108 Geoinformation - Zeitliches Schema (ISO 19108:2002). Berlin: Beuth, 2005-05.
- Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 8601 Datenelemente und Austauschformate - Informationsaustausch - Darstellung von Datum und Uhrzeit (ISO 8601:2004). Berlin: Beuth, 2006-09.
- Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 19141 Geoinformation - Schema für sich bewegende Objekte (ISO 19141:2008). Berlin: Beuth, 2009-12.
- DÖNER, Fatih, THOMPSON, Rod, STOTER, Jantien, LEMMEN, Christiaan, PLOEGER, Hendrik, OOSTEROM, Peter van & ZLATANOVA, Sisi, 2011. Solutions for 4D cadastre - with a case study on utility networks. *International Journal of Geographical Information Science*, 25:7, 1173-1189.
- EHLERS, Manfred, 2006. Geoinformatik: Wissenschaftliche Disziplin oder alter Wein in neuen Schläuchen. *Geo-Informationssysteme*, 11, 20-26.

- ENGEL, Sebastian, KRATZSCH, Claudia & DAVID, Klaus 2013. Car2Pedestrian-Communication: Protection of Vulnerable Road Users Using Smartphones. In: FISCHER-WOLFARTH, J. & MEYER, G., *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2013 - Smart Systems for Safe and Green Vehicles*. Berlin: Springer International Publishing. 31-41.
- ERWIG, Martin, GÜTING, Ralf Hartmut, SCHNEIDER, Markus & VAZIRGIANNIS, Michalis, 1999. Spatio-temporal data types: An approach to modeling and querying moving objects in databases. *GeoInformatica*, 3:3, 269-296.
- European Telecommunications Standards Institute, 2009. 102 638 Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions. Sophia Antipolis Cedex: ETSI
- FABRITIIS, C. de, RAGONA, R. & VALENTI, G. Traffic Estimation And Prediction Based On Real Time Floating Car Data. 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 12.10. - 15.10.2008, Beijing. IEEE, 197-203.
- FELLENDORF, Dr. Martin & HAUPT, Thomas. 4D-Verkehrsmodelle: Verkehrsplanerische Lösungen entwickeln und vermitteln. CORP - Competence Center of Urban and Regional Planning, 25.02 - 01.03.2003 Wien.
- Focus Online, 2015. *Snowden: NSA und GCHQ hacken SIM-Karten-Hersteller* [Online]
URL: http://www.focus.de/digital/multimedia/telekommunikation-sim-karten-hacking-so-wird-das-smartphone-sicherer_id_4491360.html [Zuletzt aufgerufen: 13.08.2015].
- FRANK, Andrew U. 1998. Different Types of "Times" in GIS. In: EGENHOFER, M. J. & GOLLEDGE, R. G., *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*. Oxford University Press. 40-62.
- Giga, 2015. *Edward Snowden würde nie ein iPhone verwenden* [Online]
URL: <http://www.giga.de/personen/edward-j.-snowden/news/edward-snowden-wuerde-nie-ein-iphone-verwenden/> [Zuletzt aufgerufen: 13.08.2015].
- GOODCHILD, Michael F., 2007. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69:4, 211-221.
- GOODCHILD, Michael F., 2009. Geographic information systems and science: today and tomorrow. *Annals of GIS*, 15:1, 3-9.
- GOODCHILD, Michael F., 2013. Prospects for a Space–Time GIS. *Annals of the Association of American Geographers*, 103:5, 1072-1077.
- GRASER, Anita. Visualisierung raum-zeitlicher Daten in Geoinformationssystemen am Beispiel von Quantum GIS mit „Time Manager“-Plug-In. FOSSGIS, Heidelberg. 73-75.
- GÜTING, Ralf Hartmut, 1994. An introduction to spatial database systems. *The VLDB Journal—The International Journal on Very Large Data Bases*, 3:4, 357-399.
- GÜTING, Ralf Hartmut, ALMEIDA, Teixeira de & DING, Zhiming, 2006. Modeling and querying moving objects in networks. *The VLDB Journal—The International Journal on Very Large Data Bases*, 15:2, 165-190.

- GÜTING, Ralf Hartmut, BÖHLEN, Michael H., ERWIG, Martin, JENSEN, Christian S., LORENTZOS, Nikos A., SCHNEIDER, Markus & VAZIRGIANNIS, Michalis, 2000. A foundation for representing and querying moving objects. *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, 25:1, 1-42.
- HILLMANN, Tobias 2009. Photorealistisches 4D-GIS im Altbergbau. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G., *Angewandte Geoinformatik 2009, Beiträge zum 21. AGIT-Symposium Salzburg*. Heidelberg: Wichmann-Verlag. 728-735.
- HOCEVAR, Andreas, LUNAK, Daniela & RIEDL, Leopold. Darstellung von zeitreihen räumlicher daten mittels webmapping. In: SCHRENK, M., ed. *CORP - Competence Center of Urban and Regional Planning*, 25.01. - 27.01.2004, Wien. Manfred Schrenk, 599-607.
- KAHN, Kenneth & GORRY, G. Anthony, 1977. Mechanizing temporal knowledge. *Artificial Intelligence*, 9:1, 87-108.
- KEON, Dylan, STEINBERG, Ben, YEH, Harry, PANCAKE, Cherri M. & WRIGHT, Dawn, 2014. Web-based spatiotemporal simulation modeling and visualization of tsunami inundation and potential human response. *International Journal of Geographical Information Science*, 28:5, 987-1009.
- KLOPPROGGE, Manfred R & LOCKEMANN, Peter C. Modelling Information Preserving Databases: Consequences of the Concept of Time. 9th International Conference on Very Large Data Bases, 31.10. - 02.11.1983 Florence, Italy. 399-416.
- KWAN, Mei-Po, 2013. Beyond Space (As We Knew It): Toward Temporally Integrated Geographies of Segregation, Health, and Accessibility. *Annals of the Association of American Geographers*, 103:5, 1078-1086.
- KWAN, Mei-Po & NEUTENS, Tijs, 2014. Space-time research in GIScience. *International Journal of Geographical Information Science*, 28:5, 851-854.
- KWAN, Mei-Po, XIAO, Ningchuan & DING, Guoxiang, 2014. Assessing Activity Pattern Similarity with Multidimensional Sequence Alignment Based on a Multiobjective Optimization Evolutionary Algorithm. *Geographical Analysis*, 46:3, 297-320.
- LANGE, Norbert De, 2013. *Geoinformatik in Theorie und Praxis*. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- LANGRAN, Gail, 1992. Time in geographic information systems. *Geocarto International*, 7:2, 40-40.
- LANGRAN, Gail & CHRISMAN, Nicholas R., 1988. A Framework For Temporal Geographic Information. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 25:3, 1-14.
- LE, Hai Ha, 2013. Spatio-Temporal Data Construction. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2:3, 837-853.
- LE, Hai Ha, GABRIEL, Paul, GIETZEL, Jan & SCHAEBEN, Helmut, 2013. An object-relational spatio-temporal geoscience data model. *Computers & Geosciences*, 57, 104-115.
- LORKOWSKI, Stefan, BROCKFELD, E, MIETH, P, PASSFELD, B, THIESSENHUSEN, KU & SCHÄFER, RP, 2003. Erste Mobilitätsdienste auf Basis von „Floating Car Data“. *AMUS*, 93-100.

- LOTTERMANN, C., BOTSOV, M., FERTL, P. & MULLNER, R. Performance evaluation of automotive off-board applications in LTE deployments. Vehicular Networking Conference (VNC), 14.11. -16.11.2012, Seoul. IEEE, 211-218.
- MANSFELD, Werner, 2010. *Satellitenortung und Navigation - Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. 3. Auflage.* Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- MAZZOLA, Markus, SCHAAF, Gunther, NIEWELS, Frank & KURNER, Thomas. Exploration of Centralized Car2X-Systems over LTE. 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 11.05. - 14.05.2015, Glasgow. IEEE, 1-5.
- NIKAEIN, Navid & KRICO, Srdjan. Latency for Real-Time Machine-to-Machine Communication in LTE-Based System Architecture. 11th European Wireless Conference, 27.04. - 29.04.2011, Wien. VDE Verlag, 263-268.
- Open Geospatial Consortium (OGC): OGC 14-084r2 OGC Moving Features Encoding Extension: Simple Comma Separated Values (CSV). 2015-02-17.
- Open Geospatial Consortium (OGC): OGC 14-083r2 OGC Moving Features Encoding Part I: XML Core. 2015-02-17.
- ÖZSOYOĞLU, Gultekin & SNODGRASS, Richard T, 1995. Temporal and real-time databases: A survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 7:4, 513-532.
- PEUQUET, Donna J 1999. Time in GIS and geographical databases. In: LONGLEY, P., GOODCHILD, M. & MAGUIRE, D. M., *Geographical information systems: principles, techniques, management, and applications.* New York: John Wiley & Sons. 91-102.
- PEUQUET, Donna J, 2001. Making Space for Time: Issues in Space-Time Data Representation. *GeoInformatica*, 5:1, 11-32.
- PEUQUET, Donna J. & DUAN, Niu, 1995. An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9:1, 7-24.
- REBOLJ, Danijel & STURM, Peter J., 1999. A GIS based component-oriented integrated system for estimation, visualization and analysis of road traffic air pollution. *Environmental Modelling & Software*, 14:6, 531-539.
- RICHARDSON, Douglas B., 2013. Real-Time Space-Time Integration in GIScience and Geography. *Annals of the Association of American Geographers*, 103:5, 1062-1071.
- RICHARDSON, Douglas B., VOLKOW, Nora D., KWAN, Mei-Po, KAPLAN, Robert M., GOODCHILD, Michael F. & CROYLE, Robert T., 2013. Spatial Turn in Health Research. *Science (New York, N.Y.)*, 339:6126, 1390-1392.
- SCHAEUBEN, Helmut, APEL, Marcus, BOOGAART, K Gerald v. d. & KRONER, Uwe, 2003. GIS 2D, 3D, 4D, nD. *Informatik-Spektrum*, 26:3, 173-179.
- SCHÄFER, Ralf-Peter, GÜHNEMANN, Astrid & THIESSENHUSEN, Kai-Uwe, 2003. Neue Ansätze im Verkehrsmonitoring durch Floating Car Daten. *19. Verkehrswissenschaftliche Tage (CD-ROM).*

- SCHERPING, Richard, STÄHLIN, Ulrich & BERTRAM, Torsten, 2010. Systematische Anforderungsanalyse für Car-2-X-Systeme. *GMM-Fachbericht-AmE 2010-Automotive meets Electronics*.
- SCHUELER, Ben-Michael, 1977. Update reconsidered. *Architecture and Models in Data Base Management Systems*. Ed. GM Nijssen. North Holland Publishing Co.
- Scout by Telenav GmbH, 2015. *Floating Car Data* [Online] URL: <http://www.skobbler.de/> [Zuletzt aufgerufen: 30.10.2015].
- SISTLA, A. P., WOLFSON, O., CHAMBERLAIN, S. & DAO, S. Modeling and querying moving objects. In: WERNER, B., ed. 13th International Conference on Data Engineering, 07.04. - 11.04.1997, Birmingham, U.K. . IEEE Computer Society Press, 422-432.
- SNODGRASS, Richard T, BÖHLEN, Michael H, JENSEN, Christian S & STEINER, Andreas 1998. Transitioning temporal support in TSQL2 to SQL3. In: ETZION, O., JAJODIA, S. & SRIPADA, S., Temporal Databases: Research and Practice. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. 150-194.
- Spiegel, 2015. *iSpy: How the NSA Accesses Smartphone Data* [Online] URL: <http://www.spiegel.de/international/world/how-the-nsa-spies-on-smartphones-including-the-blackberry-a-921161.html> [Zuletzt aufgerufen: 13.08.2015].
- Statista GmbH, 2015. *Anzahl der Smartphone-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2015 (in Millionen)* [Online] URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonennutzer-in-deutschland-seit-2010/> [Zuletzt aufgerufen: 22.12.2015].
- TANIKAWA, Hiroki & HASHIMOTO, Seiji, 2009. Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS. *Building Research & Information*, 37:5-6, 483-502.
- Tesla, 2015. *Ihr Autopilot ist da* [Online] URL: https://www.teslamotors.com/de_DE/blog/your-autopilot-has-arrived [Zuletzt aufgerufen: 29.11.2015].
- THEODOULIDIS, Charalampos I & LOUCOPOULOS, Pericles, 1991. The time dimension in conceptual modelling. *Information Systems*, 16:3, 273-300.
- TomTom, 2015. *TomTom Traffic Index: Measuring congestion worldwide* [Online] URL: http://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex [Zuletzt aufgerufen: 29.11.2015].
- TORRENS, Paul M., 2013. High-resolution space-time processes for agents at the built-human interface of urban earthquakes. *International Journal of Geographical Information Science*, 28:5, 964-986.
- TREIBER, Martin & KESTING, Arne, 2010. *Verkehrsdynamik und-simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- VILAIN, Marc B. A System for Reasoning About Time. The Second National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-82), 18.08. - 20.08.1982, Pittsburgh, Pennsylvania. AAAI Press, 197-201.
- WANG, Xinhao, 2005. Integrating GIS, simulation models, and visualization in traffic impact analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29:4, 471-496.

- Die Welt, 2015. *Eine Handy-App als mobiler Schutzengel* [Online]
URL: <http://www.welt.de/regionales/rheinland-pfalz-saarland/article136632082/Eine-Handy-App-als-mobiler-Schutzengel.html> [Zuletzt aufgerufen: 20.12.2015].
- WIDMANN, Nik. Verkehrstelematik und Verkehrsinfrastrukturmanagement: Grundlagen, organisatorische Rahmenbedingungen und innovative Werkzeuge. CORP - Competence Center of Urban and Regional Planning, 14.02. - 16.02.2001 Wien.
- WORBOYS, Michael F., 1994. A unified model for spatial and temporal information.
The Computer Journal, 37:1, 26-34.
- WU, Xiaojing, ZURITA-MILLA, Raul & KRAAK, Menno-Jan, 2015. Co-clustering geo-referenced time series: exploring spatio-temporal patterns in Dutch temperature data.
International Journal of Geographical Information Science, ahead-of-print, 1-19.
- Die Zeit, 2015. *NSA kann Handy-Verschlüsselung knacken* [Online] URL:
<http://www.zeit.de/digital/2015-02/nsa-gchq-edward-snowden-abhoeren>
[Zuletzt aufgerufen: 25.05.2015].
- ZHAO, Lei, JIN, Peiquan, ZHANG, Lanlan, WANG, Huaishuai & LIN, Sheng 2011.
Developing an oracle-based spatio-temporal information management system.
In: XU, J., YU, G., ZHOU, S. & UNLAND, R., Database Systems for Advanced Applications. Berlin Heidelberg: Springer. 168-176.