



Institut für Geographie  
Abteilung Geoinformatik

Visualisierung dynamischer Raumphänomene  
in Geoinformationssystemen

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
“doctor rerum naturalium“  
(Dr. rer. nat.)  
in der Wissenschaftsdisziplin  
„Geoinformatik, Fernerkundung und Kartographie“

eingereicht an der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Potsdam

von  
Antje Schmallowsky

Potsdam, den 06.08.2009

Online veröffentlicht auf dem

Publikationsserver der Universität Potsdam:

URL <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2010/4126/>

URN [urn:nbn:de:kobv:517-opus-41262](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus-41262)

<http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus-41262>

## Danksagung

Für die Unterstützung bei meiner Arbeit möchte ich mich bei folgenden Personen bedanken:

Meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. H. Asche (Universität Potsdam) und den Gutachterinnen Frau Prof. Dr. J. Siemer (Universität Regina, Canada) und Frau Prof. Dr. A. Rauner (Hochschule Karlsruhe) für ihre freundlichen Anregungen und ihre konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit.

Herrn Dipl.-Ing. W. Schlothauer und Herrn Dipl.-Ing. T. Wauer (Schlothauer & Wauer Ingenieurgesellschaft für Straßenverkehr) für die freundliche Bereitstellung von Verkehrsdaten und für ihre förderlichen Ratschläge im Bereich Verkehrstechnik.

Herrn U. Heise (Landesbetrieb Bau Sachsen-Anhalt, Straßenverkehrstechnik) und Herrn W. Bäuml (Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg, Verkehrstechnik) und Herrn Dipl.-Ing. G. Kanne (Bundesamt für Strahlenschutz) für die fachliche Bewertung des konzipierten Modells.

Außerdem einen herzlichen Dank an Frau A. Nägele (Marketing- und Kommunikationsökonom) und Dipl.-Ing. E. Thomas für das kritische Korrekturlesen der Arbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die mir stets helfend zur Seite stand.



## Zusammenfassung

Die visuelle Kommunikation ist eine effiziente Methode, um dynamische Phänomene zu beschreiben. Informationsobjekte präzise wahrzunehmen, einen schnellen Zugriff auf strukturierte und relevante Informationen zu ermöglichen, erfordert konsistente und nach dem formalen Minimalprinzip konzipierte Analyse- und Darstellungsmethoden. Dynamische Raumphänomene in Geoinformationssystemen können durch den Mangel an konzeptionellen Optimierungsanpassungen aufgrund ihrer statischen Systemstruktur nur bedingt die Informationen von Raum und Zeit modellieren.

Die Forschung in dieser Arbeit ist daher auf drei interdisziplinäre Ansätze fokussiert. Der erste Ansatz stellt eine echtzeitnahe Datenerfassung dar, die in Geodatenbanken zeitorientiert verwaltet wird. Der zweite Ansatz betrachtet Analyse- und Simulationsmethoden, die das dynamische Verhalten analysieren und prognostizieren. Der dritte Ansatz konzipiert Visualisierungsmethoden, die insbesondere dynamische Prozesse abbilden. Die Symbolisierung der Prozesse passt sich bedarfsweise in Abhängigkeit des Prozessverlaufes und der Interaktion zwischen Datenbanken und Simulationsmodellen den verschiedenen Entwicklungsphasen an. Dynamische Aspekte können so mit Hilfe bewährter Funktionen aus der GI-Science zeitnah mit modularen Werkzeugen entwickelt und visualisiert werden. Die Analyse-, Verschneidungs- und Datenverwaltungsfunktionen sollen hierbei als Nutzungs- und Auswertungspotential alternativ zu Methoden statischer Karten dienen. Bedeutend für die zeitliche Komponente ist das Verknüpfen neuer Technologien, z. B. die Simulation und Animation, basierend auf einer strukturierten Zeitdatenbank in Verbindung mit statistischen Verfahren.

Methodisch werden Modellansätze und Visualisierungstechniken entwickelt, die auf den Bereich Verkehr transferiert werden. Verkehrsdynamische Phänomene, die nicht zusammenhängend und umfassend darstellbar sind, werden modular in einer serviceorientierten Architektur separiert, um sie in verschiedenen Ebenen räumlich und zeitlich visuell zu präsentieren. Entwicklungen der Vergangenheit und Prognosen der Zukunft werden über verschiedene Berechnungsmethoden modelliert und visuell analysiert. Die Verknüpfung einer Mikrosimulation (Abbildung einzelner Fahrzeuge) mit einer netzgesteuerten Makrosimulation (Abbildung eines gesamten Straßennetzes) ermöglicht eine maßstabsunabhängige Simulation und Visualisierung des Mobilitätsverhaltens ohne zeitaufwendige Bewertungsmodellberechnungen. Zukünftig wird die visuelle Analyse raum-zeitlicher Veränderungen für planerische Entscheidungen ein effizientes Mittel sein, um Informationen übergreifend verfügbar, klar strukturiert und zweckorientiert zur Verfügung zu stellen. Der Mehrwert durch visuelle Geoanalysen, die modular in einem System integriert sind, ist das flexible Auswerten von Messdaten nach zeitlichen und räumlichen Merkmalen.



## Summary

Visual communication is an efficient method to describe dynamic phenomena. Perceiving information objects precisely and facilitating quick access to structured and relevant information requires consistent analysis and presentation methods conceived according to the formal minimisation principle. Because of the lack of conceptual optimisation adaptations due to their static system structure, dynamic space phenomena in geoinformation systems can only model the information of time and space conditionally.

This is why research in this paper focuses on three interdisciplinary approaches. The first approach represents data collection close to real-time which is administered in geodatabases in a time-oriented manner. The second approach looks at analysis and simulation methods that analyse and forecast dynamic behaviour. The third approach conceives visualisation methods that model dynamic processes in particular. Where required, the symbolising of processes adapts to the various development phases depending on the process flow and the interaction between databases and simulation models. This allows dynamic aspects to be developed and visualised in a timely manner using modular tools with the help of proven geoscience functions. The analysis, intersection and data administration functions are intended to serve as utilisation and analysis potential as an alternative to static chart methods. For the time component, linking new technologies such as simulation and animation is significant based on a structured time database in connection with statistical methods.

Modelling approaches and visualisation techniques are methodically developed and transferred to the traffic field. Dynamic traffic phenomena that cannot be modelled cohesively and comprehensively are separated into a service-oriented modular architecture in order to present them visually on different levels of space and time. Past developments and forecasts are modelled and visually analysed using various calculation methods. Linking a micro-simulation (modelling individual vehicles) to a network-controlled macro-simulation (modelling an entire road network) makes it possible to simulate and visualise mobility behaviour regardless of scale without time-consuming analysis model calculations. In the future, the visual analysis of space-time changes for planning decisions will be an efficient tool in order to make comprehensive, clearly structured and appropriate information available. The flexible analysis of measurement data according to time and space criteria represents the added value of visual geoanalysis integrated into a system with a modular structure.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Thematik und Kontext	1
1.2 Motivation und Zielsetzung	2
1.3 Methodik	4
<b>2 Visualisierungskonzepte raum-zeitlicher Daten in Geoinformationssystemen</b>	<b>5</b>
2.1 Datentypen, Datenstrukturen, Geometrien eines GIS	6
2.1.1 Vektordaten	6
2.1.2 Rasterdaten	7
2.1.3 Hybriddaten	7
2.1.4 Zeitdaten	8
2.2 Datenbanktechnologien in Geoinformationssystemen	9
2.2.1 Klassische Datenbanksysteme	9
2.2.2 Objektrelationale Datenbanksysteme	10
2.2.3 Deduktive Datenbanksysteme	11
2.2.4 Zeitbezogene Datenbanksysteme	11
2.3 Datenbankeigenschaften, Standards und Einsatzfelder	13
2.3.1 UML-Modell für Geoinformationssysteme	14
2.3.2 Semistrukturierte Datenmodelle	15
2.3.3 Multidimensionale Datenmodelle Data Warehouse	17
<b>3 Dynamische Visualisierungskonzepte durch Kopplung von Simulations- und Geoinformationssystemen</b>	<b>19</b>
3.1 Integration und Kopplung von kontinuierlichen Simulationsmodellen	21
3.2 Integration und Kopplung diskreter Modellierungsmodelle	23
3.3 Integration und Kopplung von parallelen Modellen in verteilter Umgebung	25
3.3.1 Integration und Kopplung individuenorientierter Simulationsmodelle	26
3.3.2 Integration und Kopplung agentenorientierter Simulationsmodelle	27
3.4 Echtzeit-Kopplung in GIS über web-basierte GIS-Technologie	29
3.4.1 GIS-integriertes Echtzeitüberwachungssystem	30
3.5 Zusammenfassung	31

<b>4</b>	<b>Visualisierungsprozess dynamischer Raumphänomene in Geoinformationssystemen am Beispiel Verkehrsbeeinflussung</b>	<b>32</b>
4.1	Modellierung dynamischer Strukturen in einer prozessorientierten Architektur	32
4.1.1	Szenario des Prozesses „Verkehrsbeeinflussung“	34
4.1.2	Systemanforderungen	35
4.1.3	Systemmodellierung/Architekturstil SOA/SCA	36
4.1.4	Konzeption der Module (Composite, Component)	39
4.1.5	Integration der Module ins System	42
4.2	Visualisierungsansätze zur Modellierung dynamischer Raumphänomene	43
4.2.1	Methoden diskreter Werte	44
4.2.2	Methoden kontinuierlicher Werte	50
4.3	Zusammenfassung	52
<b>5</b>	<b>Schritte eines verkehrstechnischen Visualisierungsprozesses</b>	<b>53</b>
5.1	Filtern der Informationen (Reduktion, Fehlerkorrektur, Extraktion)	55
5.2	Erzeugung eines Geometriemodells, Wahl der Visualisierungstechniken zur Visualisierung dynamischer Phänomene	57
5.2.1	Symbolisierung in der makroskopischen Ebene	58
5.2.2	Symbolisierung in der mikroskopischen Ebene	62
5.2.3	Syntaktische und semantische Attributierung	63
5.2.4	Graphisches Gefüge in seiner punktuellen, linien- und flächenhaften Struktur	64
5.2.5	Prüfung der geeigneten Methoden	67
5.3	Wahrnehmung und Interaktion der Präsentation	68
5.3.1	Evaluationskriterien	68
5.3.2	Aufbau der Expertenbefragung	69
5.3.3	Ergebnisse der Expertenbefragung	70
5.3.4	Modifizierung des Visualisierungsmodells	72
5.4	Zusammenfassung	72
<b>6</b>	<b>Schlussbemerkungen</b>	<b>73</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>75</b>
	<b>Anhang</b>	<b>81</b>
	Fragebogen zur Expertenbefragung	81
	Expertenbefragung 01	83
	Expertenbefragung 02	85
	Expertenbefragung 03	87

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kenngrößen zur Charakterisierung und Attributierung der Verkehrssituation.....	58
Tabelle 2: Grundformen plangleicher Knoten modifiziert nach Schnabel/Lohse.....	59
Tabelle 3: Aufbau der Expertenbefragung.....	69

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Design Space for Temporal Models, Quelle: Goralwalla.....	8
Abb. 2: Time in GIS, Quelle: Langran.....	29
Abb. 3: CA-Spezifikation, Quelle: Logica.....	36
Abb. 4: SDO-Datenmodell, Quelle: InfoWeek.....	37
Abb. 5: Struktur der Domain Verkehrsbeeinflussung.....	37
Abb. 6: Modellelement SCA Component Diagramm, Quelle: OSOA.....	38
Abb. 7: Datenmodell Verkehrsdatenerhebung Videoaufnahme.....	39
Abb. 8: Struktur Composite Mobile Datenerfassung.....	39
Abb. 9: Flächenhafte Diskreta, Verkehrsflächen.....	45
Abb. 10: Flächenhafte Diskreta, Kartodiagramme Isochronen.....	46
Abb. 11: Schematisches Netzmodell und Belegungsvarianten nach Lohse.....	48
Abb. 12: Punktuelle Gestaltungsbeispiele eines Einzelobjektes.....	49
Abb. 13: Verkehrsarten eines Untersuchungsraumes, erweitert nach Lohse.....	51
Abb. 14: Punktvariationen.....	52
Abb. 15: Temporal Data Structures, Quelle: May Yuan.....	55
Abb. 16: Visualisierungsprozess.....	56
Abb. 17: Signaturen in Kombination mit Straßenklassifikationen.....	60
Abb. 18: Signaturen in Kombination mit steuerungstechnischen Funktionen.....	60
Abb. 19: Signaturen für einen koordinierten Straßenzug.....	60
Abb. 20: Auswahl an Grundformen planfreier Knoten, modifiziert nach Schnabel/Lohse.....	61
Abb. 21: Beispiel Visualisierungsmodell.....	61
Abb. 22: Varianten Knotenpunktsgeometrie.....	62
Abb. 23: Weg-Zeit-Diagramm auf den Raum abgebildet.....	62
Abb. 24: Gestaltung, Aufbau und Nutzerführung.....	63
Abb. 25: Kombination LSA-Klassifikationen mit dynamischer Verkehrsbelastung.....	64
Abb. 26: Kombination LSA-Klassifikationen, Verkehrsbelastungen, Markierung.....	64
Abb. 27: Kombination Strombelastungsplan, Markierung, LSA-Ausrüstung, Verkehrszeichen... 65	65
Abb. 28: Filtern der Informationen, Darstellung zweier Ströme, Phasenabläufe, Rückstau.....	65
Abb. 29: Zeitlücken- und Geschwindigkeitsdarstellung des PV und ÖV Allgemein.....	66
Abb. 30: Betriebszeiten, Stromverbrauch von Lichtsignalanlagen und Unfallhäufigkeiten.....	66
Abb. 31: Gestaltung, Aufbau und Nutzerführung.....	67
Abb. 32: Visualisierungsmodell.....	70



---

# 1 Einleitung

## 1.1 Thematik und Kontext

Geoinformationen spielen eine immer bedeutendere Rolle in den Konzeptionen regionaler und globaler Infrastrukturen, wo gegenwärtig ein hoher Forschungsbedarf in der semiotisch orientierten Kommunikationstheorie (wissenschaftliche Visualisierung) und in der Geosience besteht, insbesondere in der Verknüpfung temporaler Abläufe von dynamischen Mobilitäts- und Migrationsprozessen. Grundlegend sind für Verkehrsanalysen und -prognosen die Zuordnung des Raumes und des Zeitgeschehens. Die Abgrenzung des Planungsraumes und das Festlegen räumlicher Bezugseinheiten, abhängig vom Zweck, bilden die Basis für die Zuordnung des Quell- und Zielverkehrs. Neben den Eigenschaften der Raum- und Verkehrsnetzstruktur beeinflussen Verkehrsbeziehungen die Verkehrsentstehung, Erreichbarkeit und Erschließungsqualitäten bestimmen die Veränderungen räumlicher Systeme. Die Verkehrsgestaltung in einer mobilen Gesellschaft beruht auf Modellbildungen, Simulationen und visuellen Analysen. Das Visualisieren von räumlichen Analysen, Verkehrsdaten und echtzeitnahen Daten erfordert ein strukturiertes und methodisches Vorgehen, um eine Überflutung von Information zu vermeiden. Die Problematik, kontinuierliche Raumdaten unter Wahrung der Lesbarkeit zu visualisieren, ist in der Geosience noch überwiegend ungelöst.

Die kartographische Visualisierung ist eine Abstraktion der Wirklichkeit [Or94], beruhend auf kognitive Wahrnehmungen. Das Erkennen von räumlichen Mustern, Relationen und Prozessen bildet die Grundlage räumlichen Denkens [Ba76]. Kartographische Darstellungen dienen hierbei als Kommunikationsmittel von räumlichen Informationen in einem graphischen Modell. Solche kognitiven Modelle sind thematisch und geographisch durch ihre 2- bis 3-Dimensionalität isoliert, statisch und selektiv (Auswahl nach Zeichenschlüssel). Erst die Vernetzung zu einem visuellen Analyse-System, welches Geosience-Technologien, Simulation, Animation und kartographische Kommunikationsmodelle vereint, überwindet diese Einschränkungen und ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung und Auswertung.

Großes Entwicklungsinteresse besteht in der noch weitgehend unerforschten vierten Kartendimension, verknüpft mit der Wahrnehmungspsychologie und der Kommunikationswissenschaft [Pe94]. Speziell die Methodik und die applikationsspezifische Darstellung hinsichtlich der zeitlichen Komponente, d. h., wie wirksam können kartographische Darstellungen die Raumdimensionen Zeit und Bewegung wiedergeben, gehören zu den ungelösten Fragen der Kartographie [Wi70]. Bislang werden nur indirekt durch Kartenfolgen (Zeitpunktkarten) oder Kartensynthese (Bilanzkarten) Prozesse präsentiert bzw. durch Bewegungsabläufe einzelner Objekte animiert dargestellt. Räumliche Daten werden auch in den üblichen Geoinformationssystemen mit relationalen Datenbanken statisch aufgenommen und nur durch Analyse und Verschneidung ergänzt.

Ansätze für objektorientierte Methodenbanken erweitern die vorhandenen Lösungsmöglichkeiten. Bereits 1945 modellierte V. Busch die menschliche Vorgehensweise durch eine ‚assoziative Auswahl‘, die in den 80er Jahren mit Hilfe der Computertechnik durch das ‚Hypertext-Konzept‘ von Nelson, einer Verwaltungsstruktur verschiedener Medien, erweitert wurde [St00].

Mit der Entwicklung der Computeranimation können die bis dahin aufwendigen kinematographischen Techniken für kartographische Präsentationen raumzeitlicher Daten durch multiple Zeitreihen der Bildsequenzen abgelöst werden [ME91].

## 1.2 Motivation und Zielsetzung

Die kartographische Modellierung von Geoobjekten unterliegt topologischen und thematischen Gestaltungsprinzipien, die in syntaktischen, semantischen und pragmatischen Beziehungen stehen [Mor88]. Die bisherigen Erkenntnisse basieren auf statischen Methoden. Die verschiedenen Entwicklungen der Visualisierungstechniken, der Aufbau der Semiologie kartographischer Darstellungen gründen sich in den Printmedien, die überwiegend unbeweglich, d. h. statisch sind. Die Transformation der Gestaltungsmethoden auf den Bildschirm, auf eine empfundene Beweglichkeit, bewirken neue Sicht- und Herangehensweisen. Ob diese isoliert oder umfassend sind, um dynamische Informationen zielgerichtet zu transformieren, bedarf es einer neuen Strukturierung des gesamten kartographischen Bildes. Zudem scheint die heutige Informationsfülle fast unbegrenzt. Erweiterte Wahrnehmungsdimensionen, zeitliche Komponenten erfordern mittlerweile intelligente Systeme, Systeme mit vernetzten Datenbankanbindungen und minimal formalistische Darstellungsmethoden. Die Herausforderung, dieses zu kombinieren, verlangt konzeptionelles Denken.

Um die Dynamik von Phänomenen zu visualisieren, die Bewegung im Raum zu veranschaulichen, sind wie bisher nicht nur die Inhalte zu berücksichtigen, sondern Daten in ihrer Abhängigkeit zur Zeit und zum Raum zu betrachten. Das setzt ein Datenverständnis voraus. Wo kommen Daten her? Wie sollen diese genutzt werden? Wie werden sie aufbereitet (Datenqualität), wie verwaltet?

Die Komplexität dynamischer Phänomene setzt ein übergreifendes Konzept voraus, das sowohl die Datenerfassung, -verwaltung, -modellierung als auch -visualisierung berücksichtigt. Dies ist mit existierenden Geoinformationssystemen, bedingt durch ihren statischen Aufbau, nur sehr aufwändig umsetzbar. Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept basiert auf einem flexiblen Baukastensystem mit sich ändernden Modulen, das sich durch seine Systemflexibilität leichter an dynamische Prozesse anpassen lässt.

Diese Betrachtungsweise ermöglicht den Zeitbezug und den Raumbezug in ihrer Abhängigkeit zu strukturieren, zu archivieren, zusammenhängend und selektiv zu analysieren und visuell darzustellen. Die zu visualisierenden Objekte können sich der Dynamik durch integrierte Intelligenz maßstabsübergreifend im Unterschied zu parametrisierten Symbolen anpassen. Maßstabsabhängige Darstellungsformen filtern nicht relevante Informationen (Details) entsprechend der Fragestellung. So können statische, dynamische und kinematische Visualisierungselemente die Bewegung simulieren.

Die interaktive Verknüpfung von erfassten Daten (Messdaten), startenden Prozessen und sich aus den Ergebnissen neu entwickelnden Modulen und Objekten soll in ihrer Struktur heraus lösbar und anpassungsfähig sein, um Flexibilität und damit eine dynamische Prozessentwicklung zu ermöglichen.

Auf dieser These beruhend, können verschiedene Thematiken auf unterschiedlichen Zeit- und Raumebenen analysiert werden. Modelle sollen ohne immensen Berechnungsaufwand vereinfacht simulieren und durch visuelle Analysetechniken den Mobilitätsprozess fallweise auswerten können.

Kognitive Aspekte vereinfachen die Thematiken, da visuelle Darstellungen wirkungsvoller vom Menschen verarbeitet werden. Um dies zu erreichen, sind konzeptionell klar strukturierte Darstellungsformen notwendig. Denn eine überlastete Grafik erschwert eine Symbolstrukturanalyse. Das mentale Modell soll zielgerichtet, anschaulich und realitätsnah die Informationen integrieren.

---

Nicht zusammenhängende Phänomene visuell zugänglich zu machen, mehrdimensionale Daten mit zeitlichen Verläufen zu verknüpfen, ist Zielgedanke des Konzeptes. Die zu entwickelnden Lösungsansätze im Hinblick auf die kartographische Methodenlehre orientieren sich an Standards und werden sprachenunabhängig nach dem Prinzip des Baukastensystems konzipiert. Daten, Aktivitäten und Prozesse werden für Interaktionen frei zur Verfügung gestellt und visuell modelliert. Mit der Service Component Architecture wird der Ansatz verfolgt, flexible und optimiert dynamische Prozesse abzubilden mit nicht heterogenen Daten, d. h., Daten aus verschiedenen Systemen können miteinander verknüpft werden.

Um Prozessabläufe zusammenhängend darzustellen, werden einzelne fachliche Funktionen herausgelöst und für verschiedenste Prozesse und Aktivitäten zentral zur Verfügung gestellt. Die Entwicklung der Komponenten wird strukturiert modelliert und kann beliebig mit weiteren unabhängigen Komponenten zusammengefasst werden. Parallel betrachtet wird der Aufbau visueller Methoden, der in Abhängigkeit von Raum und Zeit dynamische Prozesse codiert und symbolisiert. Symbole können unabhängig voneinander angepasst und flexibel verwendet werden. Integrierte Darstellungsprinzipien regulieren den Aufbau der Symbolstrukturen, die themenspezifisch klar gegliedert sind.

Das graphische Datenmodell passt sich den dynamischen Prozessen an, visualisiert raum-zeitliche Problematiken und bietet neue interaktive analytische Möglichkeiten. Grafikfreie Basisdaten werden zur Beschreibung dynamischer Prozesse in bestimmten Zeitintervallen in kartographische Modelle umgeformt, die statische, dynamische und animierte Präsentationsformen beinhalten.

Mit diesem Konzept werden folgende Ziele gesetzt:

- Funktionalität von GIS durch Integration graphikorientierter Visualisierung und datenbankorientierte Analyse auf der Grundlage statistischer Methoden zu untersuchen;
- Implizieren von veränderlichen externen Ressourcen, wie Datenbanken zur Verwaltung dynamischer Raumdaten;
- Modellierung und Simulation als analytische Technik für dynamische raumbezogene Prozesse zu prüfen;
- Methodische Lösungsansätze für themenspezifische Darstellungen dynamischer Phänomene entsprechend den kartographischen Grundsätzen graphisch qualitativ zu entwickeln;
- Erforschung des Darstellungsmittels Präsentationszeit als zusätzliche Dimension (4D) zum Raum (3D), wie zum Beispiel für Szenarien wie die temporale (in einem definiertem Zeitintervall) und nontemporale (in einem bestimmten Zeitraum mit variierenden Daten und Ausdrucksformen) Veränderung des Georaumes.

Die Analyse existierender Techniken, die Eignung verschiedener Strukturmodelle, ob diskret oder kontinuierlich, sind maßgeblich für die Entwicklung neuer Ansätze zur Darstellung von dynamischen Ergebnisdaten aus Analyse-, Auswertungs- und Simulationsprozessen. Die zu entwickelnden Visualisierungsmethoden können unabhängig vom Anwendungsgebiet in andere Bereiche transferiert werden. Der konzeptionelle Aufbau ist aufgrund seiner modularen Struktur auf verschiedene Mobilitäts- und Migrationsdynamiken anwendbar. Die grundlegenden Systemelemente sowie die Methodik zur Entwicklung eines graphischen Datenmodells werden an einem verkehrsthematischen Modellierungsansatz konzipiert.

### 1.3 Methodik

In der methodischen Vorgehensweise werden grundlegend das Raum- und Zeitverständnis analysiert, verschiedene Modellansätze untersucht, die sich besonders für dynamische Geoinformationen eignen, und darüber hinaus wird der Ansatz erforscht, wie sich die Visualisierung von Geoinformationen für die Vermittlung von Fachinformationen darbietet.

Nach einer einführenden Übersicht über die generelle Struktur der Datentypen und Geometrie eines Geoinformationssystems, die unter dem Aspekt Raum und Zeit betrachtet werden, erfolgt die Analyse der Datenverwaltung. Wie können räumliche und zeitliche Daten in Abhängigkeit archiviert werden? Wie werden sich stetig ändernde Daten verwaltet? Welche Datenbanktechnologie eignet sich für Mobilitätsdaten? Daran anschließend werden die Fragen nach dynamischen Datenbankeigenschaften untersucht. Welche Datenmodelle können dynamische Objekte raumbezogen organisieren.

Darauf aufbauend wird untersucht, wie bisher räumliche Analyseergebnisse aus dynamischen Prozessläufen in Geoinformationssystemen eingebettet werden. Welche Modelle integrieren Raum (3-D) und Zeit (4-D) und können Rückschlüsse (Interpretationsmöglichkeiten) anhand visueller Darstellungen auf das reale System ziehen? Bestehende Visualisierungskonzepte und deren Verknüpfungen werden daher neben technologischen Aspekten nach den zeitlichen und räumlichen Gesichtspunkten betrachtet.

Das Datenmanagement, die Modellierung einzelner Systemelemente, das Verknüpfen verschiedener Funktionen und das Entwickeln eines graphischen Datenmodells wird in der Konzeption zur Visualisierung dynamischer Raumphänomene vorgestellt. Es wird ein serviceorientiertes Modell entwickelt, das Simulations- und GI-Science-Methoden integriert und visuell präsentiert. Am Beispiel verkehrlicher Problematiken werden telematische Lösungsansätze als Grundlage für raumanalytische Planungsstrategien entwickelt. Beginnend mit den Systemanforderungen über den Architekturstil bis hin zur Konzeption der einzelnen Grundbausteine werden dynamische Prozesse in einer prozessorientierten Architektur modelliert. Der Ansatz, die Zeit zu diskretisieren, um sie zu veranschaulichen, spiegelt sich in den Visualisierungsmethoden wider. Sie werden in Methoden diskreter und kontinuierlicher Werte untergliedert.

Die Art der Klassifizierung bildet die Grundlage für den verkehrstechnischen Visualisierungsprozess, der sich untergliedert in:

- Datenauswahl (qualitativ)
- Datencodierung und -symbolisierung
- Datenaggregation nach kartographischen Darstellungsprinzipien

Die Visualisierungsmethoden untergliedern sich sowohl zeitlich und thematisch in diskrete und kontinuierliche Methoden als auch geometrisch und thematisch in Punkt, Linie und Fläche. Diese Systematik begünstigt das technologische und visuelle Verständnis eines dynamischen Prozesses, da sie Spezifikationen der Ergebnisdaten eines Simulationslaufes in einem zeitlichen Kontext zulässt.

Die Wahrnehmung und Interaktion der visuellen Präsentation eines Prozesses wird durch den strukturellen Aufbau bestimmt und richtet sich nach der Wirksamkeit einzelner Elemente. Das zeitlich codierte Merkmal Bewegung, die Dynamik, hat einen kontinuierlichen Charakter, kann aber für Aufmerksamkeitssteuerung und Objekterkennung diskretisiert dargestellt werden. Wie der selektive Charakter in Bezug auf themenspezifische Elemente wie die Lokalisierung und den Zeitpunkt angewendet wird, welche charakteristische Formen und Muster kognitive Selektionsprozesse bedienen, wird im verkehrstechnischen Visualisierungsprozess aufgezeigt.

## 2 Visualisierungskonzepte raum-zeitlicher Daten in Geoinformationssystemen

Die Visualisierung von Daten, die sich auf einen Raum beziehen (Georaum, politischer, sozialer oder physikalischer Raum etc.), hängt neben der Wahl des mathematisch-geometrischen Bezugssystems von der Nutzung der Daten, der Thematik und der verwendeten Semiotik ab. Relevante Informationen in einem System zur Verfügung zu stellen, das durch Hinzufügen oder Entfernen von Details sowie durch Analysieren und Modellieren die Interpretation räumlicher Strukturen und Zusammenhänge disponiert, wird durch ein Informationssystem<sup>1</sup> realisiert.

Geoinformationssysteme<sup>2</sup> zeichnen sich durch komplexe Strukturen mit komplexer Semantik aus. Ihre umfassenden Funktionen sind monolithisch, teils modular aufgebaut, die über Schnittstellen mit Geodatenbanken verbunden sind. Klassische Datenbanken verwalten Geodaten statisch. Daten werden zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgenommen, verwaltet und in unterschiedlichen Zyklen aktualisiert.

Bewegungsvorgänge, die sich in ihrer zeitlichen Entwicklung verändern, sind dynamisch. Aristoteles schrieb: „Wir messen also nicht nur die Bewegung durch die Zeit, sondern auch die Zeit durch die Bewegung, weil sie einander begrenzen und bestimmen. So bestimmt also die Zeit die Bewegung selbst als Zahl und genauso die Bewegung die Zeit.“ Die qualitative Beschreibung der Bewegung<sup>3</sup> bedeutet ein zeitliches Zerlegen in Intervalle, in der sich die Objekte bewegen bzw. sich ihre Positionen im Raum ändern.

Unter Prozess versteht man ein Aufeinanderfolgen von Zuständen eines Systems, dessen wesentliche Elemente so aufeinander bezogen sind und in einer Weise in Wechselwirkung stehen, dass sie als aufgaben-, sinn- oder zweckgebundene Einheit angesehen werden können [Ru06]. Ein Prozess kann in seiner Eigenschaft dynamisch sein.

Dynamische Prozesse in ein Abbild zu transformieren, um die Kognition des Prozessvorganges zu steuern sowie Relationen zwischen den Daten herzustellen, erfordert nicht nur die räumliche Komponente, sondern vor allem die zeitliche Komponente. Die zeitliche Komponente beschreibt neben der räumlichen Ausdehnung die Verweildauer eines oder mehrerer Objekte. Die Bewegungsabläufe, in denen ein oder mehrere Objekte beteiligt sind, stehen in Beziehung zueinander. Diese wird durch die Topologie der Objekte beschrieben. Neben der Problematik der Veranschaulichung der Zeit liegt das Problem in der Datenverwaltung bisheriger Geoinformationssysteme, die statisch und nicht dynamisch aufgebaut sind. Einen Lösungsansatz stellen Visualisierungstechniken dar, die modellhaft dynamische Szenarien realistisch simulieren. Ein weiterer Ansatz ist ein temporales oder ein bitemporales Datenmodell (BCDM). Dieses Modell behält die Einfachheit des relationalen Modells bei und nimmt zudem temporale Dynamiken auf, wie zeitlich differenzierte Daten. Weitere Alternative dazu sind vernetzte Geodaten mit objektorientierten Datenmodellen, die klassifizierte dynamische Datenzugriffe gewähren.

<sup>1</sup> „Bei Informationssystemen(IS) handelt es sich um soziotechnische (Mensch-Maschine) Systeme, die menschliche und maschinelle Komponenten (Teilsysteme) umfassen und zum Ziel der optimalen Bereitstellung von Information und Kommunikation nach wirtschaftlichen Kriterien eingesetzt werden“ [Krc04]

<sup>2</sup> „Geoinformation ist raumbezogene Information. Ein Geoinformationssystem ist ein logisches Gesamtkonzept, dass die Speicherung, Bereitstellung und Analyse raumbezogener Information unterstützt.“ [Bar05]

<sup>3</sup> „Bewegung = Orts-, Lageveränderung. KANT sagt 8, 458, Bewegung eines Dinges ist die Veränderung der äußeren Verhältnisse desselben zu einem gegebenen Raume. [DW03]

## 2.1 Datentypen, Datenstrukturen, Geometrien eines GIS

Geoinformationssysteme sind monolithische, teils modular aufgebaute Softwarepakete, die über Datenbankschnittstellen operieren. Auf der Basis integrierter oder externer Geodatenbanken, die alle Daten über spezifische Methoden verwalten und zum Abruf bereithalten, agieren Softwaremodule, die Zugriffs-, Manipulations-, Analyse- und Visualisierungstechnologien implementieren. Die Besonderheit einer Geodatenbank ist die Zuordnung eines Raumbezugs-systems, direkt durch Koordinaten oder indirekt durch z. B. Adressen.

Die Architektur eines Geoinformationssystems ist für raumanalytische Operationen optimiert. GIS-Operationen beinhalten das Erfassen und Modifizieren von Geodaten in spezifizierten Strukturen, Datenbäumen oder Netzen. Sie beschreiben die räumliche Lage, Nachbarschaftsbeziehungen und topologische Verwandtschaften. Sie dienen der Analyse, Kombination, Verschneidung und Überlagerung von Geodaten und können Visualisierungsmethoden generieren.

Die Modellierung und Verwaltung der Geodaten hängt von der Attributierung und Kategorisierung ab. GIS-Softwaremodule greifen nicht direkt auf Daten zu, sondern kommunizieren über Verwaltungssysteme, die Datenbankmanagementsysteme (DBMS). Sie dienen der Modifizierung von Daten, dem Datenschutz (Zugriffberechtigungen) und der Vermeidung von Datenredundanzen [CW76].

Welchen Typus Geodaten besitzen, hängt von der Datenstruktur des gewählten Datenmodells ab. Gebräuchlich werden vier logische Konzepte unterschieden, die durch spezielle Datenstrukturen, Operatoren und Integritätsbedingungen das Zugreifen und Ändern der Daten managen [Ke04]. Geodaten und deren Beziehungen sind gemäß ihrem Datenmodell in der konzeptionellen<sup>4</sup> Ebene hierarchisch, netzwerkartig, relational oder objektorientiert strukturiert und dadurch uneinheitlich typisiert.

In einem relationalen Geodatenbankmodell sind Punkt, Linie und Flächen sog. Geometriedaten, neben den Attributdaten. In einem objektorientierten Geodatenmodell werden Datentypen nach Klassen (Bäume, Straßen) kategorisiert, deren Eigenschaften sowohl geometrisch, wie Punkt, Linie, Fläche, als auch semantisch oder graphisch sind. Die Geometrie der Geodaten wird in Form von Rastern oder Vektoren dargestellt. Die Kombination beider Datenformen ist eine hybride Präsentationsform.

### 2.1.1 Vektordaten

Vektordaten bestehen aus den georeferenzierten Elementen Punkt, Linie und Fläche. Die Linien zwischen den Punkten (als Menge von Punkten) sind gerichtete Graphen, Vektoren (Geraden oder Kurven), die ein Polygon bilden, das, wenn es geschlossen ist, zu einer Fläche generiert wird. Komplexe Raumgeometrien werden über Netzstrukturen in Form von Knoten und Kanten sowie deren topologischen Beziehungen definiert.

Das Vektormodell ist ein lineares Modell, dessen Datenhaltung relativ simpel strukturiert ist und geo-relational verknüpft werden kann [Ba05], das heißt eine Kombination von layerorientierten GIS und relationalen DBMS [Ot01]. Geometrische und semantische Eigenschaften sowie die topologischen Beziehungen räumlicher Daten unterschiedlichen Typs werden über einen Key in verschiedenen Tabellen verwaltet und modelliert [La05].

<sup>4</sup> In der konzeptionellen Ebene wird die Gesamtstruktur der Daten festgelegt, welche Datensätze es gibt und welchen Typs sie sind (numerisch, Zeichenkette).

---

Die Modellierung räumlicher Objekte in einem Vektormodell ermöglicht während der Erfassung eine Strukturierung der Daten. Die punktuelle Datenerfassung gestattet eine unbegrenzte Formvariation der Grundelemente. Objekte können hinsichtlich ihrer geometrischen Darstellung als eine Menge von Punkten interpretiert werden, die durch ihre Nachbarschaftsbeziehungen den Zusammenhalt der Figur gewährleistet [Bi07]. Der damit verbundene Formenreichtum, der über Kombinations- und Verschneidungsoperatoren und die Zuordnung von graphischen Eigenschaften vervielfacht wird, bildet ein komplexes kartographisches Gefüge [Im72].

### 2.1.2 Rasterdaten

Rasterdaten werden durch Bildelemente in einer Rastermatrix (Raumbezug) dargestellt. Das geometrische Grundelement ist das Pixel (2-dimensional) oder Voxel (3-dimensional), welches zeilen- und spaltenweise in einer Matrix gleichförmig quadratisch angeordnet ist und einheitliche Flächenfüllung aufweist [Bi05].

Die Rasterstruktur gliedert sich in Entitätstypen (Punkt-Entität – ein Rasterpunkt, Linie – eine Folge von Rasterpunkten und Fläche – eine Menge von Rasterpunkten) und wird durch ein identifizierendes Attribut (eindeutiger Wert) unterschieden [Ch76].

Die Relationen und Typen werden in einem Datenmodell über Tabellen bzw. Datensätze verwaltet. So kann jedes Bildelement Informationen wie Eigenschaften (Grauwert) speichern, die numerisch gelesen und mit Hilfe von Klassifizierungsalgorithmen interpretiert werden. Zum Beispiel Pixel mit gleichen oder ähnlichen spektralen Informationen können zu Objektklassen (Wasser, Straße) über Klassennummern zusammengefügt werden, wobei die Klassennummer (ganze Zahl) nur indirekt ein Attribut (Beschreibung der Eigenschaften der Entitäten/Geoobjekten) wiedergibt.

Da die Bildelemente untereinander nicht logisch verknüpft sind [Bi07], kann nur über eine Abbildung des Attributwertes auf den Attributbereich (reelle Zahl) geschlossen werden. So werden in einem geo-relationalen Modell Zeiger (Zellwert oder Klassennummern als Zugriffsschlüssel) simuliert, die auf semantische Informationen verweisen können. Er kann eine externe Datei referenzieren. Nicht jede Rasterzelle muss dabei definiert sein, es genügt der Verweis auf einen Zentroid als interner Schlüssel [Ba05]. Solch eine Identifizierung, Klassifizierung und Charakterisierung der Objekte ermöglicht in einem Rastermodell GIS-Analysen, die z. B. Überschneidungszonen gleicher Werte zu einer neuen Fläche berechnen.

### 2.1.3 Hybriddaten

Hybrid die Daten aus zwei verschiedenen Modellen in einem System zu nutzen, kann sowohl die Überlagerung der Rasterdaten mit den Vektordaten bedeuten, als auch die Integration durch eine Vektor-Raster-Konversion oder durch eine hybride Datenverwaltung der bisher getrennt verwalteten Datenmodelle. Das gleichzeitige Hinterlegen der Rasterdaten unter Vektordaten kann simultan und partiell erfolgen. Sie können deckungsgleich oder transparent übereinander eingeblendet werden [Ba05].

Für gemeinsame Datenaggregation und -analyse können Vektordaten in Rasterdaten konvertiert werden, um mit einem Datenformat eine Datensynthese zu erzeugen. Die Nutzung der raster- und vektororientierten Funktionalitäten erlaubt im Bereich der Simulationsberechnung anhand integrierter oder extern verknüpfter Modelle Prognosen, Analysen und Visualisierungen von dynamischen Phänomenen in GIS.

### 2.1.4 Zeitdaten

Zeitdaten sind Messdaten, die die Messung der Expansion im Raum gestatten. Sie sind Teil eines Zeitsystems (z. B. Sexagesimalsystem – Basis ist die Zahl 60, Grad in 60 Bogenminuten) und beschreiben im kausalen Zusammenhang räumliche Phänomene (Zustandsänderungen). Die Zeit ist eine nach der Relativitätstheorie vom Bewegungszustand eines zeitmessenden Beobachters abhängige Größe ( $t$ ). Die Lage oder der Ort zu einer bestimmten Zeit  $t$  wird durch den zeitabhängigen Ortsvektor  $\check{r}(t) = \{x(t), y(t), z(t)\}$  oder entsprechende Lagekoordinaten beschrieben. Gemessen wird die Zeit zwischen zwei Ereignissen am gleichen Ort, indem man parallel zu den Ereignissen einen Prozess als zeitnormal beobachtet, der periodisch oder gleichmäßig verläuft [Kn94].

Die Gleichzeitigkeit wird durch die Festlegung eines Zeitintervalls zwischen Beginn und Ende präzisiert. Goralwalla strukturiert die Zeit in Zeitpunkte (anchored) und Zeitspannen (unanchored – kein genauer Anfangs- und Endzeitpunkt), die unterteilt werden in bestimmte Zeitpunkte (Instants) und Zeitintervalle (mit Start- und Endzeitpunkt), unterscheidbar durch diskrete (abzählbar – Menge natürlicher Zahlen) oder kontinuierliche (Menge reeller Zahlen) Werte, die determiniert (Zeitpunkt und Zeitdauer genau bekannt) oder indeterminiert (ungefähr, vermutend aufgrund unbestimmter Faktoren) sein können [Go98].

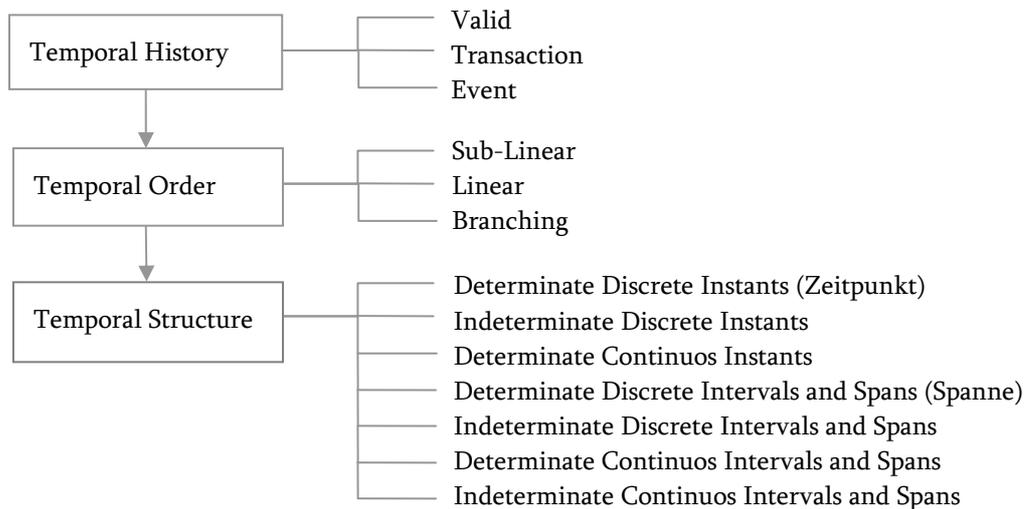


Abb. 1: Design Space for Temporal Models, Quelle: Goralwalla

Nach Einstein wird die Relativität der Gleichzeitigkeit als Folge der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der untrennbaren Verknüpfung von Raum und Zeit zum vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum beschrieben.

Die Betrachtungsweise der vierten Dimension sowie ihre aufgezeigten Ausprägungen erfordern nun die Umsetzung in eine geeignete Visualisierung. Die damit verbundenen Anforderungen an temporale Modelle insbesondere die Implementierung dynamischer Funktionen in temporale Datenbanken und Datenmodellen, werden nachstehend untersucht.

---

## 2.2 Datenbanktechnologien in Geoinformationssystemen

Geodatenbestände in Geodatenbanken sind Teil eines Geoinformationssystems. Die Anforderungen, Informationen zu verwalten, aus dem System zu extrahieren, sie zu integrieren und auszuwerten, werden konzeptionell über logische Beschreibungen, die Datenmodelle, erfüllt. Anfänglich von der reinen Datenverwaltung einzelner Dateisysteme entwickelten sich Modelle (logische Schemata) vom hierarchischen Datenmodell über das Netzwerkmodell, Relationale, Objektorientierte und Objektrelationale Datenmodell bis hin zum Semistrukturierten Datenbankschema. Ihre Datenbankarchitektur unterscheidet sich zum einen in ihrer konzeptionellen Ebene und zum anderen in ihrer internen Ebene, der physischen Architektur.

### 2.2.1 Klassische Datenbanksysteme

Hierarchische Datenbanksysteme speichern ihre Einträge in einer Baumstruktur in Form von Knoten, die fest miteinander verbunden sind. Die Funktionen des Systems sind Navigieren in der Hierarchie, Daten einlesen und ausgeben. Sie ermöglichen einen schnellen Zugriff, setzen jedoch eine einheitliche Beziehung vom Typ 1:n voraus, die unter Umständen Mehrfacheinträge nach sich zieht und Strukturänderungen nicht vorsieht.

Netzwerkbanksysteme bauen auf dem hierarchischen Modell auf. Die Daten werden nicht mehr streng hierarchisch strukturiert, sondern netzwerkartig mit logischen Verknüpfungen zu lateral (seitlich) liegenden Dateisystemen verwaltet. Komplexere Zugriffsmöglichkeiten auf den Datenbestand können erfolgen, was jedoch die Übersichtlichkeit mindert. Das Navigieren benötigt aufwendigere Algorithmen, optimiert durch das Batchprocessing. Sie sind satzorientiert, d. h., Datensätze werden nacheinander bearbeitet und können nicht vom Benutzer manipuliert werden.

Relationale Datenbanksysteme sind durch ihre Tabellenstruktur datenunabhängig. Ein einzelner Datensatz wird in einer einzigen Zeile (Tupel) einer Tabelle gespeichert, dessen Eigenschaften (Attribute) unbegrenzt in Spalten über einen oder mehrere Schlüssel zugeordnet werden können. Eine Vielzahl von Funktionen legen flexibel die Relationen zwischen den Daten fest. Operationen, wie Projektion, Selektion, Umbenennung, Vereinigung und Differenzierung, sind mittels SQL-Abfragen durch relationale Algebra möglich. Anfragen können auf verschiedene Tabellen zugreifen und deren Ergebnisse in neuen Tabellen generieren [Ke99]. Sie sind mengenorientiert, da die Informationen verstreut über mehrere Relationen verwaltet werden. Eine Relation wird durch einen Namen, ein Format (z. B. C-character: Zeichenattribut mit einer Breite von n Zeichen, T-time: Datum und Uhrzeit, G-objekt: auch BLOB-binary large object, das binär abspeichert, wie Klänge, Bilder, Videosequenzen) und einer benötigten Speichergröße deklariert.

Objektorientierte Datenbanksysteme übertragen Deklarationseigenschaften aus der objektorientierten Programmiersprache in die Datenbank. Identität, Klassifikation, Vererbung und Polymorphismus umschreiben die Eigenschaften der Objektorientierung zur Abbildung diskreter Objekte. Daten und Methoden (Verhaltensweisen) werden nicht voneinander getrennt gespeichert. Sie enthalten nicht nur eine Datenstruktur, sondern haben auch Kenntnis über ihr Verhalten. Es sind Objekte, die über eindeutige und unveränderliche Objektidentifikatoren deklariert werden und somit unverwechselbar mit den dazugehörigen Eigenschaften sind, die wiederum Objekte sein können. Komplexe Objekte können ineinander geschachtelt werden, um Strukturen abzubilden.

Das Schema besteht aus Klassen, deren Attribute jeweils von einem bestimmten Typ sind. Die Klassen können in einer Vererbungshierarchie angeordnet sein und sich gegenseitig referenzieren. Datenbestände werden so effektiv verwaltet. Struktur und Verhalten mehrdimensionaler Objekte werden streng typisiert, die nicht wie in relationalen Datenbanken vordefiniert sind, sondern je nach Thematik neu deklariert werden können. Die Modellbildung wirklichkeitsnaher Objekte sowie die Wiederverwendung und Erweiterbarkeit des modularen Systems ermöglicht die Zerlegung eines komplexen Systems in kleinere Einzelsysteme.

Neben den vier o. g. klassischen Systemen existieren heute eine Vielzahl von Varianten und Nebenformen, die auf den Ursprungsformen der klassischen Systeme basieren. So werden unter Postrelationalen Datenbanken diejenigen zusammengefasst, deren Ursprung auf die relationalen Datenbanktechnologien zurückzuführen sind, wie zum Beispiel Objektrelationale Datenbanken oder OLAP<sup>5</sup>-Datenbanken.

## 2.2.2 Objektrelationale Datenbanksysteme

Objektrelationale Datenbanksysteme (ORDBS, z. B. Oracle 11g) sind erweiterte relationale Datenbanksysteme mit einem deklarativen Datenzugriff und Sichtkonzept, die objektorientierte Ansätze implementieren, um Daten (Texte, Bilder, Geoinformationen, XML-Dokumente), die nicht in der Datenbank entstanden sind und gepflegt werden, in Datenbanksysteme einzubinden. Die Sprache (SQL<sup>6</sup>, GQL<sup>7</sup>) erweitert sich um objektorientierte Methoden (objektorientierter Zugriff) und Datentypen.

Die Begriffe Klassen und Objekte sind jedoch relational gehaltene Daten, die in relationalen Tabellen abgelegt werden. Für jede Klassen existiert eine Tabelle, in der alle Elemente eines Typs gespeichert sind, deren Eigenschaften relational in Spalten verwaltet werden.

M:n-Beziehungen werden durch Identikatoren von zwei in Beziehung zueinander stehenden Objekten realisiert, die mengenorientiert und pfadorientiert (Tabellenhierarchie) in erweiterten Tabellen mit Typenbindung (komplexe, nicht atomare Attributtypen) gespeichert werden [Lu99]. Zur Anwendung komplexer Datenstrukturen in GI-Systemen werden durch dieses Modell Koordinaten miteinander verknüpft und mit anderen Daten georeferenziert (Koordinaten-Objekte einer Straße können einen Straßennamen referenzieren) und um benutzerdefinierte Datentypen (u. a. Multimedia-Datentypen) und Operationen erweitert. Zukünftig wird die objektrelationale Datenbanksprache SQL 99 eine temporale Erweiterung anbieten, die Speicherstrukturen für Indexe auf räumlich-zeitlichen Daten einbindet [Tü99].

<sup>5</sup> OLAP: *Online-Analytical-Processing, auf Hypothesen gestützte Analysemethoden, OLAP-Datenbanken speichern multidimensionale Daten auf einem Real-Time Server ab, auf dem beliebig viele Arbeitsplätze online verknüpft sind.*

<sup>6</sup> SQL: *Structured Query Language, SQL ist die Standardabfragesprache zur Benutzung von RDBMS.*

<sup>7</sup> GQL: *Geographic Query Language, GQL ist die kompatible Erweiterung der Standard-Abfragesprache SQL mit räumlichen Funktionen und Operatoren.*

### 2.2.3 Deduktive Datenbanksysteme

Deduktive Datenbanken sind ebenfalls relationale Datenbanken, die um die Deduktionskomponente aus der Logikprogrammierung, eine regelbasierte Sprache (Datalog) zur Wissenspräsentation, erweitert ist. Anfragesprache als auch Deduktivregeln (Ableitungsregeln erlauben die Ableitung neuer Theoreme aus den Axiomen und bereits bewiesene Theoreme) extrahieren Daten zu Wissen [Tü99]. Die Erweiterung der Datenbanksprache SQL3 und SQL99 ermöglicht die Spezifikation von rekursiven (zurückgreifenden/selbstbezüglichen) Sichten und Integritätsbedingungen [Ma02] in einem objektorientierten Kontext, den deduktiven und objektorientierten Datenbanksystemen.

Der deklarative Ansatz (deklarative Spezifikationen von Datenbankänderungen) in deduktiven Datenbanken, in denen Regelformalismen zur Definition von Änderungen verwendet werden, findet in der Knowledge Discovery (Data Mining) und in den Constraint<sup>8</sup>-Datenbanken ein breites Anwenderforum [Br96]. Intelligente Überwachungssysteme werden zur Optimierung von Verkehrsnetzen, in der Luftraumüberwachung oder von Transportunternehmen genutzt.

Die Programmiersprache verwendet auch zeitliche Logiken (Temporal Datalog), die auf zwei zeitlichen Operatoren (zuerst und zunächst) basieren. Abgeleitete Daten, die temporär hergeleitet, impliziert eingefügt und modifiziert werden, können als virtuelle Sichten fungieren, die nur bei Bedarf berechnet und bei Konsistenz materialisiert, d. h. in die Datenbank integriert werden. Die Kombination zwischen aktiven (spezielle Formen reaktiver Systeme, die mit anwenderunabhängigen Methoden Situationen erkennen und anwenderspezifische Reaktionsmuster auslösen) und deduktiven (Spezifikation, Verwaltung und Anwendung von Sichten und Integritätsbedingungen abgeleiteter Daten) Datenbanken mit Zeitlogiken (relational oder objektorientiert) ist für räumliche Entscheidungsprozesse in Geoinformationssystemen ein Lösungsansatz.

### 2.2.4 Zeitbezogene Datenbanksysteme

Zeitliche Aspekte in Datenbanken werden durch zeitliche Attribute zu den Objekten realisiert. Die semantische Bedeutung der Zeitattribute sind Zustandsbeschreibungen des Objektes zu einem bestimmten Zeitpunkt. Datenbanken unterstützen diskrete Zustände von Objekten. Das Kontinuum der Zeit ist ein gleich bleibender (zustandshaltender) Wert zwischen zwei Änderungen. Eine Änderungsoperation führt zur Erzeugung einer neuen zeitbehafteten Version. [Pe88] Eine Anfrage über den Objektzustand eines Objektes  $o$  zum Zeitpunkt  $t$  hängt auch von der Definition des Zeitbegriffes in einer Datenbank ab. Nach Snodgrass [Sn87] werden folgende zeitorientierte Datenbanken klassifiziert.

- Snapshot database – zeichnet den aktuellen Zustand (schreibgeschützte, statische Ansicht der Datenbank) der Daten in einer Datenbank auf, ohne zeitorientierte Queries.
- Roll-back database – verwaltet Aufzeichnungszeit und damit Änderungszeit (protokolliert alle danach stattfindenden Datenänderungen), die Abfrageversionen eines bestimmten Zeitpunktes zulässt (alte und neue Zustände der Datenbank) sowie die Zurückführung des Datenzustandes zu dem Zeitpunkt. Datenbank verfügt über Rollbackvorgänge.
- Historical database – verwaltet die Gültigkeitszeit, d. h. den Zeitraum, in dem ein Datenelement gültig ist. Sie können tabellarisch archiviert werden und/oder hierarchisch verschachtelt aufgelistet sein. Ein wichtiger Aspekt für bibliographische Datenbanken.

<sup>7</sup> Constraints: erlauben verschiedene Datentypen zu verarbeiten, können raum-zeitliches Verhalten, partielle und unvollständige Informationen erfassen.

- Temporal database – es wird die Aufzeichnungszeit (Transaction Time) *ta* und die Gültigkeitszeit (Valid Time) *tg* festgehalten, die in Anfragen zueinander in Beziehung gesetzt werden können. Es sind sowohl rückwirkende als auch zukünftige Änderungen in einer Datenbank möglich. Durch die Kombination beider Zeitangaben in bitemporalen Datenbanken, unterstützt durch die temporale Datenbanksprache z. B. TQuel, sind Anfragen beider Zeitdimensionen möglich. Welchen Zustand hat das Objekt *o* zum Zeitpunkt *tg*, bezogen auf die Information, die zum Zeitpunkt *ta* in der Datenbank vorlagen [Wi89].

Die Abbildung temporaler Daten in Datenbanksystemen kann wie o. g. systemseitig durch die Unterstützung zeitbezogener Datenhaltung oder durch eine Attributierung (abzubildende Eigenschaften) der Daten in vorhandenen Datenbanken erfolgen.

Zeitbezogene Informationen (nutzerdefinierte Zeit) werden in den beschreibenden Attributen gespeichert und enthalten nicht zwingend die existente Aufzeichnungs- oder Gültigkeitszeit eines Objektes. Zum Beispiel werden ergänzende XML<sup>8</sup>- Standards zur Modellierung halbstrukturierter Daten in Form von Baumstrukturen vom W3C (World Wide Web Consortium) definiert. Temporal GML<sup>9</sup> oder T-XPath<sup>10</sup> dienen der Beschreibung zeitlicher Aspekte in Datenbanksystemen, mit denen spezielle zeit-räumliche Anfragen formuliert werden können. Neben der *Repräsentation* werden weitere Anwendungen in der temporalen Datenhaltung genutzt, die die Beziehungen zwischen den abgespeicherten Datenversionen abbilden. Die *Revision* stellt verschiedene Änderungszustände eines Objektes dar. *Alternativen* sind unterschiedliche Ansätze zur Entwicklung eines Objektes, und *Varianten* werden unter einer bestimmten Abstraktion mit spezifischen Parametern klassifiziert [De03].

Die Zuordnung der Dateneigenschaften erfolgt nach ihrer Konsistenz (Consistency, Integrity – Widerspruchsfreiheit innerhalb der Datenbank nach vordefinierten Bedingungen – Constraints), Atomarität (kleinste Einheit, Änderungen ganz oder gar nicht ausgeführt), Isolation (parallel laufende Änderungen sind nicht sichtbar), Dauerhaftigkeit (Persistency-Änderung dauerhaft in der Datenbank abgespeichert), Modifikation und Effizienz sowie der Suche nach bestimmten Daten (Retrieval, Select) [He08].

Die Definition bestimmter Operationen für die Manipulation der Strukturen, z. B. Zustandsübergangsfolgen, können Lebenszyklen von Geoobjekten beschreiben. Es wird der Zeitpunkt innerhalb einer Transaktion ermittelt und setzt diesen Zeitstempel bei sämtlichen Objekten, die innerhalb der Transaktionen manipuliert wurden. Ein Zeitpunkt (Instant) ist ein verankerter Punkt auf einer Zeitachse (s. 2.1.4 Zeitdaten). Die Zeitdauer ist ein unverankertes Zeitintervall oder auch Periode. Zeitstempelung ist die Ergänzung eines Zeitbezugs (Zeitpunkt oder Zeitintervall) zu einem Datenattribut (Zeitstempel auf Attributen) in einer auch temporalen/nicht temporalen Datenbank oder einer Datenzeile, die als Gültigkeitszeit (Zeitstempel beschreibt den Zeitraum, in dem die Objekte gültig sind) oder/und Transaktionszeit (Zeitstempel des Aktionszeitraumes) in einer temporalen Datenbank abgespeichert werden kann [De03].

<sup>8</sup>XML Extensible Markup Language (erweiterbare Auszeichnungssprache – Standard zur Modellierung halbstrukturierter Daten in Form von Baumstruktur, vom WWW Consortium definiert.

<sup>9</sup>GML: Geography Markup Language (Datenaustauschformat für Geodaten, eine Anwendung von XML).

<sup>10</sup>T-XPath: zeitliches Modell für XML-Datenbanken mit der Anfragesprache XPath.

Der Zeitbezug bezieht sich auf ein diskretes Zeitmodell. Kontinuierlich übersandte Datensätze in einem sog. Datenstrom hingegen nähern sich dem Kontinuum der Zeit schon eher. Messdatenströme z. B. aus der Systemüberwachung und -steuerung, die Sensoren, Messstationen oder Rechnernetzwerke liefern, werden über Anfragealgorithmen in Datenbanken ausgewertet und analysiert.

## 2.3 Datenbankeigenschaften, Standards und Einsatzfelder

Datenströme werden von großen Datenbanken verwaltet, die sich durch eine immerwährende Verfügbarkeit und eine schnelle Performance auszeichnen. Um dies zu gewährleisten, werden Datenbestände oftmals verteilt verwaltet, d. h., es wird auf ein Mehrrechnerdatenbanksystem zurückgegriffen, das einen verteilten Datenbestand administriert (z. B. Nutzung verteilter Geodatenbanken, sog. Geodienste und Geo Web Service). Heterogene Systeme können verschiedenartige Datenbanken für ein einziges Anfragen-Interface handeln, das gerade bei Geodatenbanken unterschiedlicher Herkunft von Nutzen ist. Parallel verwaltete Datenbestände, die sich mehrerer Prozessoren bedienen, sind ebenso für GIS-Anwendungen relevant, wie z. B. SensorGIS<sup>11</sup>, das autarke Messstationen integrieren kann. Multimediale Anwendungen, umfangreiche Operationen komplex strukturierter Geo-Objekte stehen immer in Verbindung mit großen Datenmengen. Aktuell wird untersucht, wie Geodaten auf unterschiedlichen Speicherorten und verteilten Datenbanken partitioniert oder parallelisiert werden können. Denn der Bedarf, einen weltweiten einheitlichen Zugriff auf Geodaten zu gewährleisten, steigt stetig. Um die Performanz zu optimieren, werden besondere Datenstrukturen (R\*-Baum, X-Baum<sup>12</sup>, TV-Baum<sup>13</sup>, Cell-Baum<sup>14</sup>, GIST<sup>15</sup>) angewendet [Mü04]. R'-Baum-Strukturen sind dynamische Indexstrukturen, die mehrdimensionale Daten, insbesondere 2- und 3-dimensionale Geodaten, speichern und effektiv suchen können. Informix von IBM benutzt R'-Baum-Strukturen in Spatial-Datablade-Modulen oder ESRI in ArcGIS und PostgreSQL (Open-Source-Datenbanksystem) in GIST. Die Datenstruktur besteht aus Datenseiten (Blattknoten), die Punktdaten speichern und aus Directoryseiten, die die Knoten strukturieren. Dazu werden Algorithmen benutzt, die das Suchen, Einfügen, Löschen und Updaten in hochdimensionalen Räumen beschleunigen. Anfrage-Optimierungen mit effizienten Algorithmen werden auf ihre methodische Richtigkeit und Eindeutigkeit in einem Datenmodell überprüft, ehe sie formuliert und implementiert werden. Die Formulierung erfolgt z. B. durch algorithmische Sprachen (C++, Java). Natürlich-sprachliche Datenmodelle werden derzeit nur ansatzweise realisiert, weil ein komplettes Sprachverständnis noch nicht implementiert ist.

Datenbanksprachen in relationalen Datenbanken sind deklarativ (nicht-algorithmisch), beschreibend (relationale Algebra), wie SQL als standardisierte Abfragesprache (DML – Data Manipulation Language) oder XML (Document Type Definition) als standardisierte Auszeichnungssprache oder Austauschformat. Die Implementierung möglicher Strukturen und Funktionen komplexer Anwendungen in eine Abfragesprache erfolgt auf der Grundlage eines Datenbankmodells, das Datenobjekte und ihre Eigenschaften sowie die Beziehung zwischen den Objekten festgelegt.

<sup>11</sup> SensorGIS: terrestris GmbH & Co. KG, Bonn.

<sup>12</sup> X-Baum: <sup>2</sup> TV-Baum: Telescopevektor, ähnliche Strukturen wie R-Baum, speziell für Vektoren entwickelt.

<sup>13</sup> TV-Baum: ähnlich wie R-Baum speziell für Vektoren entwickelt.

<sup>14</sup> Cell-Baum: benutzt statt Rechtecken Polygone.

<sup>15</sup> GIST: Generalized Search Tree.

Bei der Modellierung werden Objekte und Beziehungen typisiert, um vereinfacht mittels Graphen oder graphischen Symbolen Abläufe oder Prozesse darzulegen. Das Entity-Relationship-Modell (ER-Modell), UML-Modell oder Relationenmodell (RM) sind standardisierte Datenmodelle, die Objekte und Beziehungen typisieren, d. h., gleichartige Objekte oder gleichartige semantische Beziehungen werden durch einen Typus dargestellt.

Die Datenmodellierung durchläuft dabei zwei Phasen. In der ersten Phase wird ein semantischer Entwurf des konzeptuellen Schemas erstellt und danach mit einer Datendefinitionssprache die Datenbankstruktur abgebildet. Design-Tools bieten beim Entwurf einer Datenbankstruktur verschiedene Funktionen an, z. B. das Generieren einer SQL-Datei aus einem designten R-Modell zur Speicherung in einer Datenbank.

Datenbankanwendungen in Geoinformationssystemen basieren überwiegend auf objektrelationalen Datenbanken (s. 2.2.2). Häufig wird über eine relationale Datenbank eine objektorientierte Zugriffsschicht (Persistent Framework) gesetzt, die ebenso modelliert wird, wie z. B. mit OMT (Object Modeling Technique) oder UML. Die Modellierung raum-zeitlicher Datenmodelle integriert Datenabfragesprachen mit unterschiedlichen Spracherweiterungen, z. B. temporalen, geometrischen und multimedialen Erweiterungen.

### 2.3.1 UML-Modell für Geoinformationssysteme

Das semantische Verhalten dynamischer Raumphänomene kann heute über die standardisierte objektorientierte Modelliersprache UML (Unified Modeling Language) formuliert werden. Formale Ansätze, die die abstrakte Syntax mit natürlich-sprachlichen Erläuterungen modelliert, können mit mehreren Diagrammtechniken abgebildet werden.

Die Darstellung von Struktur und Dynamik ist wesentlich aufwändiger als rein strukturierte E/R-[Ho04] oder EER-Modelle (Extended ER). Allerdings für Fragestellungen dynamischer Raumphänomene in Geoinformationssystemen ist das Darstellen der Semantik zweckmäßiger. Neben den Begriffsdefinitionen von Objekten und deren möglichen Beziehungen werden graphische Notationen (formalisierte Logikschreibweise, vereinbarte Symbole von Objekten und Bewegungsabläufen) definiert, die statische Strukturen und dynamische Abläufe konzipieren.

Das Sprachwerkzeug Meta Objekt Facility (MOF) spezifiziert Modellelemente, z. B. ein Ereignis oder Ereignisauftritt, wie das Zeitereignis (TimeEvent: Ereignisauftritt zu einem bestimmten absoluten oder relativen Zeitpunkt) oder das Signalereignis (SignalEvent: Anzeige eines empfangenen Signals am empfangenden Objekt) und speichert diese im austauschbaren Format Meta Interchange (XMI) ab. Eine Menge von eng zusammenhängenden Modellierungselementen wird in einer Spracheinheit zusammengefasst. Die 8 verschiedenen Teilsprachen in dem 4-Ebenen-Hierarchie-Modell können neben den strukturellen Aspekten gezielt die Dynamik, das bedeutet den Kontrollfluss, die Interaktion und den Ablauf von Operationen, beschreiben[OM08].

Die Spracheinheiten sind schichtweise aufgebaut. Die unterste Schicht bilden die grundlegenden Modellierungselemente. Das Grundelement Ereignis (event) beschreibt den Zeitpunkt und die Informationsübertragung und das Grundelement Zustand (state) die Abstraktion der Attributwerte und Beziehungen eines Geobjekts zu einem Zeitpunkt zwischen zwei Events sowie die Veränderung in einem neuen Zustand. Sie bilden die Grundlage für das Zustandsübergangsdiagramm [Sp04].

Die Spracheinheit *Aktivitäten* enthält das Modellelement *FundamentalActivities*, ein strukturelles Grundgerüst hierarchisch geschachtelter Gruppen von Aktionen. In der aufbauenden Schicht erweitert *BasicActivities* die Modellelemente um Kanten und Hilfsknoten zu einem Graphen. Die Modellmengen (u. a. auch *message* – Nachricht und *call* – Aufrufmethode) werden visuell im Szenario<sup>16</sup>- und Interaktionsdiagramm<sup>17</sup> aufgezeigt, um Ablaufsequenzen von Objektinteraktionen darzustellen [Bo06].

Die Spracheinheit *Klassen* bildet den Kern der Modellierungssprache. Die Metaklasse *Element* ist das Grundelement für alle anderen Modellelemente, das typisiert, dessen Ausprägung spezifiziert, in einem Namenraum deklariert, assoziiert (Beziehung), integriert (Integrationsbedingungen) und generalisiert (Abstraktionskonzepte) werden kann. Zur Umsetzung des Modells (der UML-Diagramme) werden Funktionen aus der Zusatzoption Oracle Spatial der Dantebank Oracle11g<sup>18</sup> verwendet.

In Oracle Spatial werden zur Speicherung raumbezogener Daten GI-spezifische Klassen definiert, z. B. der geometrische Datentyp *SDO\_GEOMETRY*. Rasterdaten können georeferenziert und mit einem Zeitbezug gespeichert werden. Auch können definierten Geoobjekten weitere Multimediadaten (Virtual-Reality-Szenen) über die Multimediaklasse zugeordnet werden [Sk07]. Der Austausch von Modellen und Diagrammen erfolgt über die standardisierte Auszeichnungssprache XML, das Austauschformat XMI<sup>19</sup>, das auch eine vollständige graphische Diagrammübertragung und eine ER-Modelltransformation ermöglicht, um ein Klassenmodell auf ein ER-Modell für z. B. objektrelationale Datenbanken abbilden zu können (z. B. für SQL-Erweiterungen VTSQL2).

### 2.3.2 Semistrukturierte Datenmodelle

Ein semistrukturiertes Datenmodell ist eine Vereinfachung eines Objektmodells, jedoch ohne Klassen- und Vererbungsmethoden. Es wird eine Modellinstanziierung (ähnlich wie die Vererbung) im Objekt Exchange Model (OEM) oder YAT<sup>20</sup> angeboten, um Typen verschiedener Datenmodelle anzupassen. Die Auszeichnungssprache XML wurde für das dezentral arbeitende Internet entworfen, das den Zugriff auf heterogene semistrukturierte Daten erlaubt. Die Anfrageauswertung und -optimierung unterliegt keinem einheitlichen strukturierten Datenschema, da z. B. das relationale Datenbankmodell nur unzureichend die Struktur in flachen Tupeln abbildet und das objektorientierte Datenschema zwar tiefe Strukturen, aber keine unregelmäßigen Strukturen mit fehlenden oder wiederholten Komponenten repräsentieren kann. Die Anfragesprachen (XQuery,) verfügen über Sprachkonstrukte, die unbekannte Strukturen lesen und in beliebigen Tiefen suchen und abbilden kann.

<sup>16</sup> Szenario: Eine Folge von Events mit speziellem Systemablauf als Nachrichten/Methodenaufrufe.

<sup>17</sup> Interaktionsdiagramme stellen Szenario ggf. über viele Objekte dar.

<sup>18</sup> Oracle Spatial 11g Datenbankmanagementplattform unterstützt alle Typen räumlicher Daten und Modelle (Vektor-, Rasterdaten, topologische und Netzwerkmodelle), mit dem integrierten Oracle Locator werden Funktionen zur Verwaltung von Geodaten angeboten.

<sup>19</sup> XMI Metadata Interchange – Standard als Austauschformat zwischen Softwareentwicklungswerkzeugen.

<sup>20</sup> YAT<sup>20</sup> Yet another tree-based system (am Institut National de Recherche en Informatique et Automatique in Frankreich als Werkzeug zur Spezifikation und Implementierung von Datenkonvertern für heterogene Datenquellen entwickelt).

Es können komplexe Objekte (Datensätze) mit alternativen Strukturen spezifiziert werden. Schema- und Objektdaten werden in Anfragen nicht, wie sonst üblich, z. B. in SQL getrennt gehandhabt, sondern unterschiedlich behandelt. Um Anfragen über Daten unterschiedlicher Strukturen auszuwerten, werden Daten mittels interaktiven Methoden in ein Schema extrahiert (website wrapping – Schemaextraktion). Ein auf Deduktion mit Datalog (s. 2.2.3) beruhender Extraktionsansatz erlaubt die Zuordnung mehrerer Klassen für ein und dasselbe Objekt und nähert sich für nicht erkannte Schemata durch Approximationsschemata [Ne98]. Die meisten Anfragesprachen verwenden für die Erstellung dynamischer Websites Variablen und Ausdrücke, die die Inhalte teilen, um Sichten zu erzeugen. Die Daten werden als XML-Fragmente hierarchisch verwaltet und über proprietäre Spracherweiterungen manipuliert. GML<sup>21</sup>, eine XML-Spezifikation, dient der Beschreibung räumlicher Strukturen.

Die Grundlage bilden Geo-Objekte mit ihren geometrischen Eigenschaften (GML3.2 bietet linienhafte Geometrien mit verschiedenen Interpolationsverfahren wie linear, klothoid, spline und kreisförmig sowie flächen- und volumenhafte Geometrien an), die komplex in Features über räumliche und zeitliche Referenzsysteme, Topologien, Maßeinheiten, Metadaten, Coverages (Verzeichnisse) verfügen.

Leistungsfähige raum-zeitliche XML-Schemata werden durch objektorientierte temporale Frameworks realisiert, z. B. das für die Datenbank OODB<sup>22</sup> Jasmin von Computer Associates und OR DB Clodescape von Informix in Java entwickelte Zeit-Framework. Seine in sich selbst konsistente objektorientierte Struktur beschreibt temporale Daten und bildet sie in einem XML-Schema ab, das mit einem GML-Schema kombiniert werden kann [Zi01].

Eine weitere XML-Anwendung ist das Austauschformat KML<sup>23</sup> für die Client-Komponente des Programms Google Earth, die neben Punkten, Linien, Polygonen auch Bilder (Satellitenbilder) definiert und z. B. Betrachtungswinkel oder Entfernungsparameter spezifiziert.

Datenbanken, die bewegte Objekte und ihre Position speichern, formulieren die Position als Funktion der Zeit. Der Wert des Positionsattributes ändert sich mit dem Verlauf der Zeit. Die Position eines Motion Vectors wird z. B. attribuiert durch die geometrische Lage, Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit, die die Berechnung der Position eines Objektes zu einem beliebigen Zeitpunkt ermöglicht. Ändert sich ein Bewegungsattribut, wird dieses in dem entsprechenden Feld aktualisiert. Der Wert, welchen das dynamische Attribut auf die Anfrage einer Query liefert, hängt vom Motion Vector und vom Zeitpunkt ab, zu welchem Zeitpunkt die Anfrage gestartet wird. Dynamische Attribute ändern ihren Wert im Zeitverlauf, ohne dass sie ein explizites Update erfahren. Ein Beispiel dafür ist das Objects Spatio-temporal Model (MOST), das Sub-Attribute definiert, um Funktionen für die Berechnung der aktuellen Position ändern zu können (von z. B. der beschleunigten in die gleichmäßige Bewegung). Bisherige Datenbanken speichern Datensätze konstant ab, bis sie ein explizites Update erfahren, das bei Moving-Objekten einen nicht realisierbaren Aktualisierungsaufwand und Rechenleistung bedeuten würde [Wo03].

<sup>21</sup> *GML Geography Markup Language (Datenformat zum Austausch raumbezogener Objekte, Features), ISO Standard 19136:2007.*

<sup>22</sup> *OOBD – Object oriented Database – Objektorientierte Datenbanken.*

<sup>23</sup> *KLM – Keyhole Markup Language – XML-Dialekt, KML-Dateien können über die Benutzeroberfläche von Google Earth erstellt werden.*

Extra modellierte Abfragesprachen für räumliche und zeitliche Querys sind z. B. in FTL<sup>23</sup>, eine DBMS-unabhängige Abfragesprache, die natürlichsprachig formulierte Anfragen von Anwendern zulässt. Sie kann auch in Datenbanken mit integrierten Abfragesprachen eingesetzt werden. Über temporale Operatoren (Until, Nexttime, Eventually) sind Zustands- und Zukunftsabfragen möglich, und über spatiale Operatoren (Inside, Nearby) können Positionsabfragen erfolgen, z. B. über definierte Räume zu bestimmten Zeiteinheiten [Da06].

Luca Forlizzis Datenmodell ‚Moving Objects Databases‘ beschränkt sich nicht nur auf die Bewegung von punktförmigen Objekten, wie es im MOST-Datenmodell der Fall ist, sondern ermöglicht auch die Modellierung der Bewegung von Punkten, Linien und auch Regionen mit ihren Formveränderungen und Ausdehnungen. Die Modellierung gliedert sich in zwei Ebenen. In der ersten Ebene wird ein abstraktes Modell entworfen, das in der zweiten Ebene in ein diskretes Modell implementiert wird. Das abstrakte Modell beruht auf einer einfachen Algebra, welches Grunddatentypen und Typkonstruktoren für komplexe Typen wie den Moving Operator (length, distance) abbildet.

Das diskrete Modell legt die interne Darstellung fest, die sich dem abstrakten Modell durch mehrere Abschnitte (unittyp) annähert. Sowohl aktuelle als auch zurückliegende und folgende Bewegungsbeschreibungen können mit Unittypes definiert werden [Fo01].

Die Datenbankzustände werden in einer Datenbankhistorie verwaltet, die über momentane, kontinuierliche und persistente Anfragen (Auskunft von verschiedenen Zuständen, jedoch nur mit zusätzlicher Attributierung möglich) verfügt. Bei einer persistenten Datenhaltung raumdynamischer Objekte fallen hohe Datenmengen an, die für Analysezwecke mit geringen Antwortzeiten schwer zu verwalten sind. Alternativ bieten sich multidimensionale Systeme an, die Daten aus operativen Einzelsystemen integrieren und für Analyseanfragen aufbereiten können. In einer verteilten Data-Warehouse-Umgebung können fachorientiert und auf der Grundlage historischer Datenbestände (nicht flüchtige Datenbasis) raumdynamische Objekte effizienter verwaltet werden.

### 2.3.3 Multidimensionale Datenmodelle Data Warehouse

Data Warehouses sind multidimensionale Datenmodelle, die Daten unterschiedlicher Quellen in eine homogene, vergleichbare Datenbasis generieren, um eine globale Sicht auf heterogene und verteilte Datenbestände zu ermöglichen [CD06]. Die Integrationsmöglichkeit heterogener Datenmodelle kann über eine gemeinsame Oberfläche, die Frontend-Integration, oder über eine gemeinsame Schnittstelle, die Backend-Integration, erfolgen. Data Warehouse ist eine Backend-Integration, die in ihren operativen Anwendungen für Analysezwecke nicht nur transaktional, sondern auch vergleichend und auswertend ist [Ba04].

Der Modellierungsansatz wird durch das multidimensionale Datenmodell repräsentiert, das für die konzeptionelle Modellierung spezielle Struktur- und Analysekomponenten (OLAP<sup>24</sup>, DataMining<sup>25</sup> zur Verfügung stellt. Ein Data-Warehouse-System modifiziert die Daten nicht, sondern ergänzt den Datenbestand. Dieser Aspekt ist für zeit- und raumwirksame Veränderungen von Bedeutung, da Chronologien zurückverfolgt und analysiert werden können.

<sup>23</sup> FTL FutureTemporal Logice (eingeführte Abfragesprache im DominoSystem).

<sup>24</sup> OLAP Online Analytical Processing.

<sup>25</sup> Data Mining Suche nach unbekanntem Mustern oder Beziehungen im Datenbestand.

Durch Data-Warehouse-Prozesse (Data Warehousing) können statisch abgelegte Daten dynamisch, d. h. der Datenfluss aus verschiedenen Quellen kann dynamisch extrahiert, bereinigt und durch übergreifende Auswertungen so genannter Data Marts<sup>26</sup> analysiert werden. Dabei kooperieren mehrere Anwendungen in einem komplexen System. Kernelement ist das Datenbanksystem, das flexible große Datenmengen sortiert und partitioniert. Die in Tabellen liegenden Datensätze werden physisch aufgeteilt und getrennt gespeichert, um performanter die Abfragen automatisch exakt auf die Partition zu lenken. Zudem werden für umfangreiche Analysezwecke große zusammenhängende Datenmengen durch Parallelisierungstechniken beschleunigt. Das Datenbanksystem kann komplexe Anfragen durch Parallelisieren der Teilprozesse (Data Marts) splitten und durch Sortierung und Partitionierung die Performance und Ressourcen-Auslastung erhöhen. Das Umwandeln operativer Quelldaten aus operativen verschiedenen Datenbanken in warehouse-geeignete Strukturen geschieht entweder mit separaten Programmen oder schon während des Ladevorganges mit Hilfe eigener datenbanktechnologischer Funktionen, wie z. B. in Oracle11g [Sc07].

Der hierarchisch strukturierte Analyseprozess (OLAP) unterstützt Abfragen, die eine mehrdimensionale Sicht auf Daten, zum Beispiel eine gleichzeitige Abfrage der Position, Zeit und Attributierung eines Objektes, erlauben. Der Datenzugriff kann statisch und dynamisch, d. h. unmittelbar oder online, in Form von Tabellen, Listen oder Grafiken erfolgen. Auch hier sind entweder separate Programme, die relational (ROLAP), multidimensional (MOLAP) oder hybrid (HOLAP) strukturiert sind [Cl98], in Warehouse-Systeme eingebunden oder es sind direkt OLAP-Funktionen bereits in Datenbanken integriert.

*Der Trend, Mining-Analysen zu integrieren, ist ebenfalls zu beobachten. Unter Data Mining versteht man den Prozess des Entdeckens bedeutsamer neuer Zusammenhänge, Muster und Trends durch die Analyse großer Datensätze mittels Mustererkennung sowie statistischer und mathematischer Verfahren (Erick Brethenoux, Gartner Group) [Sp08].*

Über Datenextraktion, -filterung und -aggregation werden themenorientierte Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten abgeleitet, die in einer neuen Verknüpfung gespeichert werden können. Während des Prozesses können die Analyseanwendungen über verschiedene Netze auf die Daten des Data Warehouses zurückgreifen. Die Einbeziehung des räumlichen Faktors während der Datenanalyse kann durch die Kombination von GIS-Methoden (räumliche Streuungsmaße, geostatistische Schätzverfahren, Suchstrategien) optimiert werden.

Räumliche Datenanalysen werden durch statistische Methoden in Geoinformationssystemen realisiert (z. B. Spatial Statistics Tools der ArcToolbox in ArcGIS, Ersi). Räumliche Analysemethoden, ob Nachbarschaftsanalyse, Distanzfunktionen, Filter, Interpolation oder Multithema-Integration wie Verschneidung, aber auch Geländeanalyse und Klassifikation, bilden die Grundlage von Modellierung und Simulation räumlicher Phänomene und sind Hauptbestandteil eines Geoinformationssystems. Die innerhalb eines Data Warehouses oder extern durch Anwenderprogramme fungierenden Simulations- und Präsentationsmodule stellen den zweiten Ansatz, dynamische Raumphänomene zu visualisieren, dar.

Die Beschreibung dynamischer Aspekte in Geoinformationssystemen bedarf spezieller Modellkomponenten, die gleichzeitig analytisch oder anknüpfend spezifische Raumprozesse abbilden. Wie in der Datenbankmodellierung wird die Softwarearchitektur computergraphischer Systeme modelliert. Spezifikationen, die statische oder dynamische Aspekte beschreiben, werden durch graphische Notationen z. B. durch die Modellierungssprache UML abgebildet. Folgend werden verschiedene Forschungsansätze der Modellierung und deren Kompatibilität zu Geoinformationssystemen betrachtet.

<sup>26</sup> *Data Marts thematisierter Datenbestand innerhalb eines Data Warehouses.*

### 3 Dynamische Visualisierungskonzepte durch Kopplung von Simulations- und Geoinformationssystemen

Analyseergebnisse dynamisch in Geoinformationssystemen abzubilden, geschieht durch die Einbettung bzw. Kopplung von Simulationskomponenten. Das Wesentliche einer Simulation<sup>27</sup> ist die zeitliche Dimension zur Abbildung von Vorgängen. Struktur und Verhalten werden durch ein deterministisches (exakte Werte, z. B. DB-Fahrplan) oder stochastisches (regelloser Prozess, z. B. Straßenverkehr) Modell simuliert. Simulationsmodelle dienen der Abstraktion und dem Sichtbarmachen eines Systems, das das Verhalten modellgestützt unter dynamischen Aspekten analysiert und dessen Ergebnisse gegenüber der zielgerichteten Nachbildung von Bewegungsabläufen (Animation) je nach Szenario- und Operationsdaten variierend visualisiert [Ma89]. In dynamischen Systemen verändern sich im Lauf der Zeit die Systemgrößen, die sich *kontinuierlich* in beliebig kleinen Zeitabschnitten oder *diskret*, sprunghaft nach endlichen Zeitabschnitten verändern. Diskrete Simulationsmodelle werden nach Mattern in zeit- und ereignisgesteuerte, in aktivitäts-, prozess- und transaktionsorientierte Modelle weiter unterschieden. Das Modellgerüst basiert im Kern auf zeitlichen Funktionen, Algorithmen und Prozessen. Dynamische Raumphänomene, die gleichzeitig räumliche und zeitliche Prozesse beschreiben, verändern ihre quantitativen (Wachstum, Minderung) und qualitativen (Wandel) Eigenschaften. Geoinformationssysteme analysieren und bilden hauptsächlich die räumliche Komponente eines Systems ab. Eine Verknüpfung der räumlichen und zeitlichen Dimensionen durch die Kopplung von Simulationsmodellen mit Geoinformationssystemen ist momentan die gängigste Verfahrensweise, da trotz temporaler Ansätze Geoinformationssysteme in der breiten Anwendung nach wie vor statisch operieren, d. h., die Daten werden während des Modellablaufes nicht verändert. Um den Raum dynamisch abzubilden, werden Geoinformationsdaten herausgelesen, in einem Simulationssystem verändert und in gewissen Zeitintervallen mittels Preprocessing (Verfahren der Datenintegration und -bereinigung zur Behebung inkompatibler Daten) in das GIS zurückgespielt [Me03].

Für die Integration von GIS-Daten in einem Simulationssystem werden zum einen Schnittstellen mit einfachen Ein- und Ausgabefunktionen und zum anderen komplexe Software-Frameworks (auch zur Kombination mehrerer Simulatoren, z. B. Single Sada ETH-Zürich) benutzt, die Schnittstellen bestimmter Klassen definieren. Bei einer engeren Koppelung [Se94], die nicht nur den Datenaustausch garantiert, sondern Schnittstellen zu Komponenten sowohl eines GIS als auch eines Simulationssystems konzipiert, werden Benutzer-, Kontroll-, Daten- und Programmschnittstellen entwickelt [Ba05].

Die Programmierschnittstelle (z. B. API<sup>28</sup>) gewährleistet die Kopplung von Objekten, indem sie eindeutige Parameter, ggf. Routinen [IT08] formuliert, die über Variablen und Operatoren auf Zeitskalen zugreifen können. Kontrollstrukturen koordinieren verschiedene Abläufe zwischen den Komponenten. Der Datenaustausch von Simulations- bzw. 4D-Daten erfolgt zunehmend durch standardisierte Formate, wie *HDF – Hierarchical Data Format* [SI08], das *GRIB – Grid in Binary* Format und das *netCDF – Network Common Data Format* [Ba04].

<sup>27</sup> *Simulation: Darstellung oder Nachbildung eines Prozesses oder bestimmter Aspekte desselben durch ein Modell. Simulationen erlauben Untersuchungen oder Manipulationen insbesondere des Zeitverhaltens. Für die Formulierung computertauglicher Simulationsmodelle existieren zahlreiche prozess-, ereignis- bzw. objektorientierte Simulationssprachen, z. B. SIMULA (englisch simulation language) oder GPSS (general purpose simulation system) [Br01].*

<sup>28</sup> *API programming interface, Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung.*

Standardisierte Geodatenformate sind *SDTS – Spatial Data Transfer Standard*, *DIGEST – Digital Geographic Information Exchange Standard* Amerika, *EDIGéO – échange de données informatise dans le domaine de l’information géographique* Frankreich, *NTF – Electronic transfer of geographic information*, United Kingdom, *EDBS – Einheitliche Datenbankschnittstelle* für ALK-/Atkis-Daten Deutschland et cetera [Mo97]. Datenredundanzen des reinen Geodaten austausches sind nach wie vor problematisch. Die dagegen gängigen Komponentenmodelle, die auf eine modulare Komponentenarchitektur (OGM – Open Geodata Modell von OGC<sup>29</sup>) zurückgreifen, bieten durch ihre gekapselten Softwaremodule und standardisierten Schnittstellenspezifizierungen interoperable Zugriffs- und Verarbeitungstechniken. Komponenten sind Softwareeinheiten (Komponentensysteme z. B. CORBA<sup>30</sup>, EJB<sup>31</sup>) mit wieder verwendbarer Funktionalität, die aus Bibliotheken herausgesucht werden und durch eine enge Kopplung in eine Software meist statisch eingebunden werden [Oe01]. Die Komponenten nehmen in ihrer Deklaration oftmals Bezug auf lokale Datenmodelle. Im Gegensatz zur losen Kopplung und dem dynamischen Binden (Einsatz von Diensten) werden in den beiden Bereichen GIS- und Simulationsentwicklung ganzheitliche Modelle entwickelt.

Aufgrund der noch nicht ausreichend standardisierten Architekturen können nicht alle Simulationsmodelle mit GIS-Komponenten ohne weiteres kombiniert werden. Die Kompatibilität beider Modelle ist abhängig von der Endlichkeit, Dimensionalität, Projektion und modellierten Zeitdauer des simulierten Raumes. Die Endlichkeit steht für einen endlich definierten Raum, der idealerweise größer ist als der simulierte Ausbreitungsraum.

Wenn es nur Teilräume oder kleinere Räume sind, werden Verfahren der Zyklenberechnung (von neuem beginnend), des Wegdriftens (Werte, die über den Raum hinausgehen, fallen weg) oder Verfahren mit Ausgleichfunktionen eingesetzt. Ist die Dimensionalität unterschiedlich, so wird eine Anpassung von 2D- und 3D-Räumen für den Datenaustausch vorgenommen. Die Kombination verschiedener Projektionsarten, die flächen-, längen- oder winkeltreu sind, ist z. B. für Distanzberechnungen relevant und kann über Transformationen ausgeglichen werden.

Der Raumkontinuität entgegen stehen raumdiskrete Simulationsmodelle, außer den zellulären Automaten, die raumdiskret sind. Modelle, die ein dynamisches System<sup>32</sup> beschreiben, werden mathematisch durch die Menge  $T$  (die zum System gehörende Zeit), Menge  $W$  (vom System angenommene Werte) und Menge  $B \subset W^T$  (das zum System gehörende Systemverhalten) als Objekte bzw. Signale in der Funktion  $\omega: T \subset \rightarrow W$  beschrieben:

Operiert ein dynamisches System auf einer kontinuierlichen Zeit, ist die Menge:

$T = \mathbb{R}^+ := [0, \infty)$  mit realen Zahlen ( $\mathbb{R}$ ) als Zustandsannahme,

operiert es auf einer diskreten Zeit, ist die Menge:

$T = \mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$  mit diskreten Systemzuständen.

Ein Prozess, der mittels diskreter Zustände deklariert wird, kann aber auch durch den Übergang auf eine kontinuierliche Darstellung der Zustände vereinfacht werden. Es werden sowohl räumliche als auch zeitliche Mittelwerte berechnet [St05]. Die Beziehungen zwischen kontinuierlichen und diskreten Modellen sowie die Einbindung räumlicher und zeitlicher Strukturen werden im folgenden Abschnitt ansatzweise erläutert.

<sup>29</sup> OGC Open Geospatial Consortium <http://www.opengeospatial.org/>

<sup>30</sup> CORBA Common Object Request Broker Architecture <http://www.corba.org>

<sup>31</sup> EJB Enterprise Java Beans (OMG, Sun) <http://java.sun.com/products/ejb/s>

<sup>32</sup> Dynamisches System: beschreibt die zeitliche Veränderung von Zustandsgrößen <http://lexikon.calsky.com/>

### 3.1 Integration und Kopplung von kontinuierlichen Simulationsmodellen

Zeit ist die Abstraktion des Vor- und Nacheinanders von Ereignissen, deren kontinuierliche Wiederkehr gleicher Geschehnisse das Zeitbewusstsein bestimmt. Der Zeitfluss ist stetig und unbegrenzt. Es sind kontinuierliche Vorgänge, charakterisiert in einem endlichen Intervall mit unendlich vielen Änderungen, die uns allgegenwärtig umgeben [Br01].

Die untrennbare Verknüpfung von Raum und Zeit zum Raum-Zeit-Kontinuum (Einstein1915) bedeutet, dass die Zeitmessung nur in einem angegebenen Bezugssystem gültig ist. Zeit wird als ein endliches oder unendliches homogenes, teilbares Kontinuum angesehen [Br01]. In der Modellbildung der Zeit kann die Zeit kontinuierlich als ein Intervall der reellen Zahlen dargestellt werden oder diskret als Menge von natürlichen Zahlen. Kontinuierliche Modelle basieren meist auf Differenzialgleichungen (ODE<sup>33</sup>). Wobei hier unterschieden werden kann in Modelle mit kontinuierlicher Zeit und kontinuierlichen Zuständen und in Modelle mit diskreter Zeit und kontinuierlichen Zuständen.

Dynamische Systeme werden durch kontinuierliche Zustände, d. h. durch Werte von Zustandsvariablen erfasst. Mathematische Berechnungsverfahren wie numerische Integrationsverfahren (z. B. Runge-Kutta<sup>34</sup> 4. Ordnung), Approximationen (Näherung), Heuristiken<sup>35</sup> im nichtlinearen Bereich, Erhaltungsgleichungen (Euler-Gleichungen<sup>36</sup>) dienen der deduktiven (elektronische Schaltungen, mechanische Systeme) oder induktiven (Populationsprozesse, System Dynamics) Modellierung [Ke03]. Mittels Simulationssprachen wie ACSL<sup>37</sup> oder multidisziplinärer Modellgenerierungswerkzeuge wie Dymola<sup>38</sup> ermöglichen Varianzanalysen Klassifikationen und Simulationen von Szenarien dynamischer Systeme. Das Einbeziehen der räumlichen Komponente wird durch Kopplungs- oder Integrationsmethoden zu Geoinformationssystemen realisiert. Ein Anwendungsbeispiel kontinuierlicher Simulation ist z. B. der Populationsprozess. Modelle der Populationsdynamik beschreiben Wachstumsprozesse von Populationen. Ein einfaches deduktives Modell kann die maximale Population ( $P = \text{Geburtenrate} - \text{Sterberate}$ ) durch eine zeitkontinuierliche logistische Funktion beschreiben, bei der sich die Wachstumsrate mit der Annäherung an  $P_{\max}$  abschwächt.

Räumlich werden kontinuierliche Phänomene in Geoinformationssystemen meist erst punktuell erfasst und anschließend in die Fläche interpoliert. Kontinua sind räumlich oder flächenhaft unbegrenzt und von stetigem Verlauf. Sie können sichtbar wie die Zustandsänderung eines Flusslaufes oder nur messbar (Staubmessungen) sein [Ha02].

Kontinuierliche Daten in Geoinformationssystemen beziehen sich meist auf Rasterdaten, die zum Beispiel Oberflächeneigenschaften wie Höhenwerte angeben.

<sup>33</sup> ODE ordinary differential equation, gewöhnliche Differentialgleichung, als Argument hat ODE die eigentliche Gleichung und die Funktion, die gesucht ist [Ha06].

<sup>34</sup> Runge-Kutta nach C. Runge und W. Kutta spezielles 4-stufiges Annäherungsverfahren (Differenzialgleichung) für einen Prognosewert <http://www.learn-line.nrw.de/angebote/modell/runge.htm>

<sup>35</sup> Heuristiken – Einsatz heuristischer Verfahren, die in kurzer Zeit mit geringem Rechenaufwand (klassische Algorithmen) zuverlässige Lösungen (mehrfache Anwendungen, mehrere Iterationen) herausfinden.

<sup>36</sup> Euler-Gleichungen – „Gleichungssystem, welches eine nichtviskose Strömung unter Einbeziehung der Erhaltung von Masse, Impuls und Energie beschreibt.“ (partielle Differentialgleichung). [http://www.math-net.org/MathInd/fkz03KRM1FR/glossaries/math.shtml#de\\_1BEuler-Gleichungen](http://www.math-net.org/MathInd/fkz03KRM1FR/glossaries/math.shtml#de_1BEuler-Gleichungen)

<sup>37</sup> ACSL – Advanced Continuous Simulation Language, in der Industrie verbreitetes System.

<sup>38</sup> Dymola – DYnamic MOdeling LAnguage ist eine Beschreibungssprache für Modelle kontinuierlicher Systeme, Simulationssystem mit graphischer und textlicher Schnittstelle.

GIS-Operatoren (z. B. Filter) greifen dabei auf statistische (Mittelwert, Maximum) und arithmetische (Differenz, Summe) Methoden zurück, die die Pixelwerte einer Rasterzelle für Berechnungen heranziehen. Jede Zelle wird mit einem Attribut und einem Koordinatenpaar meist in einer relationalen Datenbank gespeichert. Gekoppelte oder integrierte Systeme arbeiten nicht nur mit einem Modell, sondern mit mehreren Teilmodellen wie z. B. Wachstumsmodellen verschiedener Arten, Interaktionsmodellen, Modellen mit periodischem Verhalten etc. [Ke03]. Kontinuierliche Modelle mit einem Raumbezug sind z. B. das WMS (Watershed Modeling System) der Scientific Software Group. Ein Flussgebietsmodell, das räumliche Daten durch Schnittstellen zu ArcGIS<sup>39</sup>, GWN<sup>40</sup>-COGO/DTM/SURF (AutoCAD-Werkzeuge für Geländedarstellungen in 2D und 3D), MapViewer (räumliches Analysewerkzeug) zur Verfügung stellt. Schnittstellen zu Datenbanken (z. B. Klimadatenbank Chempoint<sup>41</sup>), hydrodynamischen Modellen (z. B. das Diagrammmodul SMS<sup>42</sup> oder HSPF<sup>43</sup>), Geländemodulen, Drainagemodulen etc. sind enge Kopplungen zu numerischen Modellen (z. B. Drehbeschleunigungsmodul), die die Daten vereinfachen, die Durchläufe überwachen und getrennt vom Hauptsimulationsmodul agieren. Die Visualisierung erfolgt über Vektor- und Flächenanimationen, die 3D-Ansichten, Grau- und Farbschattierungen in entsprechenden Zeitschritten anbieten. WMS ist ein kommerzielles GIS-basierendes Data-Processing-Framework mit dynamisch automatisierten Modulkomponenten. Ein Beispiel für ein deterministisches kontinuierliches Simulationsmodell ist TOPOG<sup>44</sup>, das auf einem digitalen Geländeanalysemodell basiert. Verteilungsparameter ermöglichen räumliche und zeitliche Veränderungen, die fest definiert sind und z. B. Bodenart, -vegetation, -klima zugeordnet werden.

Mit Hilfe topographischer Attribute, die auf der Basis von Stromliniennetzwerken (*streamtube*-Netzwerke) funktionieren, werden z. B. Versickerungen, Sedimenttransporte etc. simuliert. Messwerte können mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung in einem Messzeitraum integriert und mit Parametern ausgewertet werden. Durch Steuerprogramme und Kontrollschnittstellen (Topog\_demgen) wird der Dateneingang zu anderen Modulkomponenten gesteuert. Berechnungsmodule agieren geometrisch, analytisch oder numerisch.

Modelle mit diskreten Raum- und Zeitvariablen und kontinuierlichen Zustandsübergängen sind hybride Formen der Simulation, die sowohl die kontinuierliche Dynamik als auch den ereignisdiskreten Prozess abbilden. Es sind numerische Simulationen (oft verschiedene Teilsimulationen), die die Zustandereignisse numerisch über Differential-Algebra-Systeme behandeln und mittels konkreter Initialisierung die Ermittlung neuer Zustände bestimmen [Ga07].

Zum Beispiel makroskopische Verkehrsmodelle erreichen eine kontinuierliche Verkehrsströmung, indem die Verkehrsdichte  $p(x,t)$  und die mittlere Verkehrsgeschwindigkeit  $v(x,t)$  in Abhängigkeit von Ort  $x$  und Zeit  $t$  über gekoppelte partielle Differentialgleichungen bestimmt werden. Bestimmungsgleichungen (Kontinuitäts- und Bewegungsgleichungen) des Verkehrsflusses, der Beschleunigung des Verkehrsablaufes werden numerisch basierend auf finiten (endlichen) Differenzen, finiten Elementen gelöst, die eine räumliche und zeitliche Diskretisierung beinhalten [Ro01]. So werden z. B. Störungsanalysen über die Eingabe von Parametern und deklarierten Randbedingungen optimiert.

<sup>39</sup> ArcGIS – ist der Überbegriff für eine kommerzielle Produktfamilie aus sich ergänzenden GIS-Software-Produkten der Firma Esri.

<sup>40</sup> GWN – Groundwater Software der Scientific Software Group.

<sup>41</sup> ChemPoint/Chem/ta - include/ environmental /ampling data/a/e management and /tatilical application/

<sup>42</sup> SMS – Surface Water Modeling System der Scientific Software Group.

<sup>43</sup> HSPF – Hydrological Simulation Program – FORTRAN der Scientific Software Group.

<sup>44</sup> TOPOG – terrain analysis-based hydrologic modelling package <http://www.per.clw.csiro.au/topog/>

---

Simulationsprozesse räumlicher Systeme werden vermehrt, bedingt durch die Bewältigung großer Datenmengen und die Kombination unterschiedlicher Datenmodelle, auf verteilte Systeme organisiert, die parallel, zeitgleich oder zeitversetzt ablaufen, z. B. durch multi-reaktive Agenten (Monte-Carlo-Simulation) oder selbstorganisierende lernende (neuronale Netze) Systeme [Ga07]. Sie beruhen meist auf diskreten Simulationsmodellen. Da zeitkontinuierliche Simulationen zu den aufwendigsten Simulationsmethoden gehören, gelten Modelle kontinuierlicher Zeit und diskreter Zustandsübergänge und Modelle diskreter Zeit und diskreter Zustandsübergänge als effizienter.

### 3.2 Integration und Kopplung diskreter Modellierungsmodelle

Während eines Simulationslaufes wird eine virtuelle Zeit angenommen, deren Ablauf unterschiedlich je nach Modellvariablen und Methode simuliert werden kann. Ändern sich die Variablen sprunghaft und nicht fließend, wie in kontinuierlichen Modellen, so sind es diskrete Simulationsmodelle. Sind die Sprünge von gleicher Länge und führen zu äquidistanten Zeitpunkten, so werden sie der Taktsimulation (schrittweise oder zeitgesteuerte Simulation) zugeordnet [Lo04]. Die Simulationszeit wird dabei in Takte gleicher Längen zerlegt, und zu jedem Taktzeitpunkt werden die Werte der Modellvariablen neu berechnet. Algorithmen überprüfen die Modellvariablen zu jedem vorher festgelegten Zeittakt und stoßen entsprechende Änderungsprozesse an. Taktsimulationen sind Zeitfolgesimulationen, d. h. Simulationen partieller Differenzialgleichungen, die die Veränderungen mittels stetiger Funktionen als Simulationszeit abbilden. Sie werden für die Darstellung taktbestimmter Prozesse, z. B. Modellierung von Fahrplänen an Haltestellen, die eine reale Taktung gleicher Zeitabstände von ÖPNV-Linien an Haltestellen simulieren (Verteilung von Fahrgästen im 5-Minuten-Takt), verwendet [Lo04].

Orientieren sich die Zeitsprünge an Zeitpunkten mit sprunghaften Wert- oder Zustandsänderungen, werden sie als ereignisorientiert definiert. Ein Ereignis bewirkt einen Zustandsübergang (atomar) zum Eintrittszeitpunkt, das Folgeereignisse auslösen kann. Der Prozess wird in aufeinander zeitlich folgende mit frei wählbaren Zeitintervallen zerlegt [Ma89]. Pro Zeitintervall können nur endlich viele Zustandsänderungen betrachtet werden.

Zufallsvariablen können zudem Aussagen über die zu erwartende Wahrscheinlichkeit eines Zustandswechsels liefern. Eine Form der ereignisgesteuerten Modellierung ist die aktivitätsorientierte Simulation [Lu02], in der Zustandsänderungen (Aktivität) durch Anfangs- und Endergebnisse charakterisiert werden. Zwischen den Aktivitäten finden Zeitsprünge statt, da nur die Zeit und der Zustand am Anfang und am Ende einer Aktivität in einem festgelegten Zeitraum relevant sind [Ma89]. Die Dynamik eines Systems ist auf eine Menge von Aktivitäten verteilt [Lu02]. Ein prozessorientiertes Modell ist ein Gebilde aus einer Menge interagierender Objekte [Ma89], die aktive und inaktive Prozessphasen durchlaufen. Aktive Phasen können neue Prozesse zu bestimmten Zeitpunkten generieren, aktivieren, andere Prozesse planen und deaktivieren. Anders als bei Ereignisroutinen kann der unterbrochene (inaktive) Prozess zu einem anderen Zeitpunkt fortgeführt werden. Beispiele dafür sind aktivitätsorientierte Verkehrssimulationen, Simulationen von Stadtentwicklung und Flächennutzung. Zeitparameter, Ausführungsbedingungen und Transformationsregeln bestimmen deterministisch das Systemverhalten. Die Möglichkeit, stochastische Methoden (Wahrscheinlichkeitsverteilungen, Zufallsströme) einzubeziehen und optimierende Verfahren zu integrieren, wie z. B. zeitbehaftete Automaten, Petri-Netze oder Fuzzy-Logik, erlaubt ganzheitliche Analysen von Systemstruktur und -verhalten. Der Anwendungsbereich und die Standardisierung von Elementen und Sprachen diskreter Simulationen sind dementsprechend größer, z. B. Evakuierungssimulationen, Rückkopplungsverhalten sozioökonomischer Systeme etc. Raumdiskrete Modelle fassen Systemgrößen in Raumeinheiten zusammen. Diskreta in Geoinformationssystemen sind isolierte bzw. abgegrenzte Objekte, die entsprechend ihrem Vorkommen absolut (Objektfläche, -linie,

-punkt), relativ (Verbreitungsfläche, -linie, -punkt) oder flächenbezogen (Bezugsfläche) sind [Ha02]. Geoinformationssysteme beschreiben diskrete Objekte durch Messungen oder Vektordaten. Bei der Rasterdarstellung werden sie nachträglich extrahiert durch z. B. zonale Operatoren, die aus nominalen Klassen bestehen, d. h., alle Zellen derselben Klasse bilden eine Zone [Bl02]. Interpolationsmethoden, wie Kriging<sup>45</sup> (Schätzverfahren), die auf der Annahme beruhen, dass räumliche Verteilungen mit demselben Muster erfolgen, werden für die Erzeugung von diskreten Daten oder diskreten Daten umgewandelter Ereignisse (z. B. Indicator in Geostatistical Analyst von ArcGIS) in Geoinformationssystemen eingesetzt [ESR07].

Ein Beispiel für stochastische Simulationsmodelle ist das mikroskopische, zeitschrittorientierte Simulationsmodell VISSIM zur Nachbildung von Stadt- und Außerortsverkehr. Das Simulationstool basiert auf einem Netzmodell, das durch eine Netztopologie Routen, Abbiegerelationen, ÖV-Linienverläufe modelliert, wobei das Routing auf drei verschiedene Verfahren zurückgreifen kann (stochastische Verteilung auf festen Routen, dynamisch mit zeit- und verkehrsabhängiger Routenwahl und dynamische Umlegung in Abhängigkeit von Fahrzeugklassen und stochastischen Routenwahlverfahren). Das Simulationsmodul implementiert verschiedene Bewegungsmodelle (Fahrzeugfolgmodell mit einer zeitlichen Auflösung von 1/10 Sekunde, Fahrstreifenwechselmodell mit frei definierbaren Fahrer-Fahrzeugklassen), die automatisch mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen (stochastisch) integrieren. Die Visualisierung wird durch ein 2D-Animationsmodul und einen 3D-Modeler (V3DM) realisiert. Gekoppelt ist das Simulationsmodell mit dem Verkehrsplanungsmodell VISUM, dessen Datenmodellierung auf integrierte Verfahren wie aktivitätsorientierte Modelle, Trip-End-Modelle, Umweltmodelle (Schadstoff-, Lärmemission) sowie graphische Analysen (Spinnen, Isochronen) basiert. GIS-Daten werden ebenfalls gekoppelt über Schnittstellen zu MapInfo oder ArcGIS, die erst in VISUM eingelesen und anschließend in das VISSIM importiert werden. Es gibt keinen Methodenaustausch zwischen den Datenmodellen des Geoinformationssystems und dem Simulationsmodul. Erweiterte COM-Schnittstellen ermöglichen durch Callback-Funktionen vereinzelt Zugriff auf Netzelemente in VISSIM.

Module zur makroskopischen Verteilungsanalyse wie VISEVA, die mittels Iterationsverfahren Verteilungsmuster analysieren oder Module zur Aktualisierung von Verkehrsnachfragematrizen wie VStromFuzzy, die Verfahren unter Berücksichtigung von Unschärfebereichen (Fuzzy-Methode) Zählwerte aktualisieren, sind Beispiele für Kopplungen durch Austausch über Dateien, aber auch Ansätze über Schnittstellen des direkten Informationsaustausches (COM-Schnittstellen). Besonders in verteilten Systemen können diese Ansätze beobachtet werden. Sie dienen der Beschleunigung von Simulationsabläufen.

Ansätze paralleler (Verteilung auf mehrere Prozessoren) und verteilter (Unterteilung in Submodelle) Simulationen benötigen einen direkten Datenaustausch, um so die Verteilung der Komplexität zu realisieren. Die mehrschichtige Architektur ermöglicht einen einfachen Zugriff auf verschiedene Quellen. Verteilte Systeme spielen in der Geoinformation eine zentrale Rolle, insbesondere die Nutzung und Vernetzung bestehender, heterogener Geodaten.

<sup>44</sup> *Kriging bezeichnet eine Interpolationsmethode, basierend auf numerischen Messungen der räumlichen Variation von bekannten Punkten, die in unterschiedlichen Entfernungen liegen[Ge07].*

### 3.3 Integration und Kopplung von parallelen Modellen in verteilter Umgebung

„Unter der Bezeichnung »Verteilte Systeme« versteht man Netzwerke, die geografisch verteilt und logisch über Knotenrechner verbunden sind. Generell ist die Konfiguration so, dass die Knotenrechner sich die gemeinsamen Ressourcen wie File-Server, Print-Server, Host-Anwendungen oder Datenbanken teilen. Die Kommunikation zwischen den DDP-Knoten (Distributed Data Processing) kann sporadisch oder intensiv sein, interaktiv oder in Stapelverarbeitung“ [IT08].

Die Unterschiede zwischen verteilten und parallelen Systemen sind nicht mehr so klar zu definieren, da neue Entwicklungstrends die Eigenschaften beider Ansätze implementieren. Die Idee ist, dass parallele Modelle Prinzipien und Synchronisationsmechanismen<sup>45</sup> beschreiben, die eine verteilte Ausführung auf einem Netzwerk von Ressourcen unterstützen [Kü03]. Optimiert wird ein Prozess durch gleichzeitiges Operieren auf mehreren Prozessoren (Rechnern), deren Geschwindigkeit sich erhöht, wenn über ein Multithreading<sup>46</sup> das Ausführen auf mehreren Berechnungsroutinen verteilt wird. Ein gleichzeitiger Datenaustausch kann nur mittels Synchronisationsmechanismen erfolgen, d. h. durch Senden und Empfangen von synchronisierten Nachrichten. Die Kommunikationsmethoden können asynchron oder synchron sein, die wiederum blockierend (d. h. wartend, bis die Kommunikation beendet ist) oder nicht blockierend (führt parallel zur Kommunikation andere Operationen aus) fungieren können [Ge89]. Die Zerlegung in Teilprobleme und deren Zuordnung auf entsprechenden Prozessoren (funktionale Verteilung) sowie die Übertragung von Kommunikations- und Synchronisationsvorgängen sind wichtige Kriterien der Parallelisierung.

Je nach Kommunikationsmuster und Programmiermodell wird ein Objekt mit komplexen Abfolgen und Zustandsübergängen modelliert. Programmierumgebungen zum verteilten Rechnen können einfache Message Passing Interfaces (MPI) sein, oder es werden zur Ausführung von unabhängigen verteilten Simulationsläufen parallelisierende Compiler, funktionale und logikbasierte Programmierung eingesetzt. Das Simulationsmodell ist meist funktional in logische kooperierende Teilprozesse unterteilt. Mit einer geeigneten Parallelisierung, die z. B. durch Partitionierung, d. h. Aufteilung in Teilmodelle abhängig vom Kopplungsgrad (je höher, komplexer und aufwändiger, desto geringer eine Beschleunigungsoptimierung) realisiert wird, kann neben dem Speicherverhalten (mit Rollback-Möglichkeit, Ereignisse können rückgängig gemacht werden), der Dynamisierung von Modellbeschreibungsdaten und der Konsistenzsicherung (durch Synchronisation) in verteilten Simulationsumgebungen die Integration von Simulationsfunktionalitäten realisiert werden. Standardisierte Verfahren für verteilte Simulationssysteme sind u. a. das Kommunikations- und Koordinierungsprotokoll Distributed Interactive Simulation (DIS), die Softwarearchitektur High Level Architecture for Modeling and Simulation (HLA) oder das objektorientierte Client-Server-Anwendungsdesign CORBA (Common Object Request Broker Architecture) und die Parallel Discrete Event Simulation (PDES).

<sup>45</sup> *Synchronisationsmechanismen regeln die Kommunikation untereinander ohne Einschränkungen bezüglich der Ausführreihenfolge.*

<sup>46</sup> *Multithreading (auch Mehrfädigkeit) bezeichnet das zeitgleiche Abarbeiten mehrerer Threads (Ausführungsstränge innerhalb eines einzelnen Prozesses oder eines Tasks).*  
<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6680>

Die Einbindung von GIS-Komponenten dient zum einen als Basisdienst räumlicher Informationen und zum anderen als Analysewerkzeug und kann dynamisch über permanente oder temporäre Komponenten modelliert werden, um z. B. während einer Laufzeit Anwendungen, Objekte, Ereignisse hinzuzufügen oder zu entfernen [KI01]. Das Kombinieren der Softwarekomponenten, die sog. Systemkomposition (Hinzufügen oder Entfernen von Komponenten), ist stark von dem zeitlichen Verhalten (definierte Zeitpunkte, Anfangs- und Endzeit) der verschiedenen Komponenten abhängig.

Ansätze einer zeitgesteuerten Architektur wie Trigger<sup>47</sup> oder Scheduler<sup>48</sup> ermöglichen eine flexible Komposition, ohne die zeitlichen Garantien zu verletzen. Simulationsmodelle in einer verteilten Umgebung (z. B. Simulationsnetzdienste wie Client Server oder agentenbasierte Simulationsmodelle) sind stark von einer zeitlichen Synchronisation abhängig. Die zeitlichen und räumlichen Aspekte werden z. B. durch HLA-fähige Komponenten flexibel zu einer Komposition miteinander verbunden.

Beispiele zur Visualisierung geographischer Informationen und paralleler, verteilter und internetbasierter Simulation sind individuenorientierte (zellulare Automaten) oder agentenorientierte Simulationsmodelle (Agenten, die in einem Agentensystem durch gemeinsame Protokolle, Ontologien und Interaktionsvereinbarungen mit weiteren Agenten kommunizieren).

### 3.3.1 Integration und Kopplung individuenorientierter Simulationsmodelle

Individuenorientierte Modelle simulieren durch räumliche und zeitliche Differenzierungen Interaktionen zwischen Individuen, z. B. eines Ökosystems mit einer eher geringen Anzahl an Individuen (z. B. Organismen). Die individuenorientierte Modellierung basiert auf dem Ansatz der verteilten, diskreten Simulation mit Integrationsmöglichkeit kontinuierlicher Modellierungsmethoden, z. B. in Zellularen Automaten bzw. höheren Petrinetze (mathematisches Modell von nebenläufigen Systemen, zeiterweiterte Petrinetze können deterministisch oder stochastisch sein). Eine Kopplung mit Geoinformationssystemen wird derzeit an der Universität Oldenburg am Department Informatik im Bereich Umweltepidemiologie untersucht. I-EPISIM-2, eine Simulationssoftware zur simulativen Analyse zeitlich strukturierter Expositionsdaten von Umweltsystemen gekoppelt mit einem internetbasierten geographischen Informationssystem InterGIS<sup>49</sup>, ermöglicht durch das verfügbare ActiveX-Control und die C++-Programmierschnittstelle eine Anbindung an das Simulationsmodell. Zellulare Automaten (ZA) werden mit Hilfe von i-EPISIM-2 gesteuert und zur Auswertung von Simulationsläufen (animiert) visualisiert oder mit Methoden der deskriptiven Statistik aufbereitet [Kö01]. Die verteilte Datenhaltung heterogener Daten aus z. B. relationalen (RDBMS) oder objektorientierten (OODBMS) Datenbanken werden durch Treiberschnittstellen mit räumlichen und thematischen Zugriffspfaden in einem Framework modelliert. Wrapper<sup>50</sup> bilden die angebotenen Funktionalitäten auf verschiedene Systeme ab und ermöglichen die Integration von Objekten, Daten und Methoden. Anfragen werden identifiziert und der Zugriff auf partitionierte Daten (Objektarten, Raumbezug) gemanagt.

<sup>47</sup> *Trigger-Auslöser von Ereignissen bzw. Starten eines Skriptes, in Datenbanken werden Trigger mit Tabellen verbunden, die bei einem bestimmten Ereignis aktiviert werden, Trigger-time-Zeitpunkt der Trigger-Aktion bevor oder after????*

<sup>48</sup> *Scheduling-Zeitablaufsteuerung, weist Prozessen zeitlich begrenzte Ressourcen (Zeit und Speicher) zu.*

<sup>49</sup> *InterGIS – kommunales GIS-Liegenschafts- und Auskunftssystem.*

<sup>50</sup> *Wrapper – überprüft Zugriffsberechtigung des Kommunikationspartners, dient als Schnittstelle zwischen Kernsystem im Webservice [www.intergis.de](http://www.intergis.de).*

Über Kommunikationsmodule werden die Anfragen auf dem Clientrechner ausgewertet und in einem Grafikmodul mit konkreten Zeichenkontexten verschiedener Systemumgebungen visualisiert (Parameter für Farbe, Schraffur). Die simulierten Komponenten werden einer eigenen geographischen Klasse zugeordnet und auf einer benutzerdefinierten InterGIS-Ebene dargestellt [Kö01].

Analysen, z. B. zur Schadstoffbelastung eines Individuums oder einer Gruppe von Individuen, können räumlich auf Grund von Bewegungsmustern und Topologien zusammenhängend betrachtet werden.

Kommunizieren die Individuen miteinander und agieren in ihrer Umwelt flexibel und selbständig durch gemeinsame Protokolle, Ontologien und Interaktionsvereinbarungen, so werden sie als eine abgrenzbare Softwareeinheit innerhalb eines Agentensystems betrachtet. Dynamisch interagierende Simulationskomponenten, die nicht unbedingt alle a priori bekannt sind, die eine Fremdkontrolle nur eingeschränkt zulassen und zwischen denen elaborierte Kommunikations- und Koordinationsprozesse erforderlich sind, werden den agentenorientierten Modellen zugeordnet [We01].

### 3.3.2 Integration und Kopplung agentenorientierter Simulationsmodelle

Agentenorientierte Simulationsmodelle beruhen auf dem Konzept der Multiagentensysteme, das aus interagierenden, autonomen Agenten besteht [KI01]. Ein Agent in einem Simulationsmodell ist eine virtuelle Einheit, die selbständig in Relation zu ihrer Umwelt agiert, mit anderen Agenten kommuniziert und unter anderem eigene Ressourcen, Wahrnehmungs- und Aktionsfähigkeiten besitzen kann [Me06].

Ein Multiagentenmodell simuliert Raum und Zeit, in denen durch Interaktionen Muster und Verhalten eines Systems analysiert und prognostiziert werden können.

Im Gegensatz zu zellularen Automaten (z. B. Umweltmodelle), die auf der Basis von räumlichen Einheiten und Zuständen der Nachbarzellen den eigenen Zustand nach einheitlichen Regeln aktualisieren, können Agenten in einem Multiagentensystem völlig unterschiedliche Regelsätze besitzen und sich im Raum bewegen [KI01]. Durch die Integration mehrerer Modellierungsmethoden können Multiagentensimulationsmodelle deterministische, stochastische, statische, dynamische, diskrete, kontinuierliche, reaktive (intelligente Agenten können Veränderungen wahrnehmen und darauf reagieren) und pro-aktive (intelligente Agenten agieren selbst) Ansätze implementieren [KI04]. Klassifiziert werden sie nach den Eigenschaften der Aktivität, Mobilität, Kommunikativität, Lernfähigkeit etc., so dass verschiedene Agententypen modelliert werden können.

Die Modellierung diskreter und kontinuierlicher Methoden erfordert sorgfältige Konzepte, denn die Verlinkung des Verhaltens aus der Mikroebene in ein kontinuierliches Makroverhalten kann zu Emergenz führen, d. h., Phänomene, die nicht direkt aus den Verhaltensweisen und Interaktionen ableitbar sind, können während der Simulation entstehen. Werden sie aus der Makroebene abgeleitet (Top-Down-Weg), können ungewollte Phänomene auftreten. Beim Bottom-Up-Vorgehen aus der detaillierten Mikroebene hingegen werden Agenten direkt aus Theorien oder Beobachtungen modelliert, die testen, ob gewünschte Phänomene in der Simulation beobachtet werden können [KI04].

Ein Beispiel für lokal modellierte Agenten und für eine makroskopisch raumbezogene Untersuchung ist das gekoppelte Management Application of an Agent Based Model: Control of Cowbirds<sup>51</sup> at the Landscape Scale mit dem Geoinformationssystemen GRASS.

Ein Bewegungsmodell, das Populationen in vier verschiedenen Bewegungsrhythmen simuliert. Die Populationsarten werden als Agenten mit kognitiven Fähigkeiten in Swarm<sup>52</sup> modelliert und dynamisch über importierte Rasterdaten aus dem GIS GRASS abgebildet. Die Ergebnisse eines Simulationslaufes werden in das GRASS-Format für weitere GIS-Analysen in GRASS exportiert [Har02].

Eine flexible Kopplung zwischen einem Multiagentensystem und einem Geoinformationssystem ist das im Rahmen einer Diplomarbeit erstellte Framework MAFIA<sup>53</sup>. Während eines Simulationslaufes findet ein direkter Informationsaustausch über eine COM<sup>54</sup>-Schnittstelle zu ArcGIS statt, mit dem Ziel, einen Agenten im Raum zu bewegen, zu analysieren, zu erkennen und zu verändern. Für die direkte Nutzung von GIS-Funktionen wurden ArcObjects-Klassen verwendet, die über einen COM-Aufruf gestartet werden. Auch in diesem Modell wird die Zeit nur durch Historien der Attribute abgebildet, da ArcGIS keinen temporalen Ansatz bietet [Me03].

Ein Beispiel für die Kopplung zwischen einem Geoinformationssystem (GeoMedia) und einer Multiagentensimulation mit pädagogischem Aspekt ist das Polizeisimulationsframework ExpertCOP<sup>55</sup> der Universität Fortaleza, Brasilien. Lernfähige Agenten können durch Eingabeparameter wie Zeit, Ort, demographische Dichte, Entweichungswege und mit Hilfe eines Wahrscheinlichkeitskonzeptes (wo und wann zu über 80 % z. B. ein Diebstahl stattfinden wird) Prozesse simulieren, die für diesen Zeitraum in der gewählten Region alle relevanten Daten (z. B. Verbrechen) aus der Datendatenbank extrahieren. Der pädagogische Agent hat die Fähigkeit, über Interaktionsbeispiele auf Lernstrategien (warum geschah das Verbrechen etc.) zurückzugreifen und erklärend zu agieren [Va04]. Das Framework wurde mit Java auf einer Multiagent-JADE-Plattform für eine Geosimulation entwickelt. Eine Geosimulation ist ein Simulationsmodell für städtische Phänomene mit einem Multi-Agenten-Ansatz zur Simulierung von diskreten, dynamischen und ereignisorientierten Systemen [Be04].

Über einen Domain-Agenten wird intelligentes Verhalten modelliert, das zur Analyse, Argumentation, Entscheidung und schließlich Interaktion befähigt. Der GIS-Agent ermöglicht, mit Agentenlinien der Straße die Dynamik der Domain-Agenten abzubilden und zu verfolgen. Aus dem GIS heraus wird die Karte erzeugt, manipuliert und aktualisiert. Über den ControlAgent, die Benutzerschnittstelle, basierend auf Java-Server-Page-Technologie (JSP) und dem Apache-Tomcat, werden die Zugriffe, Konfigurationen auf die Multiagenten-Plattform und die GIS-Software überwacht [Va04]. Das ExpertCOP-System wird noch in seiner Anwendbarkeit untersucht sowie die generische Architektur überprüft.

Multiagentensimulationen von Phänomen sind aufwendiger zu modellieren, je detailgenauer Agenten konzipiert werden (viele Agenten, viele Aktualisierungen).

<sup>51</sup> *Cowbirds – Braunkopf-Kuhstärlinge, Brutparasiten in Michigan, deren Nachwuchs den Altersgenossen der Pateneltern keine Überlebenschance bietet.*

<sup>52</sup> *Swarm – agent- and individual-based model* <http://www.swarm.org>

<sup>53</sup> *MAFIA – Multi-Agent-Framework interacting with ArcGIS* [www.usf.uni-osnabrueck.de/~smeinert/mafia.pdf](http://www.usf.uni-osnabrueck.de/~smeinert/mafia.pdf)

<sup>54</sup> *COM-Schnittstelle – Abkürzung für Component Object Model; von Microsoft definierter Standard für die Kommunikation und Steuerung von Softwarekomponenten.* [www.at-mix.de/com\\_schnittstelle.htm](http://www.at-mix.de/com_schnittstelle.htm) s.a. [www.it-visions.de](http://www.it-visions.de)

<sup>55</sup> *ExpertCOP – Police Patrol Training Simulation Geosimulationssoftware* <http://www.savannah-simulations.com/products/index.html>

### 3.4 Echtzeit-Kopplung in GIS über web-basierte GIS-Technologie

Die Ebenenstruktur eines Geoinformationssystems, der schichtweise Aufbau, bietet die Möglichkeit, Zeitattribute in Ebenen abzulegen. Die verteilte Speicherung von Zeitdaten wird durch Zeittabellen realisiert, die je nach Zeitgranulat in Teilmengen untergliedert bzw. gefiltert werden kann. Im Gegensatz zum Ansatz der Snapshots (Momentaufnahmen räumlicher Eigenschaften zu verschiedenen Zeitpunkten), die zu Time Slice (Zeitabschnitten), meist durch Interpolation von Messpunkten gleicher Zeit (synchron) zu Polygonen in Gruppen oder zu Time Series (Zeitreihen bei asynchroner räumlicher Veränderung, Diffusionen) zusammengefasst und ebenenweise abgelegt werden, können Zeitstempel einzelnen Objekten zugeordnet und in Space-time composites zusammengefasst werden [La92].

Je nach Modell werden Objekte mit einem Datum (Stunde, Woche, Jahr), einem Muster (z. B. 5,7 für 5-7 h), Periode (24 h) oder mit einem Anfangs- und Endzeitpunkt bedacht, um ihre Zeitdauer zu dokumentieren. Unter Echtzeit von einem Basiszustand ausgehend werden Veränderungen nicht in vereinzelt Ebenen, sondern in einer gemeinsamen Ebene gespeichert und miteinander verschnitten, aggregiert bzw. topologisiert [La92].

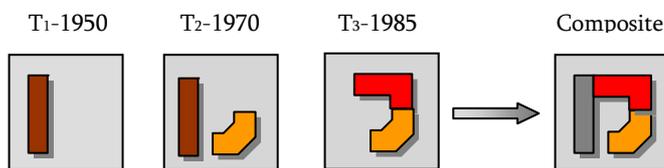


Abb. 2: Time in GIS, Quelle: Langran

Die Zustandsänderungen werden vom Basiszustand abgekoppelt und mit einer eigenen Historie versehen, um so redundante Daten in Versionsbäumen zu vermeiden. Ein Beispiel für das Anlegen einer Objekthistorie ist die geographische Geodatenbank in ArcGIS Geodatabase. In gesonderten Archiv-Klassen werden alle Änderungen der Geodatabase-Elemente (Geometrien, Attribute, Netzwerke, Topologien) geschrieben, die separat von den aktuellen Zustands- und Delta-Tabellen der eigentlichen Feature-Klasse gespeichert werden [ESR07].

Delta-Tabellen sind Replikationsmechanismen der Data-Warehouse-Technologie, die analog zur Snapshot-Aktualisierung replizierte (kopierte) Daten in Tabellen mittels SQL-Anfragen schreiben und verwalten. Die geprüften, konsistenten Delta-Tabellen können verteilt verwaltet werden [Th05]. Zeitnahe Daten, die direkt übermittelt werden, können in Geoinformationssystemen über Zeitmanagementfunktionen (Funktionen zur Synchronisation von internen und externen Uhren, z. B. aus Echtzeitnetzen) mit Online- und Echtzeitkomponenten gekoppelt werden. Über Empfangs- und Managementprozesse werden empfangene Zeitstempel direkt übermittelt oder über eine Korrektur der Latenzzeiten (Verzögerungszeiten) im Zeitstempel manipuliert. Ein Beispiel für Echtzeitnetze in Geoinformationssystemen ist das in GIS integrierte Echtzeitüberwachungssystem des Westnilvirus in Kanada.

### 3.4.1 GIS-integrierte Echtzeitüberwachungssystem

Überwachungsdaten des Westnilvirus, der durch Vögel, Pferde und verschiedene Mückenarten auf Menschen übertragen wird, werden in einem Echtzeitüberwachungssystem strukturiert erfasst, in die GIS-Technologie integriert und über eine Webseite visualisiert. Realisiert wurde das System durch ein serverseitiges komponentenbasiertes Framework im J2EE Java Standard, der die Entwicklungs- und Ablaufumgebung für Anwendungen definiert. Der Kern des Frameworks ist eine flexible Steuerungsschicht, die auf Standardtechnologien wie Java Servlets<sup>56</sup>, JavaBeans<sup>57</sup>, Resourcebundles<sup>58</sup> und XML sowie verschiedene Jakarta Common-Pakete<sup>59</sup> aufgebaut ist. Der Zugriff auf datei- und datenbankbasierenden Datenquellen (nationale und provinzielle Datenbanken), auf Überwachungsmanagementdaten sowie auf verschiedene Kartendienste (WMS-Datenquellen, ArcIMS, GeoProcessing OGC WMS) wird durch Live-Schnittstellen, den sog. Datenservern wie WMS-Server und Web-Server ermöglicht. Der kaskadierende Aufbau der Architektur erlaubt die Integration der Überwachungsdaten via Web-Eingabe, deren Datenanalyse mit statistischen Methoden für diskrete Zeitpunkte oder periodisch für Zeiträume (historisch oder aktuell) auf drei räumlichen Ebenen (Landes-, Provinzebene u. Ebene des öffentlichen Gesundheitsdienstes) erfolgt. Organisiert ebenfalls durch dynamische separate Tabellen ist eine Integration verschiedener GIS-Funktionalitäten sowie Managementfunktionen auf Zugriffs- und Benutzerrechte verschiedener Teilbereiche möglich.

Zu den GIS-Fähigkeiten gehören die Validierung der verschiedenen Raumbezugssysteme (GPS, Postcode-Adressierung, Landeskoordinaten, Rasterdaten etc.), Georeferenzierung sowie die Visualisierung von Punktkarten (Densitymap), Klimakarten in Verbindung mit der Mückenpopulation (Degree-Days-Map), Lage der Messstellen und Darstellung der Schadenanalysen, Embargogebiete, Animation der statistischen Analysen.

Für die Echtzeitüberwachung agieren vier Softwaremodule:

- Modul, das Funktionen von Webseiten unterstützt,
- Modul, das die Echtzeitdaten aus der Datenbank Oracle extrahiert und daraus statistische Karten erzeugt, die zurück in Oracle gespeichert werden,
- Modul, das aus echtzeitnahen Daten Punktkarten ableitet und diese an Institutionen bzw. an verschiedene Nutzer regelmäßig per E-Mail versendet,
- Modul, das Daten aus der Datenbank zu Reports in Form einer Excel-Tabelle generiert.

Ein ETL-Client synchronisiert die unterschiedlichen Datenarten von Bundes- und Provinzbehörden, von alten und neuen Systemen, Systemen von z. B. englischen und französischen Provinzen, Zeitsystemen, die Zeitverzögerung zwischen Eingabe und Speicherung etc.

Um unterschiedliche Module und Systeme nutzen zu können und um Informationen weiterzuleiten, werden unterschiedliche Tools (System Konfiguration Tool, Schedule Management Tool, Group Management Tool, User Management Tool etc.) verwendet [Po06], die in den entsprechenden Ebenen (Schichten) agieren. Die Integration erfolgt durch die Kopplung verschiedener Komponenten in einem Framework. Die speziell angepasste GIS-Technologie visualisiert die Daten der Krankheitsüberwachung.

<sup>56</sup> Java Servlet sind Java-Klassen des J2EE Applicationsserver.

<sup>57</sup> Java Beans sind Software-Komponenten der Programmiersprache Java.

<sup>58</sup> ResourceBundle bilden die Basis für Klassen, die eine Sammlung von Ressourcen und Informationen in der Java-Bibliothek verwalten. [java.sun.com/developer/technicalArticles/Intl/ResourceBundles/](http://java.sun.com/developer/technicalArticles/Intl/ResourceBundles/)

<sup>59</sup> Jakarta Commons bietet Zugriffsfunktionalitäten auf Internetressourcen. <http://java.sun.com/products>

---

### 3.5 Zusammenfassung

Der Abschnitt verdeutlicht, wie sich die diskreten, kontinuierlichen, stochastischen und deterministischen Modellansätze mit unterschiedlichen Technologien kombinieren lassen. Die Überführung von z. B. kontinuierlichen, deterministischen Zuständen in diskrete, stochastische Zustände kann je nach Anwendung durch entsprechende, jedoch aufwendige Simulationsmodelle gelöst werden. Die erläuterten Methoden dienen dem Verständnis der zeitlichen Abbildung eines dynamischen Prozesses und zeigen anhand der ausgewählten Beispiele, wie die räumliche Komponente integriert wird. Offene Fragestellungen sind dennoch die Effektivität und Wiederverwendbarkeit bestehender Modelle und Konzepte. Dabei spielt die Art der Kopplung zwischen der räumlichen Komponente eines Geoinformationssystems und der zeitlichen Komponente eines Simulationssystems, sofern es nicht nur um die Bereitstellung von Geobasisdaten handelt, die über Sichtfenster realisiert werden, eine wesentliche Rolle. Integrierende objektorientierte Aspekte sind Entwurfsmuster zur Übersetzung von Schnittstellen für die Kommunikation von Klassen mit zueinander inkompatiblen Schnittstellen oder gekapselte Zugriffe auf föderierte Systeme, wie Data Warehouses mit Verteilungsplattformen (Middleware) zur personen- oder anwendungsspezifischen Informationsintegration mehrerer Datenquellen. Die Kapselung von Objekten, die die Kommunikation von Daten und Methoden verschiedener Systeme erlauben, ist für die Integration räumlicher Komponenten mit der Implementierung spezieller GIS-Funktionen ein weiterer wichtiger Aspekt, der in das Konzept dieser Arbeit einfließt. Die Anwendungen loser und enger Kopplung im Hinblick auf die zeitliche Komponente werden erst ansatzweise realisiert. Oft wird der Programmieraufwand für die Kopplung mit einem GIS umgangen, indem z. B. Geoinformationen ohne GIS mit Spracherweiterungen (siehe 2.3.3) relationaler Datenbanken (z. B. Geo-SQL) analysiert werden. Listen mit Objekten werden über Spezifikationen automatisierter Analysen direkt abgefragt und im Internet-Browser visualisiert. Aufbauend auf den vorangegangenen Ausführungen, wird ein Schichtmodell konzipiert, das Zeitskalen mit Raumdaten bereits in der Datenhaltung zeitabhängig (Zeitstempel, Historie) verwaltet, dynamisch verarbeitet und für prozessorientierte Fragestellungen simuliert. Die Simulation bzw. die Prozessdynamik wird nach methodischen Gesichtspunkten zeit- und raumbezogen visualisiert.

## **4 Visualisierungsprozess dynamischer Raumphänomene in Geoinformationssystemen am Beispiel Verkehrsbeeinflussung**

Das Management dynamischer Daten hat, bedingt durch wachsende Anwendungen in der Geoinformation, in der mobilen Kommunikationstechnologie, im Katastrophenmanagement und in der Verkehrsüberwachung an Bedeutung gewonnen. Die Entwicklung neuer Methoden zur Beschreibung dynamischer komplexer Prozesse profitiert von Forschungsergebnissen aus dem räumlichen und temporalen Datenbankdesign, aus der Simulationstechnik und der GI-Science. Nach dem Einordnen der in Kapitel 3 aufgeführten Simulationstechniken in Zusammenhang mit Anwendungen im GI-Bereich wird in diesem Kapitel die Konzeption anhand eines Modellbeispiels, das dynamische und räumliche Aspekte vereint, vorgestellt. Die interdisziplinäre Herangehensweise in dieser Arbeit soll neue Entwicklungstrends einbeziehen sowie Simulations- und GI-Science-Methoden integrieren, um genaue Vorhersagen zukünftigen Geschehens dynamischer Raumphänomene zu ermöglichen. Am Beispiel verkehrsthematischer Fragestellungen werden sowohl kurzfristige Fragen als auch langfristige Zukunftsszenarien im Raum untersucht.

Für die Beschreibung dynamischer Systemstrukturen wird ein verteiltes, komponenten- und serviceorientiertes Modell entwickelt, das in der Datenhaltungsschicht, die sowohl relationale als auch objektorientierte Datenbanken integriert, räumliche und zeitliche Aspekte implementiert. Weiterführend werden dynamische Raumdaten mit lose gekoppelten simulations- und geoinformationsspezifischen Operatoren aufbereitet und in einer adäquaten Weise visualisiert.

Ziel ist es, ein halb-mobiles Netz in einer serviceorientierten Architektur beispielhaft sowohl für Standardlösungen als auch für Individualentwicklungen zu konzipieren, das flexibel im Rahmen unterschiedlicher Anwendungen auf entfernte Funktionen zugreifen und anhand ausgereifter Visualisierungsmethoden Prozesse zügig und echtzeitnah gestalten und anpassen kann.

### **4.1 Modellierung dynamischer Strukturen in einer prozessorientierten Architektur**

Das für die folgende Anwendung gewählte Architekturmuster ist prozessorientiert im Gegensatz zu einer anwendungsorientierten Client-Server-Architektur, die den Grundaufbau hierarchisch konzipiert und das System in Schichten (Komponenten einer Schicht können nur auf die darunter liegende Schicht zugreifen) zerlegt. Der Ausgangspunkt einer serviceorientierten Architektur sind die fachlich beschriebenen Dienste/Services mit einer Menge von Funktionalitäten, die zu komplexen Services (composite services) bzw. Prozessen in verteilten Systemen mit getrennten Verantwortlichkeiten kombiniert werden können [Gr06].

Für das folgende Modell zur Darstellung dynamischer Raumphänomene wird eine serviceorientierte Architektur konzipiert, die gegenüber konventioneller objektorientierter Middleware (z. B. CORBA, Java RMI) keinen individuellen Aufbau mit immer wieder neu anzupassenden Komponentenschnittstellen zur Integrationsplattform verlangt [Ri05].

Serviceorientierte Architekturen (SOA) koppeln Dienste und Komponenten lose über einen Enterprise Service Bus (Datenaustausch in Form von Service-Aufrufen). Diese fachspezifische

---

Sicht auf Komponenten verbirgt alle Implementationsdetails, die plattformunabhängig über einheitliche Aufrufmechanismen die Dienste miteinander verbindet [Ha03].

Das Entwurfsprinzip der Kapselung von Implementationsdetails hinter definierten Schnittstellen sowie die Trennung der Zuständigkeit aus Anwendersicht und die Wiederverwendung bestehender Komponenten (durch lose Kopplung Zu- und Wegschalten einzelner Komponenten möglich) soll die Komplexität reduzieren. Ein weiterer Grund für die gewählte Architektur ist die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit für netzgegründetes verteiltes Rechnen auch schon bei kleineren Anwendungen in einer nahen Echtzeitumgebung.

Eine serviceorientierte Architektur mit räumlichen Komponenten über standardisierte Protokolle kann Inhalte und Funktionen mehrerer Prozesse verknüpfen, um Dienste verschiedener Clients zur Verfügung zu stellen, um Prozessmodelle zu koppeln oder um spezifische Anwendungen zu implementieren. Angebunden an eine Integrationsplattform können Dienste mit anderen Diensten kombiniert werden.

Die Ebenenstruktur eines Geoinformationssystems, der modulare Aufbau, lässt sich in eine serviceorientierte Architektur effizient integrieren. Bisher werden in Kartendiensten raumbezogene Daten gekapselt über einen Server zu Verfügung gestellt. Eine zweite Variante ist, dass mittels SOA-Diensten Funktionalitäten (Adresssuchdienste etc.) bereitgestellt werden.

Dynamische Prozessdaten können in einem serverorientierten Konzept durch die Bereitstellung von Simulations- und Geoinformationsoperationen analysiert, visualisiert und in Datenbanken mit temporalen Funktionen archiviert werden. Die Aufteilung der Anwendungen in Komponenten gestattet ein verteiltes Datenprocessing.

Folgend wird ein Lösungsansatz vorgestellt, der sowohl den dynamischen als auch den räumlichen Aspekt anhand verkehrlicher Problematiken integriert. Zielvorstellungen in der Stadt- und Verkehrsentwicklungsplanung sind bestmögliche Raum-Verkehrssysteme, die nicht nur sektorale Optimierungen betrachten, sondern Gesamtbewertungen anstreben, die langfristig sowohl die Funktionalität im Verkehr als auch die Umwelt- und Stadtverträglichkeit sichern. Grundlage eines Verkehrssystems ist die räumliche Verteilung verschiedener Nutzungen (Wohnen, Gewerbe, Einzelhandel) und deren Verbindungen, die Infrastruktur.

Das System unterliegt ständigen Veränderungen, so dass Diskrepanzen zwischen schneller Anpassung der Mobilität und des zu planenden sowie zu realisierenden Infrastrukturausbaus für einen störungsfreien Verkehrsablauf entstehen. Das Spannungsverhältnis zwischen Nutzungsänderungen (Suburbanisierung, Außenwanderung von Gewerbe und Einzelhandel), Verkehrsauswirkungen (Pendeln) und -belastungen (ÖPNV-Auslastung, stärkerer Individualverkehr, höhere Emissionen) führen zu unablässigen Modifizierungen und Neukonzeptionen in der Verkehrsplanung.

Um auf die Ad-hoc-Verfügbarkeit des flexiblen Verkehrs mit Hilfe zuverlässiger Verkehrssimulationen und -prognosen reagieren zu können, werden zunächst dynamische Belastungsdaten erfasst, die nach Bemessungsgrundlagen von Straßenverkehrsanlagen ausgewertet und anschließend in simulierende Prozesse integriert werden. Für ein funktionierendes Raumstruktur-Verkehrssystem sind gerade kurzfristige Engpassbeseitigungen und Verkehrsverlagerungen alltäglich, die qualitative und schnelle Verkehrsstrategien erfordern. Folgend werden für raumanalytische Planungsstrategien telematische Lösungsansätze der dynamischen Verkehrserfassung und -information konzipiert.

#### 4.1.1 Szenario des Prozesses „Verkehrsbeeinflussung“

Der in diesem Abschnitt vorgestellte Prozess soll beispielhaft für den erzielbaren Einsatz von dynamischen und räumlichen Komponenten sein, so dass es möglich ist, das Modell auf weitere Thematiken anzuwenden. Das Beispiel „Verkehrsbeeinflussung“ dient der Lenkung und Steuerung des Verkehrs, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen und den Verkehrsfluss zu verbessern und damit auch die Umweltbelastung zu senken. Beeinflusst werden kann punktuell, linear oder netzförmig.

##### **Szenario Netzbeeinflussung:**

Den Verkehrsablauf auf überregionaler Ebene zu beeinflussen, um die Kapazität von Verkehrswegen oder Verkehrsanlagen in z. B. Metropolregionen zu steigern, bedeutet u. a., den Verkehr über Alternativrouten im Netz zu verteilen. Zu den Hauptregularien gehören die adaptive Lichtsignalnetzsteuerung und die Wegweisung (Wechselwegweisung, Umleitungen). Lichtsignalanlagen können heute dynamisch nach Verkehrsmengen durch eine optimale Länge der Grün- und Rotphasen am jeweiligen Knotenpunkt zentral oder dezentral gesteuert werden. Die adaptive Steuerung eines Netzes, in dem die Lichtsignalanlagen verkehrabhängig miteinander koordiniert werden, wird über eine Verkehrsrechnerzentrale gelenkt. Die Verkehrsrechnerzentrale ist auch in der Lage, dynamische Informationssysteme, wie z. B. Wechselverkehrszeichen oder Infotafeln entlang der Hauptachsen einer Metropole, zu steuern, um damit den Verkehr entsprechend zu leiten.

##### **Szenario Streckenbeeinflussung:**

Die temporäre Streckenbeeinflussung wird auf örtlich begrenzte Streckenabschnitte für den Umleitungsverkehr während z. B. verschiedener Bauphasen angewandt, um den eingeschränkten Verkehrsfluss aufrechtzuerhalten und insbesondere abzusichern. Zur Steigerung der Verkehrssicherheit und der Leistungsfähigkeit auf staugefährdeten Strecken werden präventiv die auf einem Abschnitt bezogene Geschwindigkeitsreduzierung, Fahrsteifen- und Warnhinweisinformationen über verkehrsregelnde Anzeigen (Wechselverkehrszeichen) situationsabhängig gesteuert.

##### **Szenario Punktbeeinflussung:**

Punktuelle verkehrsbeeinflussende Maßnahmen werden an Gefahrenstellen (z. B. Lotsen an Übergängen der Schulwege, vereiste Brücken) und bei lokalen Ereignissen (Unfälle) eingesetzt. Im Baustellenmanagement werden auch punktuell und zeitlich begrenzte Maßnahmen, wie z. B. die Benutzung des Standstreifen oder Radfahrwege, angeordnet.

Notwendiger Bestandteil jeglicher Verkehrslageberichte, -prognosen und daraus resultierender Verkehrsbeeinflussungen ist die Datenerfassung zur Abbildung des Verkehrsgeschehens. Verkehrsdaten des ruhenden und fließenden Verkehrs, wie z. B. Lichtsignalanlagen-Schaltzustände, Kfz-Stärken, Fahrgeschwindigkeiten, Baustellen, Parkauslastungen und Daten des Umfeldes bzw. der Nachbarregionen, werden aus unterschiedlichen Quellen generiert. Daten des Kfz-Aufkommens werden mittels Induktionsschleifen, IR-/Radardetektoren, Videobilder oder über Floating Car<sup>60</sup> erfasst. Eine Problematik der Verkehrsdatenerfassung ist die fehlende Dichte, um die Daten flächendeckend zu erhalten. Ein weiterer Aspekt ist die punktuelle oder teils lineare Aufnahme, die ein gesamtes Netz nicht ausreichend repräsentiert und zudem in untergeordneten Straßen oftmals ganz und gar fehlt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird ein Netz angestrebt, welches Daten (zeitlich variable Größen) mobil erfasst, diese in Zusammenhang mit räumlich orientierten Informationen wertet und in verkehrstechnische Abläufe integriert.

<sup>60</sup> *Floating Car Data (FCD) – Telematik-Technik, bei der Fahrzeuge als mobile Sensoren den Verkehrszustand (Fahrgeschwindigkeit, dynamische Zielführung) per Mobilfunk an die Leitzentrale übermitteln.*

### 4.1.2 Systemanforderungen

Das im Folgenden beschriebene Modell der Verkehrserfassung baut auf einzelnen Diensten auf, die je nach Fragestellung unterschiedliche Anforderungen (aktuelle, prognostizierte) an die Systemarchitektur stellen. Alle grundlegenden Modelldefinitionen werden auf der Basis der Service Component Architecture (SCA<sup>61</sup>) und dem Service Data Object aufgebaut, um so einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit und Vereinheitlichung von Strukturen zu erreichen.

#### **Datenerfassungsmodul:**

Die Videobilderfassung hat gegenüber den genannten punktuellen Methoden den Vorteil, dass sie sowohl Nah- als auch Fernbereiche aufnehmen kann und dass sie, sofern sie in ein Netz integriert ist, durch Überlappungen flächenhafte Aufnahmen ermöglicht. Durch die bisher wenigen Standorte (z. B. Brücken) sind Anforderungen wie Netzintegration und Ortsunabhängigkeit, d. h. mobil in dem Sinne, dass sie zwar für die Aufnahmezeit feste Standorte haben, jedoch nicht an diesen Standort gebunden sein müssen, bindend. Innerhalb des Datenerfassungsmoduls (SCA-Composite) können Komponenten aus verschiedenen Datenerfassungssystemen integriert werden.

#### **Service / Dienste:**

Die Schnittstellen zwischen den Erfassungspunkten sollen Standardschnittstellen und -formate sein, die von der Implementierung getrennt sind, um weitere Dienste integrieren zu können sowie eine Wiederverwendung, niedrigere Ressourcenaufwände und eine höhere Wandlungsfähigkeit zu erzielen. Die Dienste sind lose gekoppelt und sollen unabhängig voneinander agieren können. Fähigkeiten zur Funktionsübermittlung sowie Minimierung der Datenübertragung sind weitere Merkmale, die das System berücksichtigen soll. Dazu werden verschiedene Provider integriert. Die Messdaten werden über einen Service-Bus contentbasiert (inhaltbezogen) verteilt. Über den Service-Bus können beliebige SCA-fähige Anwendungen (Verkehrs-, GIS-Modul etc.) miteinander kommunizieren und Nachrichten an autorisierte Benutzer über verschiedene Service Provider versenden.

#### **Geoinformationsmodul:**

Um das Geoinformationssystem servicefähig zu machen, sollen Funktionalitäten und Zugriffe in eine serviceorientierte Architektur integriert werden. Interface-Beschreibungen und Datenschemata werden in Repositories (Verzeichnisse mit Meta-Informationen) geführt, um z. B. Basisdienste, die direkt auf GIS-Funktionalitäten (Lesen und Schreiben von Daten) zugreifen, wieder verwenden zu können. Aufsetzende Enterprise-Services bauen auf diese Basisdienste auf und können über eine XML-Struktur die GIS-Funktionalitäten spezifizieren, die über den Service zur Verfügung gestellt und im entsprechenden Design methodisch visualisiert werden. Dabei sind sowohl bewährte als auch neu zu konzipierende Darstellungsmethoden anzuwenden.

#### **Verkehrsmodul:**

Mit Hilfe des verkehrstechnischen Auswertmoduls werden die erfassten Daten analysiert, dokumentiert und für die Prozessintegration optimiert. Die verkehrstechnischen Bemessungen erfolgen auf der Grundlage aktueller Regelwerke. So soll eine einheitliche Form der Zusammenhänge zwischen der Verkehrsbelastung und der Qualität des Verkehrsablaufes gewährleistet werden. Angewendet werden standardisierte Verfahren und Methoden, um die Kapazität (max. Verkehrsstärke) und die Leistungsfähigkeit von Verkehrsströmen sowie deren mögliche Beeinflussung verfolgen und bewerten zu können.

<sup>61</sup> SCA Definition „Ein hersteller-, technologie- und sprachneutrales Modell zur Erstellung von Softwaresystemen durch die Komposition und dem Deployment von neuen und bestehenden Servicekomponenten.“ <http://www.planet-soa.com/sca/index.html>

**Server:**

Angestrebt ist eine Trennung von Prozess und Service, so dass Abläufe flexibel aus den einzelnen Services zusammengestellt werden können. Die Integration einzelner Prozesse befähigt zum Herauslesen von Informationen aus dem Geoinformationssystem und aus dem Bewertungsdatenmodul zum Senden relevanter Daten, die einen Prozess anstoßen sollen. Der Prozess-Server, der die Integration abbildet, arbeitet eng mit dem Enterprise Service Bus (ESB) zusammen. Der Web-Applikationsserver hat die Aufgabe, den Client auf sich aufmerksam zu machen, um schnelle Übermittlung relevanter Daten zu gewährleisten sowie die Verwaltung aller Dienste zu überwachen.

Die Beschreibung der Hardware, der IP-Verbindungen, Netzstrukturen und Provider sowie eingehende Erläuterungen der Werkzeuge und Tools für die Anwendungsentwicklung sind nicht Teil dieser Arbeit. Es werden Open-Source-Programme verwendet wie der Web Application Server Apache Tomcat und die Web-Service-Werkzeuge Axis, die den Aufbau einer SOA für diese Beispielanwendung ermöglichen.

**4.1.3 Systemmodellierung/Architekturstil SOA/SCA**

Im folgenden Abschnitt wird das Konzept der Systemarchitektur für die Abbildung dynamischer Raumphänomene an einem verkehrsthematischen Beispiel formuliert.

Es wird ein verteiltes, komponenten- und serviceorientiertes Modell beschrieben, das nebenläufige, logische Prozesse, die untereinander zeitabhängige Informationen austauschen, simuliert und deren Zustandsänderungen räumlich dargestellt. In einem Assembler-Modell (beschreibt einzelne Modellelemente, Spezifikationen und deren Zusammensetzung für bestimmte Anwendungsfälle) werden Simulationskomponenten, GIS-Funktionspakete und Visualisierungskomponenten über Client & Implementation-Modelle (für jede Programmiersprache) implementiert. Die Definition der Kompositionen und die Publikation wird über das Binding (z. B. Java Messaging Service, Webservice) Model extrahiert. Das Policy Framework wacht über die Qualität der Services, der Transaktionen und über die Konstruktion der Komponenten und deren Implementierung zur Sicherung der Spezifikationen [OA08].

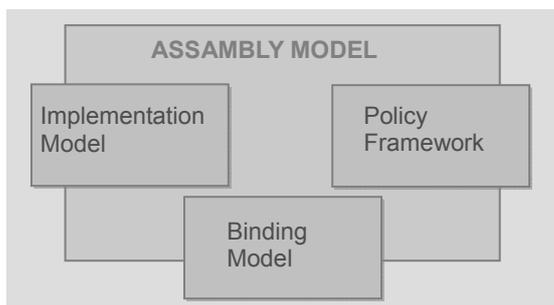


Abb. 3: CA-Spezifikation, Quelle: Logica

Das Konzept beruht auf einer Menge voneinander unabhängiger, lose gekoppelter Dienste und Funktionalitäten. Einzelne Anwendungen werden über standardisierte Schnittstellen in unterschiedliche Services (Dienstleistungen) aufgeteilt und implementiert. Durch die Kapselung persistenter Daten mittels Diensten, die Lese- und Schreibrechte besitzen, können räumliche und temporale (Zeitstempel) Daten komponentenbasiert gespeichert werden. Ein Netzwerk von agierenden Softwareeinheiten dient der räumlichen Positionsbestimmung und der Datenerfassung, die über Service Data Object (SDO) sprachen- und plattformunabhängig miteinander kommunizieren (Data-Transfer). Die SDO-Spezifikation beschreibt die Struktur sowie deren Erzeugung, Abfrage und Veränderung, die in ein XML-Dokument gewandelt und extrahiert wird, das somit Datentypen in C++, Java oder auch PHP abbilden kann. Bedeutend für den temporalen Ansatz ist, dass eine Data-Factory für eine Objekterzeugung oder Abfrage vorhandener Objekte genutzt und jegliche Veränderungen über eine Change History (einfache Erstellung von Änderungslisten) erfasst werden kann. Kernkonzepte von SDO sind außerdem Metadaten, die Daten beschreiben, Datentypen, die statisch als auch dynamisch sein können, Datenobjekte, Datengraphen, die Datenobjekte zu komplexen Strukturen erweitern.

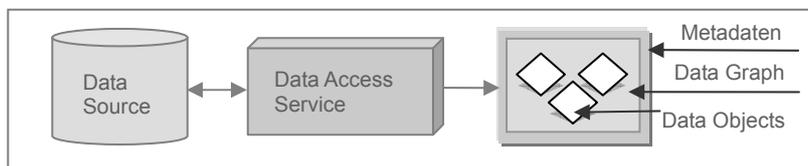


Abb. 4: SDO-Datenmodell, Quelle: InfoWeek

Die Integration von solchen agierenden Netzen und die Verwaltung heterogener Daten wird im Open-Source-GIS-Bereich mit postgres/PostGIS realisiert. Die Implementierung erfolgt mit dem nicht kommerziellen Apache Tuscany oder JBoss. Die Bausteine bilden die einzelnen lose gekoppelten Komponenten, wie serverbasierte GIS-Technologien, Verkehrstelematische Technologien (z. B. nach den Berechnungsverfahren für Straßenverkehrsanlagen), Datenerfassungs- und Positionssysteme. Damit die Dienste im Einklang mit der Prozessmodellierung stehen, sorgt der Enterprise Service Bus (ESB) für die Nachrichtenverteilung und der Service Orchestration Engine (SOE) für die Ablaufsteuerung. Relevante Daten werden in Form einer Nachricht an den ESB gesendet, damit der Provider die benötigten Analysefunktionen aufrufen und deren Ergebnisse in einem Applikationsserver bereitstellen kann. Verteilte Anwender sind somit in der Lage, angepasste Lösungen für Planungsmaßnahmen aus den Diensten heraus zu nutzen.

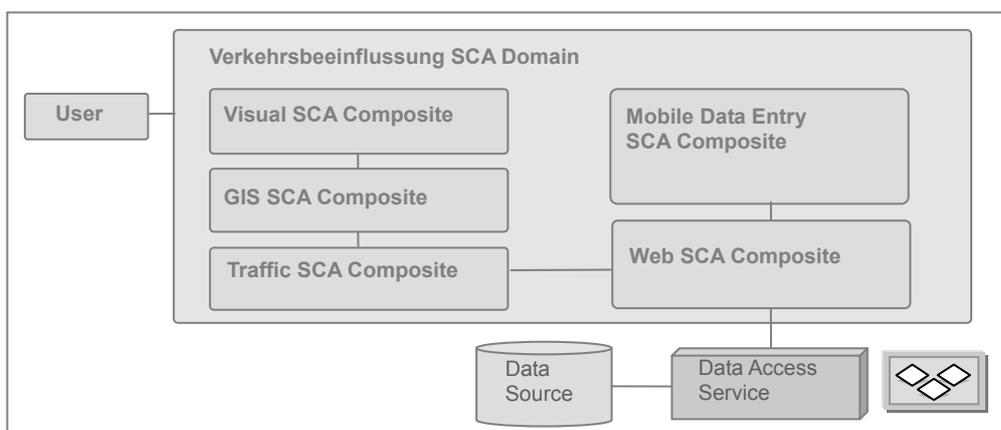


Abb. 5: Struktur der Domain Verkehrsbeeinflussung

Für die Beschreibung der Komponenten wird die Spezifikation Service Component Architecture basierend auf der serviceorientierten Architektur angewendet. Ein SCA-System besteht aus Modulkomponenten, möglichen Einstiegspunkten, externen Diensten und den dazugehörigen Verbindungen [BE08]. Das System beinhaltet eine Menge von Diensten, die lose miteinander gekoppelt sind und sich in Teilsysteme untergliedern kann. Das Teilsystem kann verschiedene Funktionalitäten kapseln und ähnliche Funktionalitäten in Module über die Konfiguration von Modulkomponenten bereitstellen.

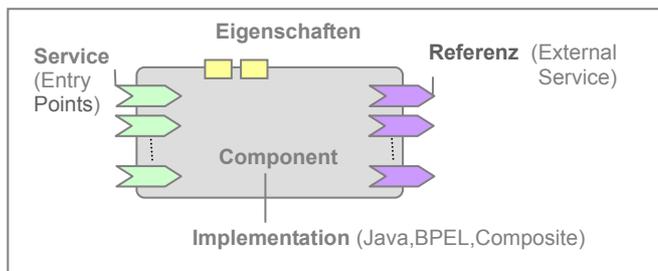


Abb. 6: Modellelement SCA Component Diagramm, Quelle: OSOA

*Einstiegspunkte (Entry Points)* ermöglichen Diensten, sich nach außen zur Verfügung zu stellen. Die Namen müssen einmalig sein, das heißt, es darf keine Namensübereinstimmung zwischen Teilsystemen und Modulkomponenten geben.

*Externe Dienste (External Services)* können Dienste außerhalb des SCA-Systems mit sogenannten Bindings einbinden und innerhalb des Systems nutzen.

*Verbindungen (Wires)* können durch Einstiegspunkte Dienste außerhalb des SCA-Systems mit sogenannten Bindings einbinden und nutzen. Dabei können kompatible Quellen und Ziele aus verschiedenen Teilsystemen verbunden werden.

*Anbindungen (Bindings)* werden von externen Diensten und Einstiegspunkten genutzt, die den Zugang zum Service beschreiben, d. h., wie der externe Dienst aufzurufen ist. Damit Module untereinander interagieren können, wird der SCA *Service Binding Type* eingesetzt, der unabhängig von der Komponente konfiguriert ist und durch diese Trennung verschiedene Zustandsmöglichkeiten erlaubt. Der Web service binding type ermöglicht die Anbindung der Dienste außerhalb des Systems.

*Modulkomponenten (Module Component)* setzen sich aus Einstiegspunkten, externen Diensten und Modulen zusammen. Sie führen die referenzierten Module aus. Da sie über Einstiegspunkte einen Dienst zur Verfügung stellen, sind es Module innerhalb eines Teilsystems.

*Service Data Objects (SDO)* spezifiziert einen API<sup>62</sup> dynamisch und statisch. Der einheitliche Datenzugriff auf verschiedene heterogene Quellen, wie .z. B. XML, EJB, ist ideal für die Datenabstraktion in einer serviceorientierten Architektur. Eines seiner Kriterien, Änderungshistorien (Übersicht der hinzugefügten, gelöschten und aktualisierte Datenobjekte) für Datenänderungen anzulegen, ist für den zeitlichen Aspekt dieser Arbeit relevant. Über einen Data Mediator Service (DMS) können mit speziellen Werkzeugen Daten gelesen und aktualisiert werden. Eine Datenzuordnung zu den jeweiligen Komponenten sowie ein Datenaustausch zwischen den Komponenten erfolgt durch das Erstellen abgekoppelter Datengraphen, die Datenobjekte und Metadaten (s. Abb. 4). Die Datenobjekte unterstützen den dynamischen Zugriff über XPath und den statischen Zugriff [BE08].

<sup>62</sup> API Application Programming Interface. Das API stellt Routinen und Dienste bereit, die von anderen Programmen genutzt werden können.

#### 4.1.4 Konzeption der Module (Composite, Component)

##### Modul Verkehrsdatenerhebung

Das Verkehrsdatenmodul (Traffic.Snapshotmodul) verfügt über einen *Entry Point Snapshot Service*, der den Dienst nach außen zur Verfügung stellt. Die eng miteinander verbundene *Snapshot Service Component* enthält die Logik des Moduls und stellt die Implementierung bereit. Sie ermöglicht, die aufgenommenen Bilder inklusive Zeitstempel und Koordinaten zur Verfügung zu stellen, die durch den data service component abgerufen werden. Zusätzlich werden die externen Dienste, *External Type Vehicle Service* und *External Licence Plate Number Service* eingebunden. Der erste eingebundene Dienst wertet das Bild aus und klassifiziert es nach Fahrzeugarten, während der zweite Dienst das Kennzeichen erkennt und über einen *traffic.webclientmodul* (Binding) diese Daten an das nächste sich einloggende Verkehrsdatenmodul zur Verfügung stellt. Die Einspeisung analoger oder digitaler Bilddaten wird zusammen mit den klassifizierten Daten, Koordinaten und Zeitattributen gespeichert, und es können z. B. mit Hilfe eines Videomoduls Videoszenen zusammengesetzt werden. Mit dieser Erweiterung kann das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept, das das Unfallgeschehen aufnimmt, analysiert und räumlich abbildet, auch für Unfallschwerpunkte angewendet werden.

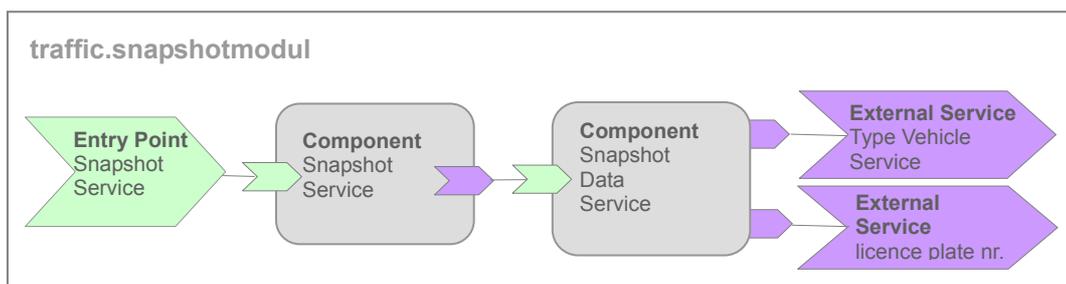


Abb. 7: Datenmodell Verkehrsdatenerhebung Videoaufnahme

Das Verkehrsdatenmodul dient als Grundlage für eine Vernetzung von Zählstellen, die die gleichen Module implementieren und damit separat Prozesse anstoßen können, die vernetzt fungieren. Zudem können verschiedene Datenerhebungssysteme und deren Service-Komponenten deployed werden, d. h. in einem Composite (Verbund: Mobile Data Entry SCA Composite) zusammengestellt und entsprechend der Laufzeitumgebung konfiguriert werden.

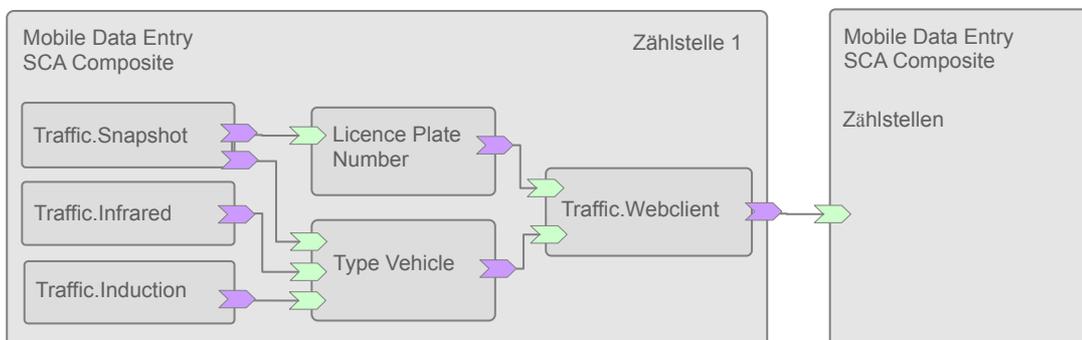


Abb. 8: Struktur Composite Mobile Datenerfassung

### Modul Fahrzeugarten (Type Vehicle)

Das Modul Fahrzeugarten (Traffic.Typevehiclemodul) verfügt über einen *Entry Point Type Vehicle Service*, eine *Type Vehicle Service Component*, die eine Bilderkennung nach Fahrzeugtypen beinhaltet und diese über die *Data Service Component* startet. In diesem Modul wird das Verkehrsmengengerüst für Verkehrsprognosen modelliert. Zur Abbildung des Pkw- und Lkw-Verkehrs werden Fahrzeugtypen nach Größe und Gewicht unterschieden und über den externen Dienst an das Traffic.Snapshotmodul mit beibehaltenem Zeitstempel und Koordinaten wieder übergeben. Die klassifizierten Daten werden zum einem über den Data Access Service in einer Datenbank abgespeichert und für weitere Berechnungsverfahren und Prognosedaten zur Verfügung gestellt und gleichzeitig zusammen mit den Kennzeichendaten an die nächstliegende Zählstelle gesendet.

### Modul Kennzeichen (Licence Plate Number)

Das Kennzeichenerfassungsmodul wird über den *Entry Point Licence Plate Number Service*, die *Licence Plate Number Service Component* und die *Data Service Component* aktiviert. In dieser Komponente wird eine optische Zeichenerkennung (OCR<sup>63</sup>) durchgeführt, die einzelne Zeichen extrahiert, in einen Klassifikationsbaum zur Strukturerkennung einbindet und dies als standardisiertes Format (ASCII, XML) abspeichert. Die Identifikation von Fahrzeugen anhand der Fahrzeugkennzeichen ermöglicht, schwierige Aufgaben wie die Erhebung des Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr innerhalb einer Region zu bewältigen.

Die Ergebnisse werden sofort über einen externen Dienst an das Verkehrsdatenmodul (Traffic.Snapshotmodul) der nächstliegenden Zählstelle (Querschnitt oder Knotenpunkt) gesendet und gleichzeitig zentral gespeichert, um zum späteren Zeitpunkt Auswertungen über einen zweiten Dienst, das Verkehrsbelastungsmodul (Traffic.Loadmodul), vorzunehmen. So können die Anzahl der Fahrbewegungen zwischen den Zählstellen, die Anzahl der Fahrbewegungen nach regionaler Herkunft und die Anzahl der Fahrbewegungen nach Fahrzeugart durch das Einbinden des externen Dienstes Traffic.Typevehiclemodul ermittelt werden. Neben den Einzelauswertungen können einzelne Verkehrsbeziehungen der Fahrzeuge zwischen den verschiedenen Erfassungspunkten quantifiziert werden.

### Modul Verkehrsbelastung

Das Verkehrsbelastungsmodul (Traffic.Loadmodul) verfügt über Methoden und standardisierte Verfahren, um den Verkehrsfluss zu bewerten. Es wird ebenfalls über einen *Entry Point Load Service*, die *Load Service Component* und die *Data Service Component* das Modul aktiviert. Neben den Verkehrsbeziehungen können prozentuale Verteilungen identifiziert werden, Fahrtrouten und -muster erkannt und mit Hilfe externer Dienste, *External Gispoint Service* und *External Gisline Service*, auf ein räumliches Netz georeferenziert werden. Ein weiterer Warndienst *External Safety Service* meldet beim Überprüfen der Belastungsdaten die Grenzwerte an den Client, der sich über das Traffic.Webclientmodul in das System entsprechend der jeweiligen Zugriffsrechte einloggen kann. Über einen weiteren Dienst *External Forecast Simulation* können Verkehrsprognosen (punktuell oder netzartig) gestartet werden.

<sup>63</sup> OCR Optical Character Recognition z. B. OCR- Engine Tesseract wird unter der Apache-Lizenz 2.0 veröffentlicht, von Hewlett Packard Laboratories 1985 entwickelte Technologie, deren Quellen 2005 unter Open-Source-Lizenz gestellt wurden, <http://sourceforge.net/projects/tesseract-ocr/>

## Modul Prognosesimulation forecast simulation

Das Modul Prognosesimulation (Traffic. Forecast Simulation Modul) verfügt über einen *Entry Point Forecast Simulation Service*, eine *Forecast Simulation Service Component*, die entsprechend der gegebenen oder geplanten Einflussgrößen wie Linienführung, Querschnitt, Fahrzeugartenanteil, Geschwindigkeitsregulierungen, Streckenparameter (Streifigkeit, Kapazität, Streckentyp), Typen von Verflechtungsstrecken, Beurteilungen der Qualitäten etc. Zustände simulieren und diese über die *Data Service Component* starten.

Mit Hilfe eingebundener Dienste, die neben der dynamischen Komponente auch die räumliche Komponente bedienen, wie *External Gispoint Service*, *External Gisline Service* oder *External Gisareal Service*, können die Ergebnisse über einen *External .Rendering Service* in einem Netzmodell visualisiert werden und in Beziehung zu weiteren Regionen (Verkehrsbezirke und deren Anbindungen) gesetzt werden. Weitere Dienste, die spezielle räumliche Analysealgorithmen verwenden, können bedarfsweise angekoppelt werden.

## GIS-Modul Punktdaten

Das GIS-Modul Punktdaten (Gis.Gispointmodul) funktioniert über einen *Entry Gispoint Service*, die *Gispoint Component* und die *Data Service Component*. In diesem Modul werden die Geometrie und die Lage eines Datenobjektes in Form eines Punktes beschrieben und topologisch verknüpft. Sie besitzen eine Y-Koordinate, eine X-Koordinate und eine H-Koordinate, die sich auf ein Bezugssystem und eine Metrik beziehen. Die Punktgeometrie bildet die Basis, auf der weitere punkt- und linienartige Datenobjekte aufbauen. Durch diese Referenzierung werden redundante bzw. inkonsistente Datenbestände vermieden. Symbole, die auf punktförmigen Datenobjekten aufbauen, können auch mehrere Punktobjekte beinhalten. Diese werden dann über den Mittelpunkt referenziert, wobei auch eine Punktreferenz und eine Richtungsreferenz existieren können. Auf die verschiedenen Zugriffsmethoden ('on-the-fly' Integration) räumlicher Daten und Zuordnungsstrategien für die geometrische Integration und Harmonisierung heterogener Datenobjekte wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen (siehe dazu "Integration heterogener raumbezogener Objekte aus fragmentierten Geodatenbeständen" von Stefan Kampshoff 2005).

## GIS-Modul Linien-/Bögen-/Polygondaten

Das GIS-Modul Liniendaten (Gis.Gislinemodul) funktioniert über einen *Entry Gisline Service*, die *Gisline Component* und die *Data Service Component*. Das Linienmodul stützt sich auf die Punktobjekte des GIS-Moduls Punktdaten (Gis.Gispointmodul) und wird über den externen Dienst *External Gisline Service* eingebunden. Es kann in seiner geometrischen Beschreibung sowohl eine Linie, ein Bogen (ein Anfangs- und Endpunkt und ein dritter Punkt zur Abrundung) oder ein Polygon sein. Die topologische Verknüpfung von z. B. Verkehrslinien wird mit Hilfe der Referenzierung dieses Moduls auf den Raum abgebildet und ermöglicht weitere Analysen zu den in Beziehung stehenden Datenobjekten.

## GIS-Modul Flächendaten

Das GIS-Modul Flächendaten (Gis.Gisareamodul) funktioniert über einen *Entry Gisarea Service*, die *Gisarea Component* und die *Data Service Component*. Das Flächenmodul stützt sich auf die Punktobjekte des GIS-Moduls Punktdaten (Gis.Gispointmodul) und auf die Linienobjekte des GIS-Moduls Liniendaten (Gis.Gislinemodul). Über den externen Dienst *External Gisline Service* und *External Gisarea Service* werden diese zur Verfügung gestellt. Es bildet mit seinen geschlossenen Polygonen die Grundlage für Flächenanalysemethoden wie die Flächenverschneidung und kann durch den externen Dienst mit weiteren Modulen verknüpft werden.

### Analysemodul Netzanalyse

Mathematische Methoden und Algorithmen werden in Analysemodulen zusammengefügt und können lose miteinander auch nacheinander mit den GIS- und Simulationsmodulen gekoppelt werden. Analysemodule können eine Reihe von Analysemethoden (z. B. selektive Abfragen nach räumlichen, zeitlichen und thematischen Aspekten, Koordinatentransformation, Punkt-im-Polygon-Methode, Interpolation etc.) konzipiert werden.

Das Netzanalysemodell (Analysis. Analysis Networkmodul) verfügt über einen *Entry Point Analysisnetwork Service*, der den Dienst nach außen zur Verfügung stellt. Die eng miteinander verbundene *Analysisnetwork Service Component* und die *Data Service Component* implementieren topologische Parameter, Längen, Richtungen, Eckpunkte, Winkel sowie verkehrsrelevante Parameter wie die Ermittlung der natürlichen Fahrtrichtung, Beeinflussung durch Fußgängerzonen, verkehrsberuhigte Bereiche, Klassifizierung nach Straßentypen etc. Durch eine Kombination der externen Dienste können auch Analysemodule ineinander greifen, die je nach Fragestellung gekoppelt werden. So können Knotenpunkte definiert werden, die z. B. Unfallschwerpunkte bilden und auf dem Netz visualisiert werden, oder bei Staugefahr die möglichen Verdrängungstrecken über z. B. Floating Car Daten analysieren.

### Visualisierungsmodul

Das Visualisierungsmodul (Design.Renderingmodul) verfügt über Darstellungsmethoden und graphische Gestaltungsmittel, die von einfachen Verkehrsstrommatrizen über Strombelastungspläne einzelner oder mehrerer Knoten bis hin zu kartographischen Modellen für den Ziel-, Quell- und Durchgangsverkehr reichen. Das Visualisierungsmodul funktioniert über einen *Entry Rendering Service*, die *Rendering Component* und die *Data Service Component*. Nicht geometrische, sondern graphische Objekteigenschaften wie Linienart, Füllart, Symbolart, Farbe, Helligkeit etc. werden nach Grafikstandards implementiert. Extern können Animationsmodule eingebunden werden, die sowohl echtzeitnah Simulationsnetze durch das Verwenden gleicher Polygon-Netze oder Multiresolution-Netze generieren, d. h. Objekte sowohl in mehreren Auflösungsstufen, Bezierkurven u. a. Funktionen als auch Diagramme etc. animiert darstellen. Grundlage bildet das Einbinden räumlicher Funktionen der Module *gis.gispointmodul*, *gis.gislinemodul* und *gis.gisarealmodul* sowie weiterer möglicher Analysemodule. Zugriff für den Client wird über das Modul Internetanbindung (*Traffic.Webclientmodul*) ermöglicht.

#### 4.1.5 Integration der Module ins System

Aufgrund der Entkoppelung einzelner Funktionen in Modulkomponenten ist es möglich, die Raumkomponente und die Zeitkomponente flexibel miteinander zu koppeln. Die in Abschnitt 2 beschriebene Layerstruktur der Raumdaten in Geoinformationssystemen begünstigt die Wiederverwendbarkeit einzelner Module. Alle Punktdaten werden separat über das GIS-Modul Punktgeodaten erfasst und referenziert. Diese können dann über das Analysemodul ausgewertet und im Visualisierungsmodul abgebildet bzw. graphisch bearbeitet werden. Die gleiche Verfahrensweise kann auf das Modul Liniendaten und das Modul Flächendaten angewendet werden. Für einen transparenten Modulaufbau können Teilsysteme mit thematisch ähnlichen Modulkomponenten zusammengefügt und in verschiedene Dienste integriert werden. Dieses Baukastenprinzip erlaubt es auch, Module wieder zu entkoppeln, zu modifizieren und schließlich wieder in andere Dienste einzubinden. Der dynamische Zugriff über SDO erlaubt sowohl in der Bemessung als auch in der Visualisierung, die Zustände kontinuierlich und diskret aufzunehmen, abzuspeichern und abzubilden. Die Visualisierung kann je nach Wunsch modifiziert und angepasst werden. Dazu werden folgend Methoden entwickelt.

## 4.2 Visualisierungsansätze zur Modellierung dynamischer Raumphänomene

Dynamische Vorgänge und Zustände modellhaft zu visualisieren, erfordert Methoden, die Prozesse und Zusammenhänge in einer räumlichen und zeitlichen Auflösung darstellen. Visualisierung ist das Umwandeln, die Darstellung und Kommunikation symbolischer oder numerischer Informationen in visuelle Informationen wie Bilder, Graphiken und kartographische Abbildungen sowie die visuelle Wahrnehmung und Vorstellung [ME08].

Geovisualisierung verbindet Methoden der visuellen Präsentation zeitlich unbeständiger, abstrakter Datenmengen [Ge07] mit der geometrischen Abbildung räumlicher Daten. Die Visualisierung dynamischer Raumphänomene ist nicht nur eine Abbildung räumlicher Veränderungen und Problematiken. Sie bietet die Möglichkeit, Bemessungsdaten und Prognoseergebnisse modellhaft zu simulieren, d. h., sie impliziert innerhalb eines Raumbezuges Interpretationen sich kontinuierlich oder diskret verändernder Primärdaten.

Dynamische Raumdaten visuell zu modellieren, erfordert gut konzipierte Darstellungstechniken, die sowohl elementare und komplexe Aussagen als auch die Wahrnehmung von Zustandsänderungen ermöglichen.

Die Verflechtung von Bild, Farbe und Schrift zu einem graphischen Gefüge fußt einerseits auf der traditionellen Semiotik, den kartographischen Darstellungsmethoden (Form, Variable) und andererseits auf dem digitalen Kommunikationsdesign, das die Gestaltungsmethoden und deren Erscheinungsformen in ihren Kommunikationsprozessen beeinflusst. Immaterielle Strukturen ermöglichen, real wirkende Modellabläufe zu prognostizieren sowie empirische Untersuchungen des realen Raumes in einen virtuellen Datenraum zu transformieren, um Inhalte und Informationen in vielfältiger Weise zeitbasierend miteinander zu verflechten.

Die meisten Systeme sind so komplex, dass sich ihre Dynamik nur sehr schwer beschreiben lässt. Sie wird von vielen Faktoren beeinflusst. Chaotisches Verhalten und stochastische Einflüsse verlangen nichtlineare mathematische Modelle, deren Aussagekraft für realistische Systeme jedoch häufig gering ist, weil sie zu ungenaue quantitative Vorhersagen liefern.

Eine Alternative ist die Vorhersage des zukünftigen Verhaltens eines Systems anhand numerischer Auswertungen der Struktur von Daten- oder Zeitreihen, die echtzeitnah aufgezeichnet werden. Die Betrachtungsweise von Prozessen kann über ein vielschichtiges Geflecht räumlich und zeitlich strukturierter Daten zu Handlungsmodellen generiert werden.

Ein Netzwerk aus räumlichen Beziehungen, Verflechtungen und dynamischen Wechselwirkungen [Wi70] erlaubt das Verknüpfen mehrdimensionaler Raum-Zeit-Reihenanalysen, die in verschiedenen Schichten stetige und unstetige Funktionen räumlich abbilden. Die unterschiedlichen Applikationen können über dynamische Framesets zur Verfügung gestellt werden. Animierte Raum-Zeit-Reihen ermöglichen mehrschichtige Darstellungen, die in ihrer Wirkungsweise miteinander verknüpft sind und sich innerhalb eines Zeitlaufes verändern können. So werden Entwicklungsrichtungen, Trends, kontinuierliche oder diskrete Veränderungen visualisiert. Ein weiteres Darstellungsmittel ist das Raum-Zeit-Diagramm. In der Verkehrstechnik (z. B. bei Echtzeitüberwachungen von Bahnstrecken) wird häufig das Zeit-Weg-Diagramm eingesetzt, das die Bewegung der Verkehrsmittel linear über einen fest vorgegebenen Weg mit einer variablen Zeit darstellt. Halte-/Sperrzeiten, Kreuzungen etc. werden während eines Simulationslaufes erkennbar.

Ein konkretes Anwendungsbeispiel zeigt, wie graphische Variablen (Bertin) und Formgruppentypen (Arnberger) für diese Problematik eingesetzt und mit dynamisch visuellen Variablen (MacEachren) kombiniert und entwickelt werden können. Es werden geeignete Visualisierungsmethoden und -techniken erläutert, die speziell für Verkehrsstärken konzipiert wurden, um eine Entscheidungshilfe in kurzer Zeit für Lenkungs- und Planungsaufgaben innerhalb eines Verkehrsbeeinflussungssystems anzubieten.

Grundlage für eine Simulationsgeometrie bilden die in der Geoinformatik bekannten Formparameter Punkt, Linie, Fläche, die indirekt oder direkt die Position im Raum beschreiben und je nach Muster, Begrenzung und zeitlichem Verhalten des Verkehrsaufkommens kontinuierlich (Simulation von Verkehrsflüssen) oder diskret (Simulation von Individuen) die Mobilität und ihre Zustandsänderungen veranschaulichen. Folgend bietet sich der Ansatz nach Hake und Grünreich an, das Verkehrsaufkommen nach Art und Abgrenzung in Diskreta und Kontinua zu klassifizieren.

#### 4.2.1 Methoden diskreter Werte

Objektdateien, die sich räumlich ohne Übergänge [Ge07] in einem Diskretum (festen Zeitabschnitt) klar zu anderen Objekten abgrenzen, weisen keine Übergänge auf. Diskrete Simulationen in der Verkehrstechnik modellieren mikroskopisch den fließenden, ruhenden (parken) und arbeitenden (be- und entladen, halten) Verkehr [Sc97]. Der fließende Verkehr beinhaltet raum-zeitliche Veränderungen<sup>63</sup>, d. h., Verkehrsobjekte bewegen sich auf relativ statischen Bezugsflächen, den Verkehrsflächen, die klar zu anderen Nutzungsflächen abgegrenzt sind.

Ob Verkehrsobjekte oder deren Sachverhalte, bei Netzbetrachtungen werden Verkehrsdaten (z. B. Verkehrsbelastungen) entlang von Kanten (Fahrbahnabschnitt zwischen zwei Knoten) und Knoten (Übergänge, Kreuzungen) simuliert. Für die Simulation der Fahrbeziehungen werden beliebig große Querschnitte, Knotenanzahl und Grundformen zugrunde gelegt. Dabei liefern punktuelle Messungen und zeitlich begrenzte Messfahrten empirische Grunddaten für hinreichende Modellberechnungen.

Über gekoppelte Modellvariablen werden flexible unterschiedliche Daten mit verschiedenen Kenngrößen kombiniert, aufbereitet und strukturiert. Da der Verkehrsfluss sich kontinuierlich verändert, werden Daten gleicher Werte und gleicher Inhalte schon während der Erfassung oder in der Aufbereitung zusammengefasst (in Zeitabschnitte gruppiert) und codiert.

Wertkodierungen (Signaturen, Muster) unterscheiden sich durch ihre qualitativen (nominalskalierten) und quantitativen (ordinalskalierten) Merkmale und können anhand ihrer geometrischen Formparameter (Fläche, Linie, Punkt) für die Verkehrsnetzgestaltung typisiert werden.

Adäquate Methoden zur Visualisierung diskreter dynamischer Werte werden an Beispielen wie punktuelle Messungen, strukturelle Zuordnung regionaler Einheiten bis hin zur Gestaltung komplexer Verkehrsbeziehungen beschrieben und in flächenhafte, lineare und punktuelle Diskreta ungegliedert.

## Flächenförmig

Flächenhafte Diskreta sind geometrisch abgegrenzte Areale, die sich zu anderen Objekten durch eine Kontur abgrenzen [Ha02]. Verkehrsaufkommen flächenhaft zu veranschaulichen, ist auch eine Frage der maßstäblichen Auflösung. Dynamische Verkehrsobjekte sind überwiegend Einzelobjekte, die sich auf Verkehrsflächen bewegen. Bei einer hohen räumlichen Auflösung können Verkehrsobjekte einzeln simuliert und dargestellt werden. Sind für Szenarien größere Areale in Betracht zu ziehen, können Verkehrsflächen mit Hilfe graphischer Variablen modelliert werden.

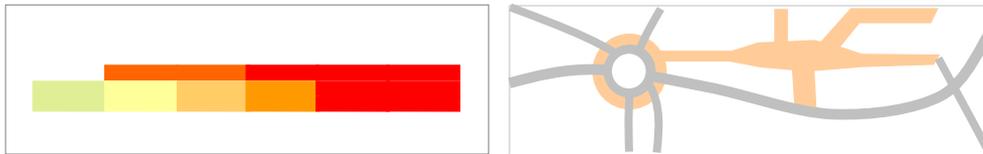


Abb. 9: Flächenhafte Diskreta, Verkehrsflächen

Bedeutsam für Gebietsanalysen der Verkehrssituation, die eine niedrigere Auflösung verlangt, ist die räumliche Verteilung des Verkehrs. Verkehrsverteilungsmodelle basieren auf Verkehrszellen, die den Quell- und Zielverkehr, z. B. den Berufsverkehr, der zwischen Wohn- und Arbeitsstätten pendelt, Wirtschaftsverkehr oder Naherholungsverkehr sowie deren Verkehrsbeziehungen über das eingebundene Verkehrsnetz abbilden. Ausgehend von der Struktur der Verkehrszellen (verkehrserzeugende Einrichtungen, Einwohner) werden Verkehrsströme und Verkehrsbelastungen codiert dargestellt. Diese Darstellungen beruhen überwiegend auf Formen der relativen Methode. Sie dienen der Darstellung von Verhältniswerten [Wi70] bezogen auf Gebietseinheiten (Flächenkartogramme<sup>65</sup>). Für flächenhafte quantifizierte Darstellungen werden Verkehrszellen über Wertgruppen (Quell- und Zielgruppen) definiert, die relevante Strukturdaten integrieren oder auch Verkehrsbelastungen und Mobilitätsverhalten klassifiziert visualisieren. Verkehrszellen dienen der Abgrenzung und Gliederung des Untersuchungsgebietes und werden, neben der Einordnung nach statistischen Daten, nach natürlichen und baulichen Begrenzungen unterteilt. Das Verkehrsaufkommen pro Zelle wird aus empirischen Nachfragedaten ermittelt, die zugleich Quell-, Ziel- und temporäre Daten liefern.

Der Ansatz nach Arnberger, mittels Rastermethode oder Werteinheiten kartenmaßstabsbezogene Flächenangaben [Ar02] zu erzielen, beruht auf Darstellungen absoluter Werte. Rasterzellen<sup>66</sup> enthalten Informationen der Flächennutzung und Daten der Raumstruktur (Bevölkerung, Beschäftigte des sekundären, tertiären Sektors etc.), die als Planungsgrundlage für das Verkehrsaufkommen obligat sind. Sie stehen nicht in direkter Beziehung zu anderen Größen. Erst mit der Verknüpfung innerhalb des Geoinformationsmoduls können Nachbarschaftsbeziehungen zu umliegenden Zellen oder Beziehungen zu anderen Werten und Mengen hergestellt und veranschaulicht werden. Absolute Werte werden häufig in Beziehung mit Zeitskalen gesetzt. Das Zeit-Weg-Diagramm ist ein probates Darstellungsmittel, um Reiseweiten und Reisezeiten in Relation zu setzen. In der planerischen Gestaltung werden sie entweder losgelöst vom Raum oder durch textliche Zuordnung (Straßennamen) raumgebunden betrachtet.

<sup>64</sup> Bewegung z. B. einzelner Fahrzeuge in festen Zeitabschnitten, deren Geschwindigkeit (Beschleunigen, Abbremsen, Trödeln, Fahren) sich aus dem Weg berechnen lässt..

<sup>65</sup> Fläche begrenzt durch Linie, die Gebiete unterschiedlicher Attributausprägungen voneinander abgrenzt. Wird zur Darstellung räumlicher Diskreta eingesetzt [GS08].

<sup>66</sup> Rasterzelle ist über die Aussage 0 oder 1 (Wert vorhanden oder nicht) mit Informationen anderer Module verknüpft.

Kartodiagramme und Signaturen in Bezug zu einer Verkehrszelle stellen Zeit und Messgrößen (Raum-Zeit-Reihen) direkt dar bzw. gegenüber. Für Streckenabschnitte können schematische Darstellungen in Zeit-Weg-Diagramme integriert und bei Gebietsbetrachtungen mit Verkehrszellen unterlegt werden. So sind Analysen komplexerer Koordinationsläufe möglich. Die Gegenüberstellung oder Mehrphasendarstellung kann durch das Einsetzen von dynamischen visuellen Variablen nach MacEachren ergänzt werden. Während des Visualisierungsprozesses wird so der fließende Verkehr aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet, was den Simulationslauf optimiert. Die Arealmethode bietet sich nicht direkt für den fließenden Verkehr an, sondern eher für ableitende qualitative und quantitative Aussagen wie Emissionsbelastungen, deren Verbreitungsareale sich stetig ändern (siehe 4.2.2). Die ursprünglich kontinuierlichen Daten werden in Wertgruppen gestuft und als Diskreta dargestellt.

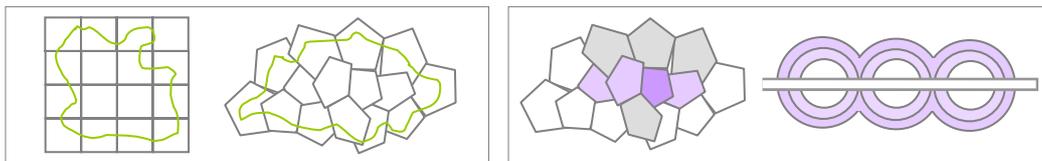


Abb. 10: Flächenhafte Diskreta, Kartodiagramme Isochronen

Ein konstruktivistischer Ansatz zur Ermittlung des verkehrlichen Schwerpunktes einer Zelle (Einzugsbereiche), der als Knoten zwischen den Strecken des zu generierenden Netzmodells dient, sind Isochronenuntersuchungen. Isochronen sind Linien gleicher Zeit, die Punkte oder Knoten (z. B. Haltestellen, relevante Knotenpunkte) gleicher Zeit verbinden bzw. die Erreichbarkeit in gleicher Zeit darstellen. Für das Zeit-Weg-Verhalten werden Isochronen von einem Ausgangspunkt in Anhängigkeit der Geschwindigkeit unter Beachtung der Reisezeiten auf wegführende Netzelemente konstruiert [Sc97]. Ein adäquates Mittel, um die räumliche Dynamik als Kreis- oder als Rautendarstellung, abzubilden. Die Methoden können miteinander kombiniert werden.

Die Art und Fülle der Kombinationen (relative und absolute Häufigkeit, Beziehungen, Verhältnisse etc.) richten sich nach den Grenzen des Wahrnehmungsvermögens. Die menschlichen Kognitions- und Abstraktionsleistungen ermöglichen nur bis zu einem gewissen Grade, Symbole und ihre semiotische Bedeutung effizient zu erfassen. Zum Beispiel die Wahrnehmung von 6-8 farblich codierten (Farbfläche) Wertgruppen ist für den Betrachter schnell zu identifizieren. So verschiedene empirische Forschungsergebnisse, die die Grenzen der kognitiven Verarbeitung von Informationen beschreiben, wie von Miller [Mi94]. Klassifizierte Fachthemen mit vielfältigen Aussagen bedienen sich mehrerer Muster- und Farbvariationen, ohne die Farbanzahl einzugrenzen, wie z. B. in der Geologie. Es werden zwar Assoziationen angestrebt, doch eine vielfältige Symbolisierung muss immer decodiert werden. In der Verkehrsnetzgestaltung werden Verkehrszellen und ihre Funktionsbereiche mit den Verkehrsnetzen überlagert. Eine präzise Gestaltung der einzelnen Elemente bereits während der Analysephase bis hin zu planerischen Gestaltungsvorschlägen bildet die Grundlage für eine effiziente Konzeption funktionierender Verkehrssysteme. Die Geovisualisierung dient bereits in der Anfangsphase als Analysewerkzeug zur räumlichen Kognition, d. h. zur Darstellung räumlicher Strukturen und Prozesse als Mittel zur Erkenntnisgewinnung [ME94]. Neben dem Gestaltungselement Fläche mit funktionaler Nutzung sind lineare Elemente insbesondere für die Netzgestaltung grundlegend. Die Einteilung, Funktion und Kategorisierung werden im nachstehenden Abschnitt erläutert.

## Linear

Eine lineare Abgrenzung diskreter Werte kann real oder fiktiv sein. Es ist eine Verbindung zweier Punkte bzw. eine Linie als eine Menge von Punkten, die in ihrer Länge messbar ist [Wi70]. Über die Variationen von Muster, Farbe, Richtung, Helligkeit und Breite können Linien sowohl qualitative als auch quantitative Werte darstellen und zu Liniensignaturen kombiniert werden. Objekte linearer, netz- oder baumartiger Ausdehnung mit dynamischen zeitgebundenen Aussagen werden durch Bewegungsrichtungen, Vektoren, Pfeile, Bandsignaturen oder Bandkartogramme dargestellt.

Die Einteilung der Straßen für die Verkehrsnetzgestaltung des Kraftfahrzeugverkehrs ist funktional (Verbindungs-, Erschließungsfunktionen) in Kategorien (über-, innerörtliches Haupt- und Nebennetz) gegliedert. Straßenhauptnetze, insbesondere innerörtliche, weisen unterschiedliche Grundformen auf. Städtebaulich gewachsen sind vor allem in Europa Radial-Systeme mit einem inneren Stadtkern, die sich in Folge des Wachstums durch Ringstraßen erweiterten und zu Radial-Ring-Systemen oder Tangentensystemen entwickelten. Nicht gewachsene, sondern geplante Städte weisen Orthogonal-Raster-Systeme oder Hexagonal-Raster-Systeme auf. Für den Aufbau eines Netzmodells werden die Kanten und Knoten dem vorhandenen Straßennetz angepasst, so dass die Hauptnetzstraßen die genannten Grundformen abbilden. Eine Kombination des Radial-Ring-Systems mit den Orthogonal-Raster-Systemen ermöglicht eine Verfeinerung mit Nebennetzen.

Eine vollständige Netzmodellierung setzt zum einem die zwar schematische, aber lagegetreue Abbildung der Netzelemente voraus, zum anderen die zur Verfügung stehenden Ausgangsdaten der Verkehrsstärke an Knotenpunkten einschließlich der Abbiegevorgänge sowie die auftretenden Wartezeiten als Einflussgröße der Reisezeiten. Aufgrund dieser Kenngrößen können verschiedene verkehrsplanerische Berechnungsverfahren<sup>67</sup> angewandt werden.

Zur Berechnung der Verkehrsstärke sind empirische Daten (meist punktuelle Messdaten entlang des Straßennetzes) in ausreichender Differenzierung (z. B. nach Fahrzeugarten) erforderlich.

Für eine Simulation der Verkehrsverteilung werden aus den Verkehrserhebungen u. a. Verkehrsstärken, Quell-Ziel-Matrizen etc. ermittelt. Verkehrsstärken werden häufig über Bandsignaturen mit logarithmischem Signaturmaßstab oder mittels der Methode der Bewegungslinien veranschaulicht, deren zeitabhängige Zustandsänderungen durch eine Gegenüberstellung der Früh- und Nachmittagsspitze verglichen wird. Die Bewegung in Strombelastungsplänen wird durch die Richtung, den Verlauf und die Quantität charakterisiert. Werden Verkehrsstärken bezogen auf ein Straßennetz dargestellt, so können Quantität und Qualität sowie Verlauf und Richtung dargestellt werden. Für die Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Straßenabschnittes mit eventuell mehreren Knotenpunkten ist eine Kombination der Qualitätsstufen einer Straße mit der Verkehrsbelastung sinnvoll.

<sup>67</sup> *Verkehrserzeugung, simultane Verkehrsaufteilung und -verteilung, mikroskopische Simulation der Verkehrsnachfrageberechnungen, Verkehrsumlegung (Ermittlung der Streckenwiderstände, Verkehrstrommatrizen, Verkehrsnetzberechnungsverfahren etc.), Verkehrsplanerische Berechnungen mit Rückkopplung [Sc97].*

Ändert sich die Qualität aufgrund der sich ändernden Verkehrsstärken und -beziehungen, so kann ein weiteres Modul Route aktiviert werden, das über Routensuchverfahren alternative Strecken einblendet, die die Verteilung und damit verbundene Änderung der Leistungsfähigkeit simulieren.

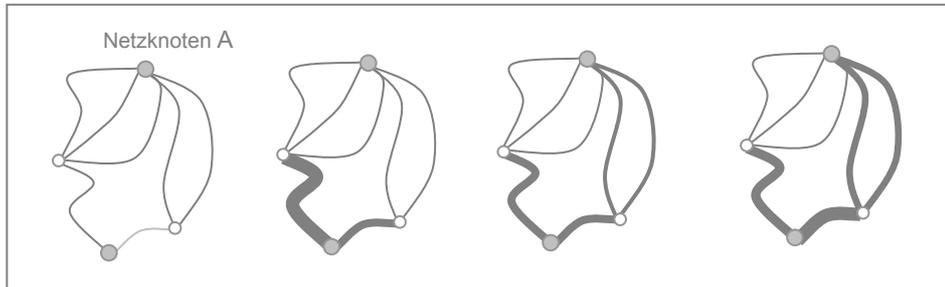


Abb. 11: Schematisches Netzmodell und Belegungsvarianten nach Lohse

Für eine gleichzeitige räumliche und zeitliche Darstellung ist das Einsetzen dynamischer visueller Variablen nach MacEachren [ME94] für dieses Beispiel sinnvoll. Das Ansteigen des Verkehrsaufkommens wird häufig durch Liniendiagramme, Ganglinien oder Säulendiagramme veranschaulicht. Dabei können die Ströme nicht verfolgt werden, so dass bisher eine Gegenüberstellung der einzelnen Zufahrten erfolgte. Ein weiterer Ansatz wäre, die Thematiken zu kombinieren und mit Hilfe der graphischen und dynamischen Variablen ein graphisches Gefüge zu konzipieren, das Signaturen einschließt.

Punktuelle Darstellungen werden für die Symbolik statischer Verkehrsobjekte (Lichtsignalanlagen) angewendet. Sie können einen Gesamtüberblick z. B. zur Verwaltung von Lichtsignalanlagen geben und in Zusammenhang mit Strombelastungsplänen dynamisch die Wartezeiten und Fahrwiderstände visualisieren. Anwendungen in großmaßstäblichen Abbildungen können dynamische Verkehrsobjekte punktuell darstellen.

### Punktuell

Lokale Diskreta können Einzelobjekte mit absoluten Werten sein, die durch ihre Position und Art (qualitativ) definiert werden, oder sie können auch durch angegebene Mengewerte eine konstante Anzahl von Objekten (quantitativ) repräsentieren, die eine Implantation von relativen Werten zulässt [Be82].

Einzelobjekte, die punktuell im Raum lokalisiert sind, definiert über den Mittelpunkt eines ihn charakterisierenden Kreises oder den Scheitelpunkt sich schneidender Linien [Wi70], können durch visuelle Unterschiede bzw. Ähnlichkeitsmerkmale differenziert wahrgenommen werden. Durch Variationen von Häufigkeit (Menge) und Wertigkeit (Größe, Farbe, Helligkeit) in Kombination mit Form- und Richtungsmodifikationen [Be82], die zu Formgruppentypen [Ar02] bzw. zu Signaturen zusammengefügt werden, können quantitative und qualitative Aspekte visualisiert werden. Die graphischen Variablen dienen der Abstraktion von komplexen Zusammenhängen. Dabei werden je nach Anforderung und Nutzen konkrete (bildliche) oder abstrakte (geometrische) Symbole bzw. Signaturen konzipiert. Bewegungssignaturen, die den zeitlichen Aspekt visualisieren, können Pfeil- und Richtungssignaturen sein oder animierte Positionssignaturen und -diagramme.

In Kombination mit dynamischen visuellen Variablen wie dem Eintrittszeitpunkt, der Dauer, der Reihenfolge, der Änderung des Verhaltensmusters und der Gleichzeitigkeit [ME94] kann die Art der Dynamik eines Punktobjektes beschrieben werden.

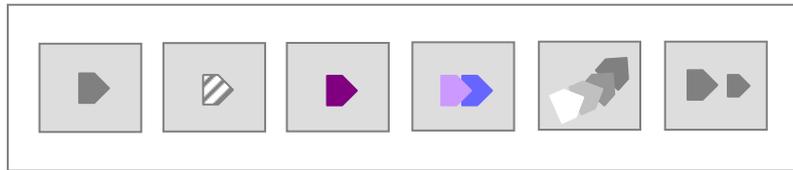


Abb. 12: Punktuelle Gestaltungsbeispiele eines Einzelobjektes

Werden Punkte im Raum verteilt dargestellt, d. h. Punktmengen (Mengensignaturen), die durch eine zeitliche Gegenüberstellung Entwicklungstendenzen verdeutlichen, so kann über diese Zeitpunktmethode ebenso in Kombination mit graphischen und dynamischen Variablen der zeitliche Aspekt sowohl lokal als auch auf eine Fläche bezogen visualisiert werden.

Ein Punkt entlang einer Achse gibt den Wert zwischen dem davor liegenden und danach liegenden Punkt an, wie z. B. die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges oder den Abstand zum nächstliegenden Fahrzeug. Verringert sich der Abstand und die Punkte verdichten sich zu einer Linie während eines Zeitlaufes, können Staus daraus schnell assoziiert werden. Über Farbverläufe oder Farbstufen, die die Geschwindigkeit von Stop and Go bis Stillstand codieren und dynamisch animieren, können einzelne Punkte zu Linien generiert werden, die die Dynamik im Raum und damit die Zustandsänderungen diskret oder kontinuierlich simulieren. Wird dieser Übergang fließend dargestellt, begrenzt sich das Wahrnehmen auf das Verdichten des Verkehrsstromes. Der momentane Zustand oder das Szenario für einen Zeitabschnitt (die(der nächste(n) Stunden, Tag, Woche etc.) innerhalb eines Verkehrsraumes kann übersichtlicher visualisiert werden, indem Wertcodierungen in Kombination mit Signaturen bibliothekarisch angelegt werden und diese je nach Zustandsänderung mit Zugriff auf die sich stetig ändernden Daten aufgerufen und verknüpft werden können, ohne dass ein vollständiger Simulationslauf erneut gestartet werden muss. Unter diesem Gesichtspunkt ermöglicht ein Übergang von einer Punktgeometrie in eine Liniengeometrie eine dynamische Gestaltung des Visualisierungsprozesses. Linienhafte Darstellungsmethoden können durch den neuen Zustand eingebunden werden und einen kontinuierlichen Zustand erzeugen.

#### 4.2.2 Methoden kontinuierlicher Werte

*„Kontinua sind räumlich oder flächenhaft unbegrenzt und dabei von lückenlosem, stetigem Verlauf. Ihre geometrische Information besteht in der Lageangabe für Zahlenwerte, die sich von Ort zu Ort kontinuierlich ändern (sog. Wertefelder)“ [Ha02].*

Die kontinuierliche Bewegung des fließenden Verkehrs kann mikro-, makro- und mesoskopisch (Mischform aus mikro- und makroskopisch) modelliert werden. Mikroskopische Modelle berechnen das dynamische Verhalten jedes einzelnen Verkehrsobjektes und bilden den Verkehrslauf quantitativ als Menge von Einzelfahrzeugen ab. Diese Modelle (z. B. Zellulare Automaten) sind diskret in Raum, Zeit und Zustandsvariablen. Makroskopische Modelle (diskret oder kontinuierlich) stellen dynamische Phänomene zusammengefasst in relativen Werten, wie der Fahrzeugdichte, dar. Es wird der Verkehrsablauf als kontinuierlicher Fahrzeugstrom beschrieben [Ro00].

Die makroskopischen Größen Verkehrsfluss (die Anzahl der Bewegungen pro Zeitintervall auf einem Streckenabschnitt) und mittlere Geschwindigkeit können im Übergang zu integralen Größen den Verkehrslauf als Kontinuum simulieren. Wird der Verkehrslauf visuell als dynamische Fläche betrachtet und nicht als sich abgrenzendes Objekt, so kann die Verbreitung des Fahrzeugstroms zwar nicht als reale Kontinua modelliert werden, aber als ein kontinuierliches geometrisches Modell (z. B. Interpolation wechselnder Kraftfahrzeuge zwischen den Spuren).

Besser zu assoziieren sind Bandsignaturen, die sich kontinuierlich in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte neu generieren. Die Dynamik (Fahren, Trödeln, Stehen) kann mit Hilfe der graphischen Variablen Helligkeit, Farbe und der dynamischen Variablen visualisiert werden. Es können Farbcodierungen entlang des Verkehrsnetzes implementiert und Stromverläufe sowie Routenentscheidungen abgebildet werden.

Eine reale Kontinua, die ohne Abstufungen das Zeitgeschehen im Raum abbildet, ist dann nicht geeignet, wenn aufgrund fester abgegrenzter Verkehrsareale keine Flächenausbreitung im Raum existiert und sie ist nicht wahrnehmbar, wenn das Ansteigen des Verkehrsaufkommens zu fließend dargestellt wird.

Ein ähnliches Problem besteht, wenn komplexe Simulationsmodelle zu zeitaufwändig sind, um kurzfristige Ergebnisse zu erzielen. Das Diskretisieren der Zeit (minimale kontinuierliche Zeitschrittlänge) und der absoluten Werte vereinfacht die formale Methodik. Bei einer kontinuierlichen Zeit sind alle Eigenschaften kontinuierlich verfügbar, bei diskreter Zeit nur abschätzbar. Doch die damit verbundene Fülle von Informationen kann im Gegensatz zu aufbereiteten und codierten Daten das Prinzip der eindeutig differenzierten Gestaltung häufig nicht wahren.

Kontinuierliche Erhebungen werden diskretisiert und zu kontinuierlichen Informationen des Verkehrsflusses modelliert und visualisiert.

## Flächenhaft

Flächen als Kontinua in Zusammenhang mit dem Verkehr sind oftmals abgeleitete relative Werte wie Lärm oder Emissionen, deren Wertefeld sich stetig ändert. Überwiegend entlang des Verkehrsnetzes (Geräusch- oder Emissionsquelle) werden farbige Wertstufen flächenhaft interpoliert, deren Farbflächenton ineinander fließend (Stetigkeitsprinzip nach Dent) oder abgestuft gestaltet werden kann. Lärm kann in einer 3D-Visualisierung in Bezug auf Gebäudehöhen z. B. in einem Stadtmodell viel realistischer dargestellt werden, als die Lärmbelastung nur in Höhe und Breite zu interpolieren.

Den Verkehrsfluss absolut als Fläche darzustellen, kann Risiken hinsichtlich einer nicht wertfreien Aussage oder das Negieren von Informationen in sich bergen. Zweckdienlich ist die Erfassung von Verkehrsflächen für Kosten-, Unterhaltungs- und Bestandsanalysen. Wird die Verkehrsfläche als dynamische Fläche hinsichtlich des Zeitgeschehens betrachtet, um z. B. in einem größeren Zeitabschnitt die Verdichtung der Verkehrswege und Parkflächen in Zusammenhang mit demographischen Entwicklungen und Siedlungsplanungen zu verdeutlichen, ermöglicht ein animierter Verlauf die stetige Ausbreitung der Verkehrsflächen.

Das Darstellen von Verkehrsszenen, -beziehungen und -verhalten dient der Parametrisierung für Simulationsmodelle. Auf diskreten Flächen kontinuierliche Liniendarstellungen zu kombinieren, ist ein weiterer Ansatz für eine zeitvariable Visualisierung des Verkehrsgeschehens.

## Linear

Lineare Kontinua sind Wertlinien, Verbindungen gleicher Werte [Ha02], wie z. B. Isolinien, die Raum- oder Flächenzustände beschreiben, deren Werte sich im Raum kontinuierlich ändern [Imh72]. Linien können qualitative, quantitative und temporale Eigenschaften wiedergeben. Bewegungslinien, gerichtete Linien werden durch Pfeile, assoziierende Signaturen, dynamische Variable etc. ergänzt. Netze können allein durch den Linienverlauf Charakteristiken wiedergeben. Wie in 4.2.1 beschrieben, sind verschiedene Grundformen von Straßenhauptnetzen für die Verkehrsnetzgestaltung relevant. Sie können schemenhaft oder auch als Signaturen unter Wahrung des typischen Verlaufs vereinfacht dargestellt werden.

Lineare Bewegungssignaturen oder bildhafte Signaturen (Pfeilsignaturen) können linear dargestellt den Verlauf und die Richtung angeben. Oftmals werden sie zeitdiskret in Beziehung gesetzt.

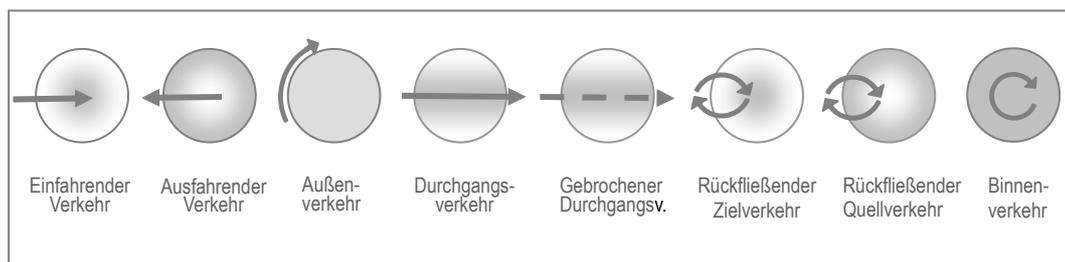


Abb. 13: Verkehrsarten eines Untersuchungsraumes, erweitert nach Lohse

Kontinuierliche Bewegungen mit konstanter oder variabler Geschwindigkeit, die Darstellung von Zeitlücken, lineare Zustandsänderungen werden neben der Signaturdarstellung häufig animiert durch Verdichtung einzelner Punkte zu einer Linie in einem Zeitabschnitt simuliert.

Die quantitativen Eigenschaften der Verkehrsbelastung können über die Linienbreite oder -höhe (3. Dimension) visualisiert werden. Für qualitative Merkmale wie Stau oder freie Fahrt werden graphische Variablen verwendet. Den Verkehrsfluss als dynamische Kontinua darzustellen, erfolgt animiert durch gerichtete Ströme. Die Übergänge und Zustände werden dabei zeitdiskretisiert dargestellt, die konform mit der Simulation laufen. Dieser Ansatz ist in der Realisierung mit den Kriterien Lesbarkeit, Aussagenutzen, Wahrnehmung in Einklang zu bringen, da auch hier eine schnelle Überlastung der Information erreicht wird.

Vernachlässigt wurde bisher die Signaturisierung raumstruktureller Informationen. Darstellungen von Strombelastungsbändern werden meist mit der Siedlungsfläche kombiniert. Die sofortige Erkennbarkeit der Aufnahmekapazität des Straßenhauptnetzes ist selten über diese Darstellung möglich. Im Abschnitt 5 werden diese Problematiken untersucht und Vorschläge in Kombination mit dynamischen Punktdarstellungen für ein komplexes Gefüge entwickelt.

### Punktuell

Zahlenwerte im Kontinuum können Höhenpunkte oder andere Messpunkte sein, die nicht konstant sind und nicht einem Mengenwert zugeordnet werden [Hak02].

Vereinzelte Objekte wie Fahrzeuge werden schrittweise in der mikroskopischen Simulation diskret dargestellt. Sich stetig ändernde Messdaten hingegen werden von raumbezogenen Messpunkten im Kontinuum via Radarerfassung, Sensor-/Detektorsysteme oder optische Verkehrserfassungssysteme aufgezeichnet. Sie liefern kontinuierliche Mengenwerte (quantitative Daten) und qualitative Verkehrsdaten (Fahrzeugart). Zeitstufenkarten, punktuelle Zeitreihen, Variationen der Helligkeit und Farbe oder das Einsetzen dynamischer Variablen können die Quantität, Qualität und Dynamik visualisieren.

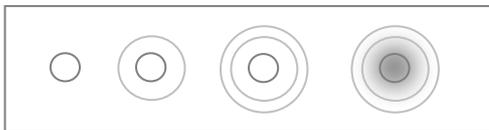


Abb. 14: Punktvariationen

Für die Zuordnung mehrerer Eigenschaften oder die Relation im Raum sind Signaturen aussagefähiger. Für Kreuzungspunkte werden bildhafte bzw. grundrissähnliche Signaturen konzipiert, die z. B. die Kapazität einer Kreuzung schematisch darstellen.

## 4.3 Zusammenfassung

Die methodische Umsetzung einer dynamischen Geovisualisierung basiert auf einem serviceorientierten Architekturkonzept, das abgestimmte GIS-Funktionen, Simulationsläufe und Datenoperationen bietet, die kognitiv dynamische Informationen veranschaulichen. Der Ansatz, bereits im Systemaufbau die Dynamik durch anpassungsfähige Module zu berücksichtigen, erlaubt zum einen eine Vielfältigkeit in der Anwendung und zum anderen eine Reduzierung des zu simulierenden Datenvolumens. Durch diesen flexiblen Ansatz kann eine stetige strukturelle Entwicklung des Systems ermöglicht werden. Darauf aufbauend werden Visualisierungsmethoden vorgestellt, die in ihrem Gefüge konform zu den Simulations- und GIS-Funktionen konzipiert sind. Nach zeitlichen und räumlichen Aspekten werden die Methoden in diskret und kontinuierlich unterteilt. Dieser Ansatz ermöglicht eine Annäherung an ein real-world environments and model und unterstützt visuelle Analysen komplexer dynamischer Informationen. Gesplittet in Punkt, Linie und Fläche können die Methoden des Visualisierungsmoduls ebenso flexibel kombiniert und variiert werden. Am Beispiel „Verkehrsbeeinflussung“ werden folgend die einzelnen Visualisierungsschritte aufgeführt.

## 5 Schritte eines verkehrstechnischen Visualisierungsprozesses

Techniken für statische Raum-Modelle werden in Geoinformationssystemen für die steigenden Ansprüche des Nutzers fortlaufend optimiert. Das Entwickeln von Raum-Zeit-Modellen ist von Hägerstrand in den sechziger Jahren durch den Space-Time-Pfad bis hin zum Space-Time-Cupe [Kr03] vorangetrieben worden. Dennoch sind Anwendungen in der Visualisierung dynamischer Phänomene vordergründig durch Animationen realisiert worden, die den Bewegungsablauf durch Aneinanderreihen von Bilddaten generieren. Visualisierungstechniken, die die Zeit in Darstellungsformen übertragen, stehen nach wie vor begrenzt zur Auswahl, wie Zeitleisten, Kartodiagramme, z. B. von Lexis Pencil [Fr98], der Säulendiagramme über eine Fläche als Ereignishistorie abbildet oder senkrechte Zeitachsen und Mehrphasenkarte, z. B. die lineare Anordnung zeitdiskreter Bilder bzw. Fenster oder animierte Phasen innerhalb eines dargestellten Raumes.

In diesem Abschnitt werden für dynamische Informationsstrukturen Methoden entwickelt, die es erlauben, Zustandsänderungen in Zusammenhang mit Beziehungsmerkmalen zu veranschaulichen. Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept greift auf zeitbasierte Daten zurück, die durch simultane Anfragen verschiedene Prozesse in Gang setzen, in denen die Daten strukturiert, codiert und visuell modelliert werden. Die Dynamik kann in einer modellhaften echtzeitnahen Online-Visualisierung intuitiv erfahrbar gestaltet werden. Das setzt voraus, dass Wahrnehmungsaspekte berücksichtigt werden. Der Prozess, zeitabhängige Daten zu visualisieren, beginnt mit dem Erfassen und Klassifizieren der Daten. Über das modulare Einbinden verschiedener Berechnungsverfahren werden in weiteren Schritten die Daten simuliert, die gleichzeitig visuell so aufbereitet werden, dass sie für weitere Analyse Zwecke veranschaulicht werden. Diese Wechselbeziehung ergänzt algorithmische Verfahren um die visuelle Analyse. Die elementare Aufgabe der Visualisierung eines Verkehrsmodells ist es, vorhandene oder zu erwartende Systemzustände in Beziehung zu setzen. Verkehrsbeziehungen zwischen Knotenpunkten, Verkehrsnetzen oder -zellen sowie die Einflussnahme von Strukturanalysen und sozioökonomischen Trends sind für Verkehrsprognosen grundlegend. Die Analyse der Systemzustände erfolgt durch messwert- oder logikbasierte Verfahren, die Verkehrszustandsdaten liefern. Der Ablauf des Visualisierungsprozesses, Einflussfaktoren, z. B. menschliche Wahrnehmung, der Aufbau der Datenstruktur sowie konzipierte Visualisierungstechniken werden methodisch erläutert.

Grundlage für Verkehrsbeziehungen bilden georeferenzierte Online-Verkehrsdaten, die in drei Stufen in eine geeignete visuelle Repräsentation transferiert werden:

- Aufbereitung und Strukturierung der Daten
- Visualisierung der Information durch Evaluation von Visualisierungstechniken
- Wahrnehmung der Informationen sowie das Ableiten von Wissen.

Beginnend wird die Frage nach der Aussage konkretisiert, um die entsprechenden Daten zu selektieren [Sc00].

**Filtern der Informationen (Reduktion, Fehlerkorrektur, Extraktion)**

- Datenerhebung
  - Standortwahl (welche Messpunkte innerhalb eines Netzes sind für eine Qualitätsaussage/Beurteilung von Konfliktsituationen bedeutsam?)
  - Wahl des Zeitintervalls (Spitzenstunde, Tages-, Nacht-, Sonntags-, Monats-, Jahresverkehr)
  - Wahl der Erhebungsmethode (Zählung, Beobachtung, Befragung)
- Datenübertragung
  - TCP/IP-Netzwerke
  - Funknetze
- Datenfusion und Datenintegration
  - Datenspeicherung
  - Datenzusammenführung
  - Datenvervollständigung
- Datenanalyse
  - Zustandsformen
  - Bewegungsvorgänge
  - Wahl der Analysemethoden für den Verkehrsablauf (Modelle, Berechnungsverfahren)
  - Plausibilitäts-/Qualitätsprüfungen

**Erzeugung eines Geometriemodells, Wahl der Visualisierungstechniken zur Visualisierung dynamischer Phänomene**

- Symbolisierung der Knotenformen in der makroskopischen Ebene
- Symbolisierung der Knotenformen in der mikroskopischen Ebene
- Syntaktische und semantische Attributierung
- Graphisches Gefüge in seiner punktuellen, linien- und flächenhaften Struktur
- Prüfung der geeigneten Methoden nach den Kriterien:
  - Verständlichkeit, Eindeutigkeit
  - Ästhetik der gewählten Methode in ihrer Farb- und Formgebung
  - Lesbarkeit, die durch Informationsdichte und Übersichtlichkeit bestimmt wird
  - Assoziation von Text und Signatur zur Problematik
  - Interaktivität

**Wahrnehmung und Interaktion der Präsentation**

- Welche Wahrnehmung mit und ohne fachliche Kenntnisse
- Welche verschiedenen Sichtweisen werden genutzt, verschiedene Erfahrungsniveaus
- Wie interagieren die Benutzer, welche Möglichkeiten werden geboten
- Aufbau einer Bildschirmpräsentation

## 5.1 Filtern der Informationen (Reduktion, Fehlerkorrektur, Extraktion)

Verkehrszustandsdaten wie z. B. Daten der Ausweitung, Verdichtung und der Entstehung werden empirisch erhoben. Verschiedene Erhebungsmethoden, die abhängig sind vom Erhebungsziel, dem definierten Raum und von den Dateninhalten, können in das System integriert werden. Für die Analyse verkehrsdynamischer Vorgänge, z. B. Konfliktsituationen (Unfallgeschehen), Staubeobachtungen, Beobachtungen des fließenden und ruhenden Verkehrs, werden Zählungs- und Beobachtungsverfahren (Objekt-, Querschnittszählungen oder Verkehrsstromerhebungen) eingesetzt.

Die zeitliche und räumliche Auflösung der Datenerhebung richtet sich nach den Erfassungstechniken (manuell, optisch, Radar, Induktion), die überwiegend kontinuierlich aufzeichnen können, jedoch für Analysezwecke die Erhebungsdaten in Zeitintervalle diskretisiert werden.

Das Verkehrsverhalten aufgrund raum-, zeit- und soziodemographischer Beziehungen wird durch Befragungsmethoden erfasst. Die Erhebungsmerkmale, strukturierte Mengen nach Fahrzeugart, Richtung und Fahrstreifen, Quelle-Ziel-Relationen, Wegzweck, Hintergründe der Verhaltensweisen, werden wie die Rohdaten (z. B. Bilddaten) mit einem Zeitstempel (auch Archivzeitstempel) in einer Datenbank archiviert und zusammengeführt.

Merkmale, die in der nächsten Prozessebene durch z. B. in Beziehung setzen von Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten generiert werden oder Objekte, die in einem Zeitintervall mehrmals auftreten, werden in einer Sequence-, Prozess- oder Eventtabelle [Yu04] mit einem Startzeitpunkt und Endzeitpunkt aggregiert.

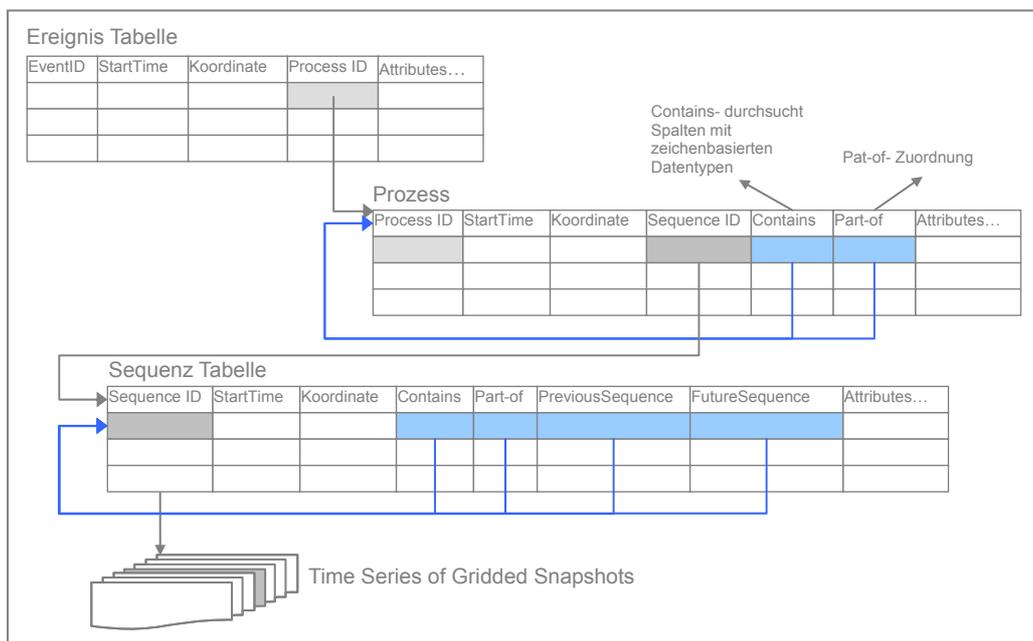


Abb. 15: Temporal Data Structures, Quelle: May Yuan

Der Datenabgleich, die Datenfusion (Vervollständigung lückenhafter Datensätze, Datenbereinigung) dient der Informationsintegration ergänzender Daten über Verkehrslage, Struktur und Umfeld (Integration verschiedener Netze). So können in die Datenbank Daten unterschiedlicher Quellen eingespeist und Anfragen über netzwerkbasierende Datenübertragungstechnologien gestartet werden.

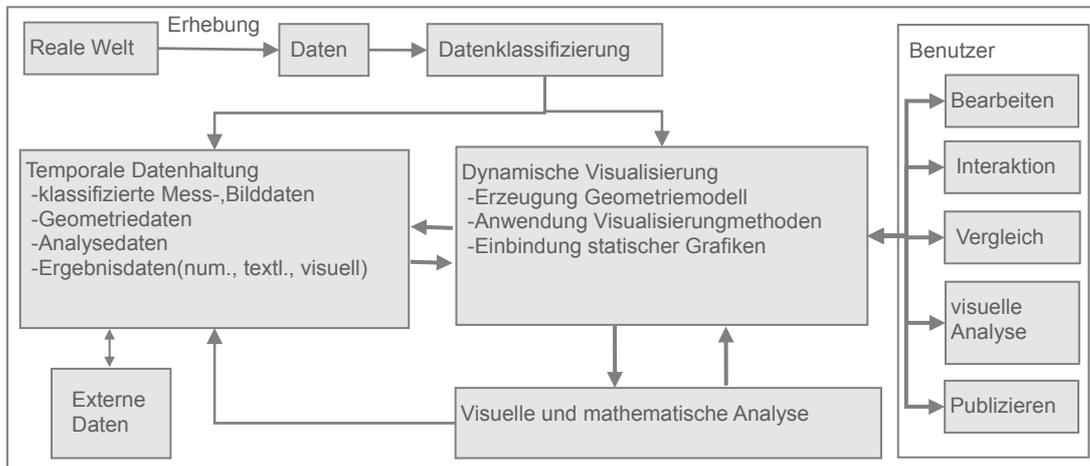


Abb. 16: Visualisierungsprozess

Die durch den Interpretationsprozess (Visual Analytic) gewonnenen Erkenntnisse können ebenso visualisiert und zeitabhängig archiviert werden. Die Erkenntnisgewinnung beruht neben numerischen Algorithmen und Simulationen auf visuellem Erfassen von Mustern und Strukturen, die sich innerhalb einer Interaktion verändern können. Die Qualität der Darstellungen hängt von den Visualisierungstechniken ab, die durch einen strukturierten Aufbau gezielt Daten filtern, reduzieren und die Ereignisse und Prozesse veranschaulichen.

Die Visualisierung der Verkehrsdaten, die sich auf Anfrage aus einer Bibliothek vordefinierter Darstellungsformen und Signaturen generiert, wird strukturiert modular aufgebaut, um eine Reihe von Analysemethoden und Bewegungsvorgängen in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen abbilden zu können. Klare wieder erkennbare Muster und Strukturen helfen, erinnerte Funktionen schneller aufzunehmen und die Aufmerksamkeit auf Zustandsänderungen und deren Zusammenhänge zu lenken. Das zu konzipierende Geometriemodell setzt sich aus stark schematisierten Signaturen (teils symmetrisch zueinander angeordnet) zusammen, die als Basiselemente fungieren und sich gleichzeitig den verschiedenen Analyseanfragen anpassen. Die Anpassung erfolgt über die einzelnen Elemente selbst, die z. B. mit Hilfe der graphischen Variablen veränderbar sind, und sie erfolgt in Abhängigkeit des gesamten graphischen Gefüges (z. B. kontinuierliche Anpassung innerhalb einer Skalierung). Die visuelle Kommunikation soll schnell und effizient die Aufmerksamkeit auf Berechnungsergebnisse lenken und Analysen in den Erkenntnis- und Kreativprozess einbinden. Dabei werden die Gesetzmäßigkeiten der Nähe, der Geschlossenheit, guten Fortsetzung, Ähnlichkeit und Symmetrie in die Konzipierung des Geometriemodells und der Visualisierungsmethoden eingebunden.

---

## 5.2 Erzeugung eines Geometriemodells, Wahl der Visualisierungstechniken zur Visualisierung dynamische Phänomene

Um eine effiziente Kommunikation der Analysedaten auch unter Zeitdruck zu erzielen, wird folgend die Visualisierungswirkung optimiert. Bisherige Beispiele visualisieren nur wenige Analyseergebnisse (Verkehrsdichte oder Geschwindigkeit). Für weitere Informationen werden Navigationsfunktionen angeboten, die erneute Bildaufbauzeiten für selektierte Thematiken (z. B. Darstellungen von Stadtbezirken und Verkehrszellen eines Planungsbereiches, separate Netzdarstellungen hinsichtlich der Straßenfunktionen oder Verkehrsart) benötigen.

Das gleichzeitige Visualisieren von Beziehungen wird aufgrund der Informationsfülle, der mangelnden Schematisierung und Symbolisierung reduziert. Dem entgegenzuwirken bedeutet einerseits, mehr Informationen in Relation zu setzen, aber dabei einen Überfluss an Informationen [Hab06], der zu einer Reduzierung des Inhaltes und somit zu Fehlinterpretationen führen kann, zu vermeiden. Daraus ergeben sich Anforderungen an die Methodik der einzelnen Visualisierungsschritte. In jeder Prozessphase ist es daher notwendig, verkehrstechnische Visualisierungsstrategien mit grundlegenden Darstellungsformen zu entwickeln.

Beginnend mit einer nicht nur lagegenauen, sondern auch präzisen inhaltlichen Wiedergabe der Netzstruktur, werden Grundformen der verschiedenen Straßenknoten schematisiert, die nicht erst in einer großmaßstäbigen Auflösung sichtbar werden, sondern bereits im Übersichtsmodus zur Verfügung stehen. Um in jeder Maßstabsebene auf alle Grundelemente zugreifen zu können, wird eine Bibliothek im Visualisierungsmodul angelegt, die durch einen Entry Point und External Service separat in andere Module implementiert werden kann. Ebenso werden für alle einflussnehmenden Elemente (Klassifizierung des Netzes, Flächennutzung) Signaturen konzipiert, die maßstabsabhängig sind, um so in verkleinerten Ansichten Bildüberfrachtungen für Rezipienten zu vermeiden.

Nach der Formanalyse folgt die visuelle Umsetzung der Knotenausstattung (Verkehrszeichen, Markierung) und des Verkehrsablaufes, d. h., zum einen werden die Fahrbeziehungen in Form von Verkehrsströmen mit ihren Kenngrößen abbildet und zum anderen die Bewegung als Verkehrsfluss definiert.

Je nach Berechnungsverfahren oder Modellwahl kann die Erkenntnisgewinnung isoliert oder gesamt in Raum und Zeit anschaulich dargestellt werden.

Die Wahl der Visualisierungsmethoden wird beschrieben anhand der Kriterien:

- Verständlichkeit, Eindeutigkeit
- Ästhetik der gewählten Methode in ihrer Farb- und Formgebung
- Lesbarkeit, Informationsdichte (Detailgrad) und Übersichtlichkeit
- Assoziation von Text und Signatur
- Interaktivität

### 5.2.1 Symbolisierung in der makroskopischen Ebene

In der makroskopischen Ebene werden gesamte Verkehrsströme abgebildet, die über eine Strecke zu einem Zeitpunkt (Zeitbereich) betrachtet werden. Der Bewegungsvorgang (Beschleunigen, Fahren, Bremsen), der sog. Verkehrsablauf, wird in einem Verkehrsfluss von anderen Verkehrsteilnehmern und Umfeldbedingungen beeinflusst. Der Verkehrsfluss kann mikroskopisch oder makroskopisch mit Hilfe von Kenngrößen betrachtet werden.

Tabelle 1: Kenngrößen zur Charakterisierung und Attributierung der Verkehrssituation

Makroskopische Ebene	Mikroskopische Ebene
Verkehrsstärken (Fahrzeuge/Zeit)	Festzeitsteuerung
Verhältnisse der Verkehrsstärken	Verkehrsabhängige Steuerung
Verkehrsdichte	Koordinierte Steuerung
Verteilung der Verkehrsträger (MIV, ÖV, Fußgänger, Radfahrer)	Verteilung der Verkehrsart (des MIV: Krad, Pkw, Lkw, LZ, FG, Radfahrer)
Belegungsgrade	Halte- oder Staulängen
mittlere Geschwindigkeiten	Wartezeiten

Makroskopische Größen können in Relation zur zeitlichen Änderung der Verkehrsdichte und mittleren Geschwindigkeit kontinuierlich den Verkehrsfluss abbilden. Kausale Zusammenhänge zwischen der Qualität des Verkehrsflusses an einzelnen Knotenpunkten und dem Verkehrsstrom auf Strecken, Teilnetzen und Netzen werden nicht direkt abgebildet. Es werden gesondert Charakteristiken der mikroskopischen Ebene betrachtet.

Im folgenden Modellansatz wird die makroskopische Ebene mit Teilen der mikroskopischen Planungsebene visuell verknüpft. Das ermöglicht eine ganzheitliche (Quelle, Ziele, Beziehungen, Wechselwirkungen) Betrachtungsweise der Verkehrsentwicklung in Teilnetzen oder zusammenhängenden Netzstrukturen unter Einbeziehung einer differenzierten Mikroskopie auf den jeweiligen Verkehrszustand am Knotenpunkt, das zudem ein Beobachten in verschiedenen Zeitfenstern (langfristig, kurzfristig) zulässt.

Grundlage der Visualisierung von Kenngrößen beider Ebenen ist eine logische Ordnung und graphische Homogenität [As08] des zu konzipierenden Zeichensystems, das durch standardisierte wiederkehrende Zeichen und klare Ausdrucksformen angestrebt wird. Die in Abschnitt 4.2 beschriebenen graphischen Primitive werden in der nächsten Stufe zu Zeichen kombiniert, angelehnt an standardisierte Formen der Straßenverkehrstechnik, die zudem in ihren Variationen typisierte Merkmale der Durchlässigkeit einbinden.

Modelliert werden zunächst charakteristische Grundformen, die sich in erster Linie durch geometrische Merkmale unterscheiden. Im zweiten Schritt werden die typisierten Grundformen mit graphischen sowie dynamischen visuellen Variablen zu Darstellung von Kenngrößen aus den makroskopischen und mikroskopischen Modellen kombiniert.

## Grundformen plangleicher Knotenpunkte

Die Symbolisierung der Knotenpunktformen orientiert sich an den Entwurfsprinzipien auf der Basis der Verkehrsebenen. Knotenpunkte sind plangleich, planfrei oder teilplangleich. Plangleiche Knotenpunkte liegen auf einer Ebene. Die Verkehrsteilnehmer aller Verkehrsarten benutzen nacheinander durch Verkehrsregelung (Vorfahrt, Lichtsignalanlage) den Kreuzungspunkt.

Die Grundformen unterscheiden sich durch den Ausbau (Einmündungen, Kreuzungen, Versatz und Kreis) und durch ihre geometrische Lage. In der kleineren Maßstabsebene für makroskopische Netzbetrachtungen werden reine geometrische Signaturen verwendet, deren Knotenarmgeometrie und -lage sich variieren lassen.

Methodisch werden klare, sich von den Linienelementen abgrenzende Signaturen konzipiert, die in ihrer visuellen Wirkungsweise kontrastreiche und schnell wahrnehmbare Formen der Knotenpunkte hervorheben.

Tabelle 2: Grundformen plangleicher Knoten, modifiziert nach Schnabel/Lohse

Knotenart	Formen plangleicher Knoten
Einmündung	
Kreuzung	
Straßenversatz	
auseinander liegende Einmündung	
auseinander liegende Kreuzung	
Kreisverkehrsplatz drei-, vier-, fünfarmig	

Zu den Geometrien kann eine inhaltliche Erweiterung der Fahrtrichtung, der Straßenfunktion (Verbindungsfunktion) und Verkehrsregelung (1.-4. Ordnung) hinzugefügt werden.

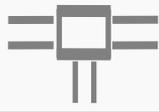
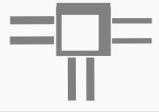
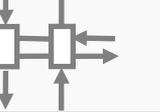
		
Hauptverkehrsstraße mit untergeordneter Straße	Abbiegende Hauptstraße mit untergeordneter Straße	Richtungsbezogene Pfeildarstellung

Abb. 17: Signaturen in Kombination mit Straßenklassifikationen

Für die Durchlassfähigkeit können zum einen die Auflösung verfeinert und weitere Elemente hinzugefügt oder aber durch Farbvariationen qualitative Merkmale hervorgehoben werden.

Bei einer makroskopischen Betrachtung können folgende mikroskopische Kenngrößen eingebunden werden.

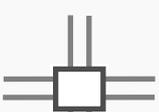
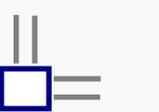
			
Knotenpunkt ohne Lichtsignalanlage (LSA)	Knotenpunkt mit Festzeitsteuerung -LSA	Knotenpunkt mit verkehrabhängiger LSA	LSA koordiniert

Abb. 18: Signaturen in Kombination mit steuerungstechnischen Funktionen

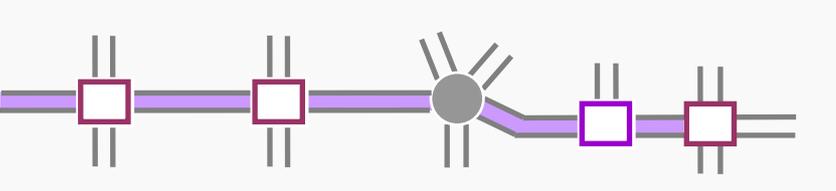

Lichtsignalanlagen teils verkehrabhängig, Strecke koordiniert.

Abb. 19: Signaturen für einen koordinierten Straßenzug

Quantitative Aussagen über die Verkehrsstärke können in begrenztem Maße in der makroskopischen Ebene über die Bandbreite visualisiert werden. Der zeitliche Aspekt, wie Wartezeit und Rückstau, kann statisch über Farbvariationen oder in Kombination mit einer Animation der Weglänge dynamisch präsentiert werden.

### Grundformen planfreier Knotenpunkte

Planfreie Knotenpunkte liegen auf verschiedenen Höhen, die sich durch Tunnel oder Brücken nicht auf derselben Ebene kreuzen. Die Formen unterscheiden sich in den Teilen Ausfahrt, Verflechtungsstrecke und Einfahrt.

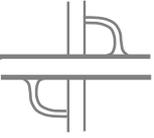
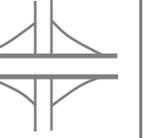
Knotenform				
Knotenart	Kleeblatt	halbes Kleeblatt	Trompete	Raute

Abb. 20: Auswahl an Grundformen planfreier Knoten, modifiziert nach Schnabel/Lohse

Teilplanfreie Knotenpunktgestaltung bietet für einzelne Ströme ein konfliktfreies Führen auf verschiedenen Ebenen an. Sie werden in Kombination mit den plangleichen Knotenpunkt-signaturen dargestellt.

Übersichtsdarstellungen sind so zu schematisieren, dass Regionen anhand ihrer Netzstruktur klar zu erkennen sind, ohne zu viele Details abzubilden. Der Aufbau von Grundstrukturen ist dabei wesentlich. Es werden Netzelemente angelegt, die wahlweise klassifiziert über Liniensignaturen und Farbvariationen in einer Bibliothek standardisiert abgelegt werden. Diese sind mit verkehrstechnischen Funktionen erweiterbar und entsprechend den Zustandsänderungen als gesamte Graphik archivierbar.

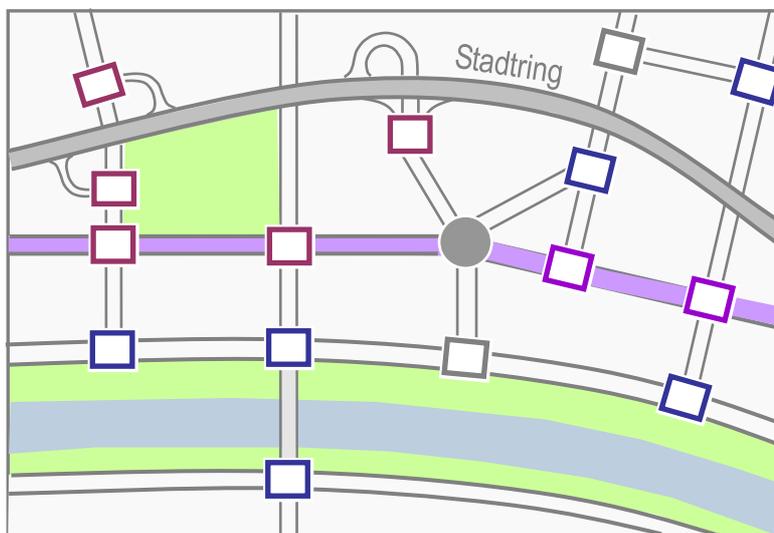


Abb. 21: Beispiel Visualisierungsmodell

Für themenspezifische Details kann der Darstellungsmodus in der mikroskopischen Ebene angepasst werden. Denkbar ist das Herausziehen einzelner Detailfenster oder regionale Ausschnittsvergrößerungen.

### 5.2.2 Symbolisierung in der mikroskopischen Ebene

Ein weiteres Merkmal für die Durchlassfähigkeit eines Knotenpunktes ist neben einer zweckmäßigen Knotenform der weitere Ausbau und die Ausstattung eines Knotens, die in Relation zur Verkehrsdichte intensiviert werden. In einer höheren Auflösung können durch die Kombination weiterer geometrischer Elemente Details der Vorfahrtsregelung, Markierung und Elemente der Signalsteuerung dargestellt werden.

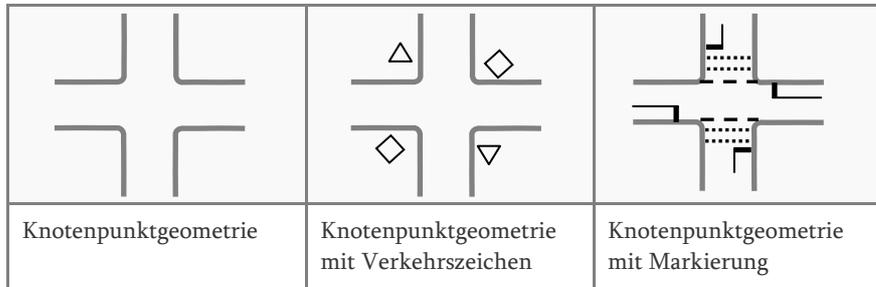


Abb. 22: Varianten Knotenpunktgeometrie

Das Bereitstellen von Gestaltungselementen entsprechend den Richtlinien kann über ein Graphiktool erfolgen, das schematische, aber auch detailgenaue Knotendarstellungen wie z. B. Signalisierungspläne konstruiert. Die in dieser Phase erstellten Maße (Abstände, Breiten) können in verschiedenen Maßstäben visualisiert und mit spezifischen Berechnungsverfahren jeweiliger Untersuchungsaufgaben (z. B. Berechnung der Leistungsfähigkeit, des Sättigungsgrades) modular eingebunden werden. So ist eine mikroskopische verkehrstechnische Untersuchung eines oder mehrerer Knoten, einer Strecke oder gar von Teilnetzen gewährleistet, die über Generalisierungsprozeduren und Kombinationen der Darstellungsformen Daten in der makroskopischen Ebene abbilden können.

Die Visualisierung verkehrstechnischer Kenngrößen kann in der mikroskopischen Ebene differenzierter in Weg und Zeit umgesetzt werden. Das Zeit-Weg-Diagramm als gängiges Darstellungsmittel kann auf den Raum in einer direkten Zeitrelation projiziert werden. Folgende Schematisierung zeigt einen Knotenpunktarm, der in Fahrspuren, Zeit- und Wegsegmente aufgeteilt ist. Statisch werden die Knotengrundform, Streifigkeit, der Weg und die Geschwindigkeit (in Stufen codiert) ebenfalls klar abgegrenzt dargestellt. Wird der Verkehrsablauf um eine dynamische Variable ergänzt, so können Wartezeit und Rückstau visualisiert werden.

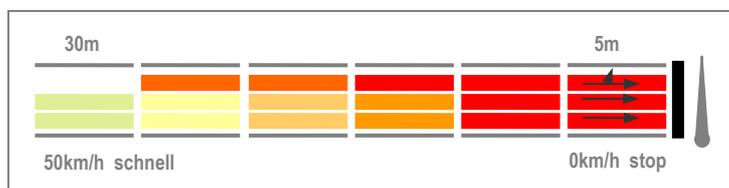


Abb. 23: Weg-Zeit-Diagramm auf den Raum abgebildet

Weitere Kenngrößen können nach diesem Prinzip statisch und dynamisch abgebildet werden. Verkehrsstärken, Verkehrsstrombeziehungen können gleichzeitig im animierten Zeitlauf mit Zeitlücken kombiniert werden. Für die Darstellung aller Verkehrsteilnehmer am Knotenpunkt können mit der Phasenfolge einer Lichtsignalanlage symbolhafte Signaturen (Fahrzeuge) und geometrische Signaturen kombiniert simuliert und animiert in Zeitintervallen dargestellt werden.

### 5.2.3 Syntaktische und semantische Attributierung

Das konzipierte Zeichensystem visualisiert Entwurfsprinzipien, die auf mehrere Bereiche anwendbar sind. So werden für die Betrachtung der Verkehrssicherheit Knotenpunktgrundformen, Bewegungsrichtungen etc. in Relation zu Unfallkostenraten gesetzt. Die Aufnahme des Unfallgeschehens wird in einem Grundschemata skizziert und mit verkehrstechnischen Eigenschaften verknüpft. So zum Beispiel die Ermittlung und Beurteilung von Qualitätsstufen an Knotenpunkten hinsichtlich ihrer geometrischen Grundform. Gleiche Grundelemente in verschiedenen Anwendungen über einen Variantenbaum haben den Vorteil, auf ein zugrunde liegendes Zeichensystem zurückgreifen zu können, statt Objekte zu kopieren und neu zu generieren.

Um bei Anfragen verschiedener Thematiken eine eindeutige Abgrenzung zu Modellen und Berechnungsverfahren zu gewährleisten, sind klare Strukturen für den Zeichenaufbau relevant. Die konzipierten Zeichen sind syntaktisch einwandfrei, wenn sie in ihrer Folge aus Grund- und Bezugszeichen eindeutig erkennbar sind. Der syntaktische Bezug ist unabhängig von der Bedeutung des Betrachters, er prüft das Zeichen in seiner Beschaffenheit, Zusammensetzung und Verknüpfung [Mo85]. Durch eine Reduzierung der Formenvielfalt des konzipierten Zeichensystems wird eine eindeutige und schnelle Erkennbarkeit angestrebt. Der semantische Bezug stützt sich auf das Wiedererkennen vorhandener Symbolik in der Verkehrstechnik. Durch Modifikationen und Verknüpfungen von Relationen werden das Erkennen und die Bedeutung des Zeichens prägnanter. Egal in welcher räumlichen Skalierung, die Grundformen bleiben erhalten. Zusätzlich werden Zeichenelemente angeboten, die unterschiedliche Thematiken und deren Beziehungen abbilden. Für eine einfache Zuordnung der Thematiken bzw. für das Anbieten unterschiedlicher Methoden wird das Layout bzw. der Bildaufbau schematisch gegliedert und somit die modulare Struktur erkennbar gestaltet.

Der Bildschirmaufbau kann durch die Wahl themenspezifischer Symbolik, Farbe und Struktur als Mediator fungieren. Informationen, die durch das Zuschalten von Info-, Diagramm- oder Bildfenstern ergänzbar sind, können durch farbliche Gestaltungen nach Themen kategorisiert werden. Der Benutzer kann bei einer Simulationsanfrage makroskopische oder mikroskopische Modellberechnungen anwenden.

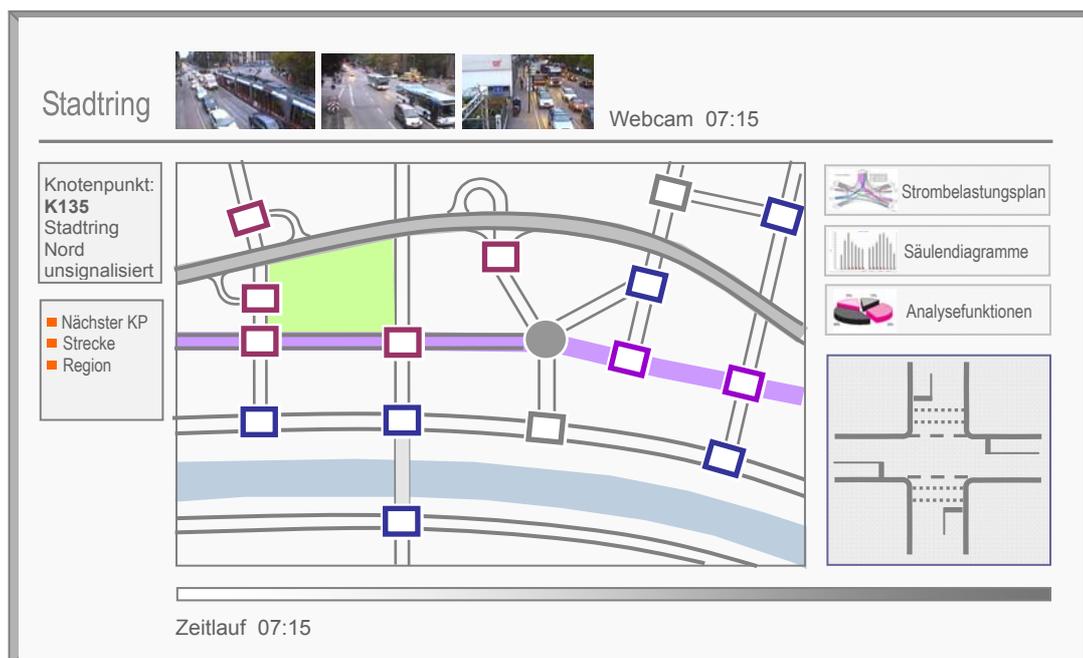


Abb. 24: Gestaltung, Aufbau und Nutzerführung

### 5.2.4 Graphisches Gefüge in seiner punktuellen, linien- und flächenhaften Struktur

Im folgenden Prozessschritt werden alle konzipierten Zeichen zusammengesetzt. Die Struktur des hier entstehenden graphischen Gefüges ist in Abhängigkeit von der mikroskopischen oder makroskopischen Betrachtung maßstabs- und damit signaturgebunden. Ein präzise abgestimmter Signaturaufbau, dessen stark schematisierte Grundrissdarstellungen in der mikroskopischen Ebene sich geometrisch an den Grundformen orientieren und bei makroskopischen Netzbetrachtungen sich geometrisch auf diese Grundformen reduzieren, dient der Eindeutigkeit und Klarheit in Form und Bedeutung. Die graphische Reduzierung erleichtert das Wiedererkennen qualitativer Aussagen und verhindert Überblendungen, Verdrängungen und Überfrachtungen des Bildes.

In der makroskopischen Ebene werden Liniensignaturen in Kombination mit geometrischen Knotenpunktsignaturen konzipiert, die je nach Abfrage zu unterschiedlichen qualitativen Aussagen kombiniert und durch Richtung- und Zeitsymbolik ergänzt werden können.

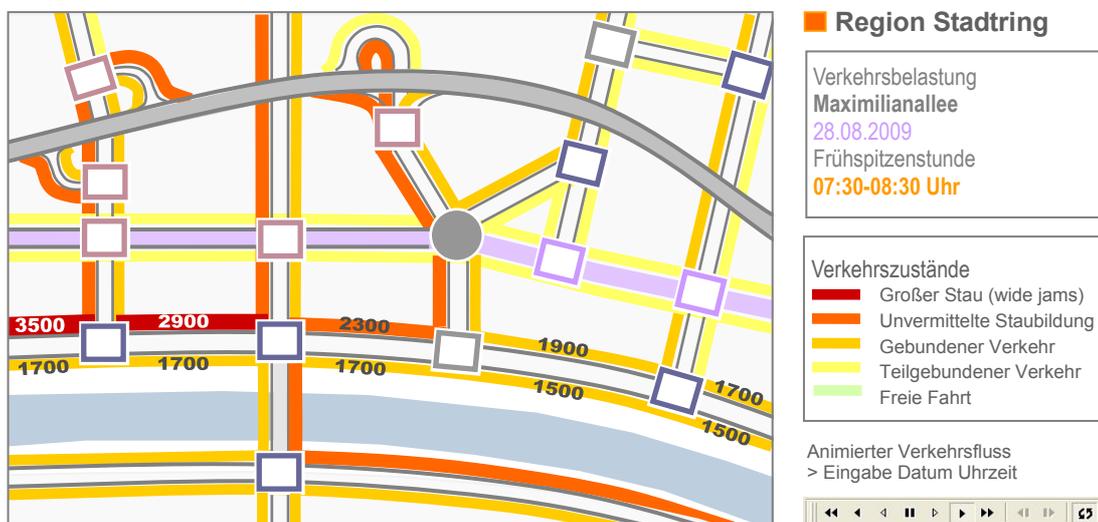


Abb. 25: Kombination LSA-Klassifikationen mit dynamischer Verkehrsbelastung

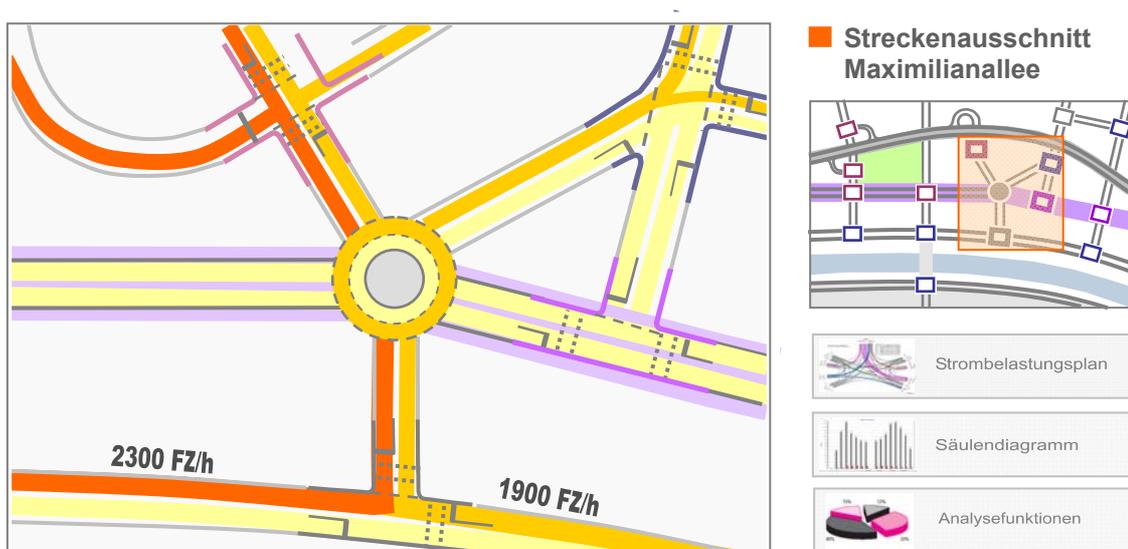


Abb. 26: Kombination LSA-Klassifikationen, Verkehrsbelastungen, Markierung

Bei Detailbetrachtungen wie z. B. Teilnetz betrachtungen können reduzierte Grundrissdarstellungen zeitliche Attribute (z. B. animierter Zeitlauf) hinzugefügt werden.

Prinzip ist es, Anfragen visuell mit Grundelementen zu bedienen, die über Optionen erweiterbar sind. Die Symbolisierung der Grundformen, Kenngrößen und Relationen eines Verkehrslaufes ermöglichen die Verknüpfung der mikroskopischen mit der makroskopischen Ebene. Dynamische Zusammenhänge können durch diesen strukturellen Aufbau visualisiert werden.

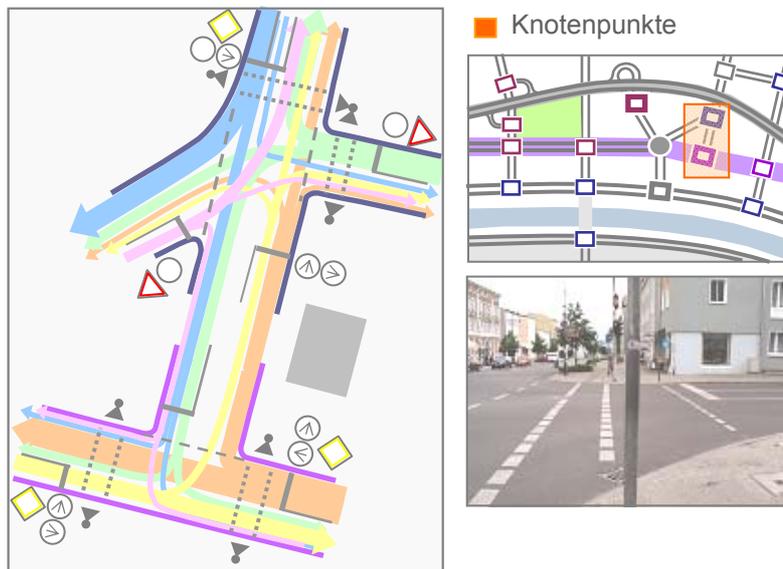


Abb. 27: Kombination Strombelastungsplan, Markierung, LSA-Ausrüstung, Verkehrszeichen

Phasen der Lichtsignalanlagen können simuliert und zugleich in Zusammenhang mit den Belastungsstärken pro Fahrbeziehung animiert dargestellt werden. Streckenweise wird die Durchlässigkeit mit gleichzeitigem Staufbau abgebildet sowie mikroskopisch ein Phasenablauf pro Knoten simuliert.

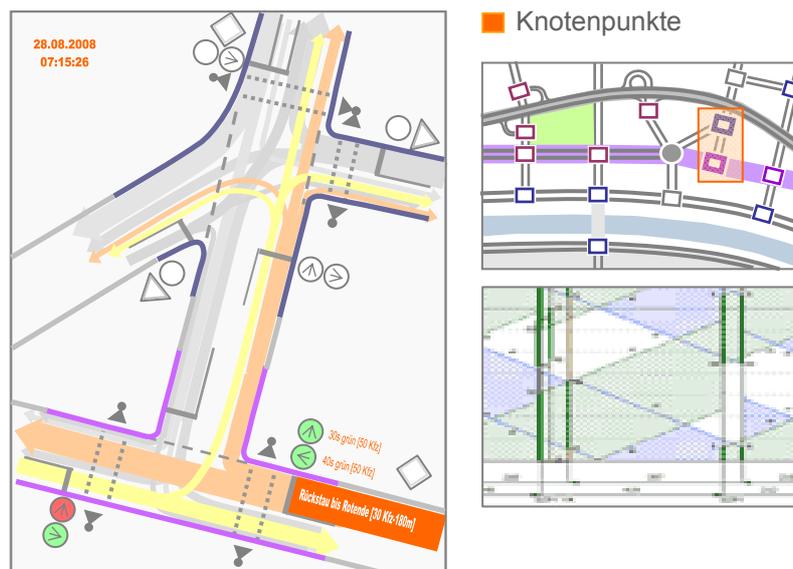


Abb. 28: Filtern der Informationen, Darstellung zweier Ströme, Phasenabläufe, Rückstau

Ob Zeitachse oder Zeitdiagramme, die Zeit als Darstellungsmittel dient dem Visualisieren dynamischer Prozesse. Auf Zeitachsen können Zeitpunkte und Zeitbereiche abgebildet werden. Zeitdiagramme können Objekte und ihre Zustände darstellen. Es wird der Zusammenhang zwischen Zustandswechsel im Verlauf der Zeit veranschaulicht. Das Zeit-Weg-Diagramm beschreibt den Weg als Funktion der Zeit in einem Koordinatensystem mit Weg- und Zeitachse [Bu07]. Die Differenzierung des Geschwindigkeitsverhaltens sowie die Berechnung der Bewegung aus der Wegstrecke und der dazugehörigen Zeitdauer werden in der Verkehrstechnik über das Zeit-Weg-Diagramm veranschaulicht. Die Zeit-Weg-Analyse kann aber auch mittels eines Raummodells visuell erfolgen. Unter Einberechnung der beschleunigten Fahrt (anfahen, überholen) und verzögerten Fahrt (bremsen) können Verkehrskenngrößen im Raum abgebildet werden.

Verkehrskenngrößen:

- Verkehrsstärke
- Verkehrsdichte
- Geschwindigkeit
- Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen
- Räumliche Abstände zwischen den Fahrzeugen

Wird das Fahrzeug mikroskopisch in der Raumzeit wiedergegeben, so sind es Punkte, die als Ereignisse im vierdimensionalen Raum betrachtet und über ein animiertes Fahrzeugsymbol visualisiert werden. Erfolgt eine makroskopische Betrachtung, so können einzelne Zustände schematisiert dargestellt werden. Über graphische Variablen können Stärke, Dichte und Weglücken veranschaulicht und mittels der dynamischen Variablen die Geschwindigkeit und Zeitlücken animiert dargestellt werden.

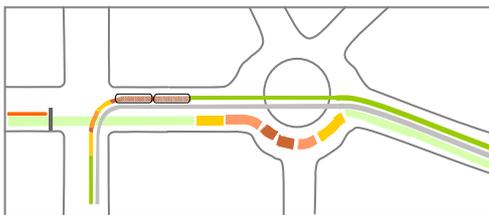


Abb. 29: Zeitlücken- und Geschwindigkeitsdarstellung des PV und ÖV Allgemein

Zeitabhängige Aussagen mittels Karto- oder Kartodiagrammen auf dem Geometriemodell abzubilden, bietet sich z. B. an Knotenpunkten an, die Stauzeiten und -zeitbereiche darstellen. Auch Einschaltzeiten von Lichtsignalanlagen in Beziehung zu Unfallhäufigkeiten oder Stromersparnisse können über Kartodiagramme kausal betrachtet werden.

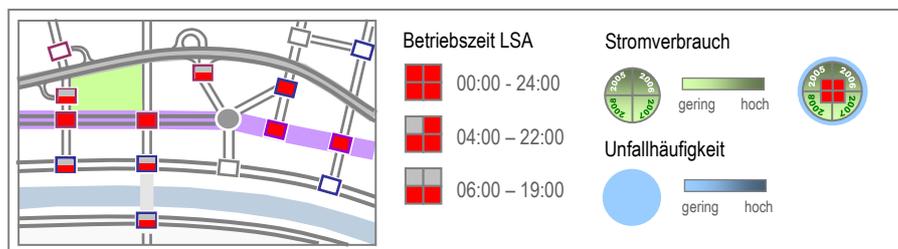


Abb. 30: Betriebszeiten, Stromverbrauch von Lichtsignalanlagen und Unfallhäufigkeiten

## 5.2.5 Prüfung der geeigneten Methoden

Die Herangehensweise an eine standardisierte Symbolisierung innerhalb verschiedener Ebenen zeigt, dass die Verständlichkeit und Eindeutigkeit der zu dekodierenden Signaturen zum einen durch das Wiedererkennen und zum anderen durch die Klarheit der Symbolik gewährleistet werden kann. Die Reduzierung der Farb- und Formgebung erleichtert die Zuordnung verschiedener Thematiken. Insbesondere das Zurücksetzen der Farbgebung in Grautöne und das farbliche Hervorheben relevanter Informationen gestattet ein Filtern von Informationen. Auch die Reduzierung der Symbolisierung auf geometrische Grundformen ist eine geeignete Methode, um die Lesbarkeit bei einer erhöhten Informationsdichte zu bewahren. Das sparsame Einsetzen von Text und Signatur soll die Assoziation verschiedener Problematiken auf den Kern bringen, d. h., den Betrachter nicht durch Überfrachtung ablenken. Über Interaktion des Benutzers können die zur Wahl stehenden Analysemethoden, Diagrammdarstellungen etc. aufgerufen und eingeblendet werden. Der strukturierte Bildschirmaufbau soll dabei mit seiner einfachen Menüführung eine Hilfestellung zum schnellen Navigieren sein.

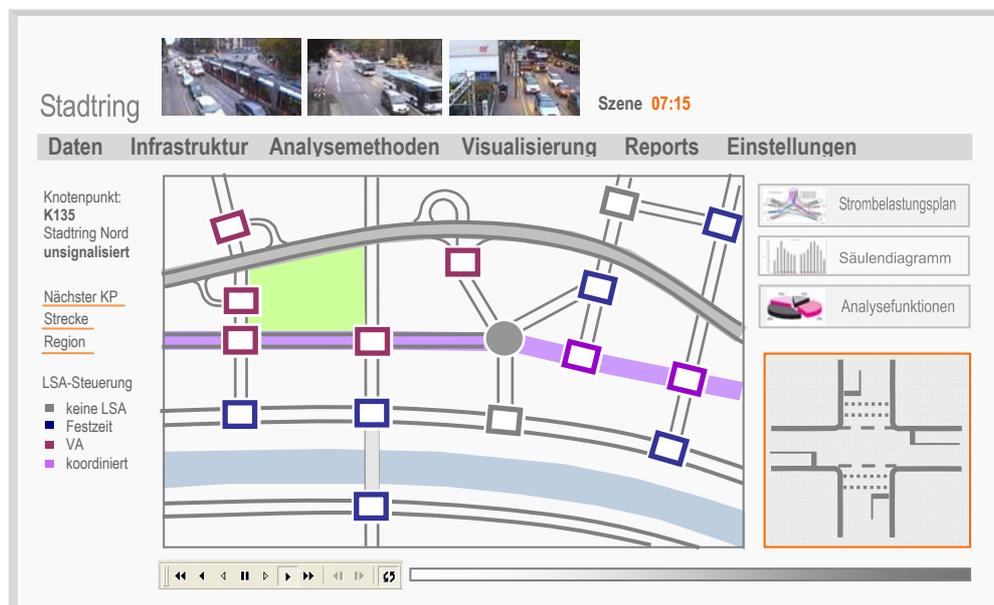


Abb. 31: Gestaltung, Aufbau und Nutzerführung

Die verschiedenen Möglichkeiten, dynamische Prozesse mit Hilfe von GIS-Analysefunktionen (räumliche Datenabfrage, Verscheidungen, Interpolation, Zonen- und Puffergenerierung), verkehrstechnischen Berechnungsverfahren und Simulationen zu modellieren, ist ein integrativer Ansatz, der eine ganzheitliche Betrachtungsweise durch die verbindenden Visualisierungsmethoden erst ermöglicht. Visuelle Analysen können Prozesse in einer bestimmten Zeit im Raum in die Gegenwart und Zukunft transferieren. Sie tragen dazu bei, ein Modell zu bilden, das aufgrund von Regelmäßigkeiten und Beobachtungen (u. a. Messungen) das Wahrgenommene verständlich plagierte. Sich ein Bild machen, z. B. über Bewegungsvorgänge, Objekte lokalisieren und wesentliche Informationen erfassen, sind die wesentlichsten Aufgaben einer eindeutigen Wahrnehmung. Welche Verarbeitungsprozesse sind eng miteinander verbunden? Die codierte räumliche Position der Objekte, die Bewegung als Animation, die Addition mehrerer Formen und Varianten? Es soll untersucht werden, wie die Grundsätze, klare Symbolik, Vermeidung von Redundanzen sowie schnelles Entschlüsseln von Informationen durch das vorliegende Visualisierungsmodell umgesetzt werden und wie dieses Modell wahrgenommen wird. In dem folgenden Kapitel Wahrnehmung und Interaktion sollen der Verarbeitungsprozess und die Wirkungsweise näher betrachtet werden.

### 5.3 Wahrnehmung und Interaktion der Präsentation

Die Auswertung und Interpretation des Visualisierungsmodells, die Wirkungen der visuellen Analyse auf den Betrachter, der auf unterschiedliche Modellansätze und -berechnungen zurückgreift, soll nun evaluiert werden. Kann das Modell ohne hohen mentalen Verarbeitungsaufwand die Informationen transformieren? Können Bewegungen in Zusammenhang mit verkehrstechnischen Fragestellungen wahrgenommen werden? Im Bereich der Interaktion zwischen Benutzer und Modell wird die analytische Evaluationsmethode angewendet. Zur Bewertung des Visualisierungsmodells und dessen Wirksamkeit wird eine Expertenbefragung durchgeführt. Für die Analysierung des Sachverhalts, der Konzeption und Gestaltung werden Kriterien der kognitiven Prozesse (Erfassen dynamischer Prozess), der Wirkungsweise von Aktionssequenzen, Designkriterien und textverarbeitende Inhalte (Zielstruktur – Hauptziel, Zwischenziel) betrachtet.

#### 5.3.1 Evaluationskriterien

Zielsetzung der Evaluation ist es, die Wirkungsweise der visuellen Analyse zu testen. Die Kriterien Kommunikation, Transparenz, Relevanz und letztendlich Intervention sollen den Entscheidungsprozess aufgrund visueller Präsentationen bewerten [De02].

- **Kommunikation**  
Im ersten Schritt werden das Layout und die Zielstruktur ermittelt. Der Zugang zu Informationen wird kommunikativ gestaltet. Die Kommunikationsschnittstelle wird nach ihrer Offenheit und Zugänglichkeit geprüft. Das Layout, die Funktionsweise der Zielführung, ist für schnelles Kommunizieren maßgebend. Die Bewertung umfasst den strukturellen Aufbau einzelner Themenfelder, die textliche und farbliche Gestaltung sowie die navigierende Zielführung in Unterbereiche. Bewertet wird die Integration von Kommunikationstechniken (Menüelemente, Video- und Aktionssequenzen, Prozessaufrufe, Analysemethoden), seien sie verbal, bildhaft oder szenisch. Ziel ist es, dass der Benutzer die Aussagen über die visuelle Darstellung vollständig erfasst und seine Wissensbildung interaktiv durch die Gesamtsystematik des dynamischen Raummodells intensiviert.
- **Transparenz**  
Die Offenlegung von Zielen und Methoden sind die Hauptmerkmale einer transparenten Gestaltung. Räumliche und verkehrstechnische Analysemethoden sind in ihrer Anwendungsvielfalt eindeutig zu definieren. Systematische Strukturen und die Visualisierung der Zusammenhänge für eine transparente Erkenntnisgewinnung sind hierbei relevant. Denn die dynamische Prozessbildung, die weitere offene Fragen bearbeitet und für unterschiedlichste Methodentypen Ergebnisse bereitstellt, basiert auf dem Anknüpfen von Ergebnissen. Die Präsentation der Ergebnisse, die Methodik der Datenanalyse und die Darstellung der Zusammenhänge werden in ihrer Transparenz geprüft.
- **Relevanz**  
Die Relevanz dynamischer Prozessoperatoren richtet sich nach den Fragestellungen und Thematiken. Es werden Darstellungsmethoden hinsichtlich der Fragestellungen bewertet, die relevante Informationen herausfiltern. Im Zentrum der Befragungen stehen die Abbildung relevanter Informationen und die gestalterische Relevanz im Hinblick auf die räumliche und zeitliche Wahrnehmung komplexer Relationen.
- **Intervention**  
Die Wirksamkeit der Methoden zur systematischen Erfassung dynamischer Prozesse und die daraus resultierende Handlungsfähigkeit werden untersucht, d. h. die Wirksamkeit von Interventionen basierend auf der visuellen Analyse.

### 5.3.2 Aufbau der Expertenbefragung

Evaluation ist die systematische Untersuchung des Nutzens eines Modells. Zur Prüfung der angewandten Methoden, der Datenfilterung und -integration, ihrer Analysen und Präsentationsarten wird die Form der analytischen Evaluation gewählt, die Expertengespräche. Die formulierten Fragen werden nach den Standards der Evaluation [De02] folgend aufgebaut:

- Nutzer und Nutzerinnen
- Evaluationszwecke
- Evaluationsgegenstände
- Evaluationsfragestellungen
- Bewertungen
- sowie festgehaltene Ergebnisse.

Evaluationsfragestellungen beginnen mit Informationen über Nutzer und Nutzerinnen und den Zweck der Befragungen. Ihnen werden Beispieldarstellungen zur Beurteilung des Visualisierungsmodells vorgelegt. Die Evaluationsfragen teilen sich auf in die Bereiche Kommunikation, Transparenz, Relevanz und Intervention. Beurteilt werden die konzipierten Visualisierungsmethoden, die zur Verfügung stehenden Analysemethoden, der Zugriff auf echtzeitnahe Daten und der Gesamteindruck. Dabei wird die Wirkungsweise nach mikroskopischen und makroskopischen Kriterien sowie nach graphischen, verkehrstechnischen und raum-zeitlichen Gesichtspunkten geprüft.

Tabelle 3: Aufbau der Expertenbefragung

Kommunikation	Layout
	Struktur
	textliche Gestaltung
	graphische Gestaltung
Transparenz	Wirkungsweise mikroskopischer Methoden
	Wirkungsweise makroskopischer Methoden
Relevanz	Lesbarkeit
	Eindeutigkeit
	Prägnanz
	mikroskopische Genauigkeit
	makroskopische Übersichtlichkeit
Intervention	Wahrnehmung dynamischer Prozesse
	Intervention anhand visueller Analysen
	Handlungsfähigkeit

### 5.3.3 Ergebnisse der Expertenbefragung

Für die Expertenbefragung wurden Personen gewählt, die maßgeblich am Entwicklungs- und Entscheidungsprozess beteiligt sind. Um die Sicht regionaler und kommunaler Entscheidungsträger im Bereich Verkehr zu spezifizieren, wurden Modellbeispiele aus der makroskopischen und mikroskopischen Ebene sowie des gesamten Modellaufbaus vorgestellt.

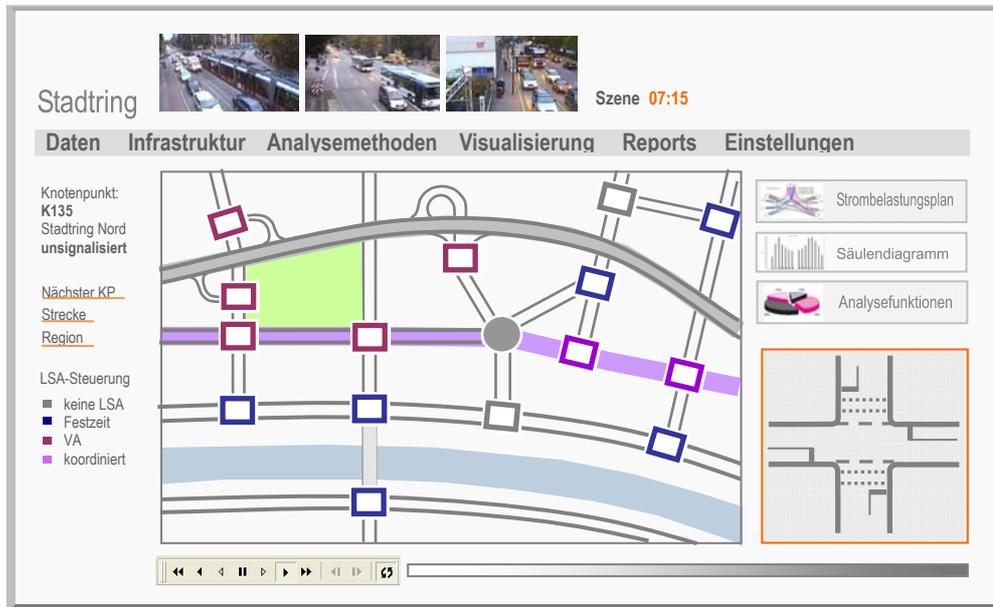


Abb. 32: Visualisierungsmodell

Die Auswertung der Befragungen ergab eine übereinstimmende Akzeptanz über die Notwendigkeit eines visuellen Modells. Gerade im Bereich Verkehr ergänzen visuelle Analysen algorithmische Verkehrsanalysen, und durch das Verknüpfen verschiedener Methoden können vor allem dynamische Aspekte zeitnah abgebildet werden.

Positive Bewertungspunkte der Befragten waren die einheitliche Symbolisierung in allen Modellebenen sowie die Reduzierung von Inhalten durch die interaktive Trennung von wesentlichen und nebensächlichen Informationen. Besonders die im Detailbereich schematisierten Grundformdarstellungen ermöglichten eindeutige Zuordnungen gewünschter Thematiken ohne die Gefahr einer passiven Reaktion auf mögliche Informationsüberflutung. Die im Modell angebotenen handlungsorientierten Komponenten, wie die klar strukturierte Zuordnung der Daten im Infrastrukturtel oder die differenzierten Analysetools, deren Ergebnisse spezifiziert über das Raummodell nicht nur abgebildet werden, sondern mit Hilfe von Geoinformationsfunktionen visuelle Analysen anbieten, wurden im Bewertungsbereich Kommunikation und Intervention (Wiedererkennen, Vergleichen und Entscheiden) als unterstützend beurteilt. Eine zielgerichtete visuelle Suche einzelner Aspekte über Kriterien des Visualisierungsmodells förderte das methodische Analysieren.

Positiv bewertet sind auch die zusätzlichen Animationsläufe der Belastungen oder Phasenabläufe in der mikroskopischen und makroskopischen Ebene, die bei Bedarf dynamische Prozesse in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen auf anschauliche Weise visualisieren. Unterschiedliche Wirkungsweisen bezüglich der graphischen Umsetzung erzielte die selektive Betrachtung gegenüber komplexen Darstellungen. Selektive Auswahlmöglichkeiten führten zur Annahme unvollständiger Datenerfassung bzw. -aggregation.

In den folgenden Bereichen Kommunikation, Transparenz, Relevanz und Intervention werden nachstehend die Bewertungsergebnisse zusammengefasst.

### **Kommunikation**

Das Modelllayout wurde von allen Befragten als übersichtlich und gut strukturiert bewertet. Die in der Menüleiste kurze und prägnante Aufteilung in Datengrundlage, Analyse und Visualisierungsmethoden sowie deren gut strukturierte Menüunterpunkte und der Verzicht auf doppelreihige Menüleiste, Icons u. a. Zusatzgraphiken gewährleistete für alle Befragten einen schnellen Zugriff auf beliebige Handlungs- und Analysekomponenten. Die sofortige Erfassung der Region und folgend der Knotenpunktsbezeichnung wurden positiv bestätigt. Die reduzierte Gestaltung des Textes ist durch die seitliche Anordnung leicht zu erkennen. Die Hauptthematiken, die räumlich zentral im Bild visualisiert werden, konnten differenziert und zügig wahrgenommen werden.

Die über die rechte Navigationsleiste angebotenen Analyseergebnisse in Form von Diagrammen und die darunter angeordnete Detailansicht bzw. in der mikroskopischen Ebene die Übersichtsdarstellung wurden ebenfalls als gut wahrnehmbar eingestuft.

Die graphische Gestaltung wurde als dezent und somit nicht überlastet und dennoch informativ bewertet.

### **Transparenz**

Das Handling der verschiedenen Ebenen wurde positiv beurteilt. Die Kombination der mikroskopischen und makroskopischen Darstellungen verwirrte nicht, sondern unterstützte die objektbezogene analytische Betrachtung. Die regionale Betrachtung, z. B. eine Streckenanalyse, die zwischen einer mikroskopischen und makroskopischen Betrachtungsweise liegt, kann für erste Einschätzungen wesentlich schnellere Ergebnisse liefern als reine mikroskopische oder makroskopische Betrachtungen. Die Wahlmöglichkeit der Methoden wurde dabei besonders hervorgehoben.

### **Relevanz**

Die visualisierten Fachinformationen und die Möglichkeit, Raum und Zeit statisch und dynamisch abzubilden, wurden von allen Befragten als eine gut ergänzende Analyseform eingeschätzt. Die Abgrenzung der Information und dennoch die Vielfalt erhöht die Anwendungsbreite des Modells.

Die Eindeutigkeit steht für die meisten Befragten in Zusammenhang mit einer Widerspruchsfreiheit. Die Symbolisierung muss zweifelsfrei klar definiert und nicht beliebig verwendbar sein.

### **Intervention**

Die Erkenntnisgewinnung aus dem konzipierten Visualisierungsmodell wurde vornehmlich befürwortet. Die Visualisierung der räumlichen und zeitlichen Aspekte wurde für komplexe dynamische Prozesse als notwendig erachtet und in dieser vorgestellten Form als sehr positiv bewertet. Der Zeitaspekt in Szenarien und Momentaufnahmen konnte in diesem Modell statisch und dynamisch gut umgesetzt werden. Das Darstellen der Zustandsanalysen und das visuelle Erkennen von Problemen wurden für die Entscheidungsfindung und den Handlungsbedarf durch das Verknüpfen von verkehrstechnischen und geoinformatischen Analysemethoden als gewinnbringend eingeschätzt. Insgesamt wurde das Visualisierungsmodell mit lose eingebundenen Analysetechniken aus verschiedenen Fachbereichen als ein zukunftsweisendes Planungs- und Entscheidungsmittel begutachtet.

### 5.3.4 Modifizierung des Visualisierungsmodells

Die Expertenbefragung ergab neben den positiven Bewertungen auch Kritikpunkte und Anmerkungen, die in das Modell eingearbeitet wurden. Modifiziert wurden die Legendendarstellung und Maßstabsnavigation im linken Modellbereich, die zu dezent und dadurch nicht eindeutig und schnell unterscheidbar wirkten. Ein wesentlicher Kritikpunkt war auch die selektive Auswahl einzelner Belastungsströme in der makroskopischen Ebene. Diese führte eher zur Annahme einer Unvollständigkeit der Datenaggregation aufgrund multipler und heterogener Datenquellen. Die Anpassung erfolgte dahingehend, dass eine vollständige Belastungsdarstellung in der makroskopischen Ebene realisiert wurde und nur selektiv die Belastungszahlen hinzugefügt werden konnten. Hingegen in der mikroskopischen Ebene und weiteren Zwischenebenen wurden einzelne Ströme farblich hervorgehoben und somit einzelne Problempunkte herausgefiltert. Angestrebt wird in diesem Modell auch eine Vereinheitlichung der Symbolik, die jedoch modifizierbar bleibt. Dabei ist natürlich das Wiederverwenden z. B. festgelegter Farben zu beachten, um Doppel- oder Mehrdeutigkeit zu vermeiden. Die angemerkte Widerspruchsfreiheit wurde für die gesamte Symbolisierung und Schematisierung ausbedingt.

## 5.4 Zusammenfassung

Die Schritte eines verkehrstechnischen Visualisierungsprozesses sind methodisch auch auf andere Fachthemen anwendbar. Die Herangehensweise ist so strukturiert, dass sie prinzipiell alle Schritte eines Visualisierungsprozesses beschreibt und sich auf andere Bereiche transferieren lässt. Beginnend mit der Datenaggregation wird die Erfassung und Archivierung von Zeitdaten als ein wesentlicher Bestandteil des Modells beschrieben. Als Voraussetzung für die Datenanalyse, die so Zustandsformen und Bewegungsvorgänge aggregieren und archivieren kann, wird das Geometriemodell mit zeitlich relevanten Daten verknüpft, um einzelne Objekte zeitbasierend zu visualisieren. Darauf aufbauend werden beispielhaft Visualisierungsmethoden für statische und dynamische Elemente vorgestellt. Die Unterscheidung in mikroskopisch und makroskopisch trennt die verschiedenen Darstellungselemente klar voneinander und ermöglicht eine objektorientierte visuelle Informationsverarbeitung. Am Beispiel der Grundformen werden Widererkennungsmerkmale verdeutlicht, die korrespondierend während des Prozesses wirken. Im Vordergrund stehen das Betrachten im Gesamtzusammenhang und das Selektieren einzelner Darstellungen. Die Prägnanz und Ähnlichkeit der konzipierten Symbolik hilft dem Betrachter, Zusammenhänge zügig zu erfassen und Fragestellungen sowohl global als auch differenziert zu untersuchen.

Wie das Visualisierungsmodul in seiner Struktur und Form wirkt und welche Methoden sich eignen, wurde an Beispielen dargestellt und durch Befragungen einzelner Experten evaluiert.

Die Auswertung ergab eine positive Bewertung mit verschiedenen Anmerkungen, die visuelle Analysen befürworten und zum Teil einfordern. Die verschiedenen Sichtweisen im Hinblick auf einzelne Darstellungsmethoden wurden aufgenommen und teilweise im Modell realisiert. Gewünscht wurde der Einsatz eines solchen Modells in unterschiedlichen Bereichen wie der Verkehrsplanung, Verkehrslenkung und im Bereich Verkehrsmanagement, aber auch im Bereich Unfalldaten, Kostenplanung, Raumstruktur und Stadtplanung.

## 6 Schlussbemerkungen

Die visuelle Analyse hat sich neben den fachspezifischen Analysemethoden als eine effiziente Form der Informationsbewältigung entwickelt. Die rasch wachsenden Datenmengen, die durch einfache Algorithmen nicht mehr allein verwertet werden können, benötigen visuelle Brücken, um wichtige Informationen aus einer Reihe von Daten filtern, vergleichen, neu entdecken und assoziieren zu können. In dem vorgestellten Modell werden automatische Analysetechniken mit sorgfältig konzipierten Visualisierungsmethoden verknüpft und dynamisch im Raum abgebildet.

Die gemeinsame Basis bildet ein räumliches Bezugsmodell, das unabhängig voneinander erhobene Informationen miteinander in Bezug bringt. Funktionen aus der räumlichen Geoanalyse werden mit Analysemethoden verschiedener Bereiche vereint, deren Grundlage eine geeignete Normung und intelligente Filterung aller zu visualisierenden Elemente ist. Dynamische Raumphänomene beschreiben positionale Relationen zwischen bewegten Ereignissen [El05]. Am Beispiel Verkehr werden Methoden beschrieben, die der wachsenden Komplexität dynamischer Veränderungen und Mobilitätsverschiebungen und deren erforderlichen Handlungstaktiken gerecht werden.

Die Integration räumlicher und zeitlicher Daten wird bereits während der Datenerhebung und -archivierung realisiert. Der Modellaufbau ist in seiner Konzeption dynamisch modifizierbar. Sich ändernde Softwarebausteine können durch eine offene, verteilte, komponentenbasierte und objektorientierte Architektur herausgelöst, verändert oder neu integriert werden. Diese Herangehensweise verbindet flexibel Analysemethoden aus dem verkehrstechnischen und geoinformationstechnischen Bereich. Die visuelle Umsetzung und Interpretation komplexer Zusammenhänge, die dynamische Abbildung verschiedener Prozesse wird in diesem Modell nach diskreten und kontinuierlichen sowie nach makroskopischen und mikroskopischen Merkmalen konzipiert. Dieser strukturelle Ansatz unterstützt das Filtern relevanter Informationen und vermeidet eine Überbeanspruchung der Entscheidungsträger. Die vorgestellten Visualisierungsmethoden, die punktuell, linien- oder flächenhaft aufgebaut sind, orientieren sich an assoziierenden Grundformen und Signaturen.

Die Evaluationsergebnisse zeigen eine hohe Akzeptanz der gewählten Methoden und konzipierten Symbolik. Die integrative Herangehensweise, Daten erst zu analysieren und dann gefiltert zu visualisieren und auf Anfrage Detailergebnisse abzubilden, erschien allen Befragten als der effizienteste Ansatz. Auch die Möglichkeit, Prozesse wiederholt animiert ablaufen zu lassen, ist eine erfolgreiche Methode, Information aus unterschiedlichen Sichtweisen zu betrachten.

Das Modell befindet sich in der Konzeptionsphase. Ein Einsatz wird gewünscht, ist aber nur in Teilbereichen realisiert. Ansätze auf der makroskopischen Ebene werden zum Beispiel durch Verkehrsrechner in Städten verwirklicht, die auf Geodaten zurückgreifen und neben Grundkarten Symbolisierungen anstreben. Die Verknüpfung mikroskopischer und makroskopischer Methoden auf der Basis eines mehrschichtigen Raummodells ist bisher nicht realisiert worden.

Das Filtern fachspezifischer Informationen und der gezielte Einsatz von Simulations- und Animationstechniken auf der Grundlage eines normierten Visualisierungsmodells eignen sich für verkehrstechnische und räumliche Analysen. Um Entscheidungsfindungen und den Handlungs- und Kommunikationsraum optimal zu unterstützen, sind automatisierte und dennoch flexible Visualisierungsmethoden in Form von Andock-Modulen in einer serviceorientierten Architektur weiterzuentwickeln.



---

## Literaturverzeichnis

- [Ar02] Arnberger, E.: Thematische Kartographie 4. Aufl., Braunschweig, Westermann Verlag, 2002, 3141603006
- [AS08] Asche, H.: Grundlagen der Kartographie, Symbolisierung, Universität Potsdam, IfG, Geoinformatik, 2008
- [Ba04] Bauer, A., Günzel, H.: Das Multidimensionale Datenmodell. Data-Warehouse-Systeme Architektur, Entwicklung, Anwendung, 3, Heidelberg, Dpunkt Verlag 20089783898645409
- [Ba04] Baum, S.: Mostly Data Formats and Storage, Dept. of Oceanography Texas, A&M University, 2004, <http://stommel.tamu.edu/~baum/graphics-formats.html>
- [Ba05] Bartelme, N.: Einführung Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen 4., Berlin, Heidelberg, New York Springer 2005 2, 65, 125; 3540202544, 9783540202547
- [Ba07] Bar, W.: Verwaltung geowissenschaftlicher 3D Daten in mobilen Datenbanksystemen, Universität Osnabrück, Dissertation 2007, [http://elib.ub.uni-osnabrueck.de/publications/diss/E-Diss693\\_thesis.pdf](http://elib.ub.uni-osnabrueck.de/publications/diss/E-Diss693_thesis.pdf).
- [Ba76] Baldwin, W. G.: V. Graphicacy American Cartographer 1976, 3
- [BE08] Assembly Model Specification BEA Systems, International Business Machines Corp , IONA Technologies, Oracle, SAPAG, Siebel Systems, Sybase SCA Service Component Architecture 2008 <http://www.osoa.org/display/Main/The+Assembly+Model>
- [Be82] Bertin, J.: Graphische Darstellungen und die graphische Weiterverarbeitung der Information. Berlin, Walter de Gruyter, 1982, ISBN 3110069008
- [Ben04] Benenson, I., Torrens, P. M.: Automata-based modeling of urban phenomena Geosimulation Computers, Environment and Urban Systems, 28, 1 Wiley, 2004, 9780470843499
- [Bi07] Bill, R.: Grundlagen der GEO-Informationssysteme, 15, Heidelberg, Wichmann, 2007, 25, 2233879073759, 9783879073757
- [Bl02] Blaschke, T.: Bildverarbeitung in einer integrierten GIS/Fernerkundungsumgebung, Fernerkundung und GIS, Karlsruhe, Wichmann, 2002, 29783879073696
- [Bl05] Blinn, J. F.: What is a Pixel? IEEE Computer Graphics and Applications, 2005, 25830272-1716
- [Bo06] Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobson, I.: Das UML-Benutzerhandbuch, 2., München, Addison-Wesley, 2006, 37-40, 2583827322952
- [Br01] Simulation Bibliographisches Institut, Brockhaus multimedial, Mannheim, Brockhaus AG, 2001, 3411069139
- [Br96] Bry, F., Seipel, D.: KI Künstliche Intelligenz, Informatik Spektrum, Deduktive Datenbanken, Berlin, 1996
- [Bu07] Burg, H., et al.: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2007, 55, 3834801720
- [Ch76] Chen, P., Pin-Shan: The Entity-Relationship Model--Toward a Unified View of Data, ACM Transactions on Database Systems 0362-5915 ACM-Press 1976 100362-5915, <http://csc.lsu.edu/news/erd.pdf>

- [Cl98] Clausen, N.: OLAP – Multidimensionale Datenbanken, 2., Addison-Wesley, 1998, 382731402X
- [Da06] Dabringer, C.: Moving Objects Databases, Universität Klagenfurt, Projekt Domino, Klagenfurt, 2006
- [De02] DeGEval: Gesellschaft für Evaluation e.V., Standards für Evaluation, 4., Köln, 2002, 3000090223, <http://www.degeval.de/calimero/tools/proxy.php?id=18054>
- [De03] Demelt, A.: Temporale Datenhaltung, SIGS-DATACOM GmbH Java Spektrum, 01, 2003, Troisdorf 2003 [http://www.excellent.de/download/demelt\\_JS\\_05\\_03.pdf](http://www.excellent.de/download/demelt_JS_05_03.pdf)
- [DW06] Geyken, A.: Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Digitales Woerterbuch der deutschen Sprache des 20. Jahrhunderts, 2006, 2008 <http://www.dwds.de>
- [ESR07] ArcGIS: Geostatistical Analyst, ESRI Geoinformatik GmbH ArcGIS, 2007, <http://esri-germany.de/demos/geostatistical-analyst.html>
- [Fo01] Forlizzi, L. et al.: Algorithm for Moving Objects Databases, Universität Hagen, 2001, <http://www.informatik.fernuni-hagen.de/import/pi4/papers/AlgMovObj.pdf>
- [Fr98] Francis, B. et al.: The Use of Visualization in the Examination of Categorical Event History, Blasius, J., Greenacre, M.: Visualization of Categorical Data, Academic Press, 1998, 50, 0122990455
- [Ga07] Gather, U. et al: Forschungsband Dortmunder Zentrum für Modellbildung und Simulation, Universität Dortmund, Positionspapier DoMuS Dortmund, 2007, <http://www.domus.uni-dortmund.de/dienst/de/content/zielsetzung/zielsetzung.html>
- [Ge07] Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Geodäsie und Geoinformatik Geoinformatik-Service, 2007, <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/lexikon.asp>
- [Ge98] Geers, N.: Parallelrechner und Parallelisierungskonzepte, Universität Karlsruhe IBM RS/6000 2008, <http://www.rz.uni-karlsruhe.de/rz/hw/sp/online-kurs/PARALLELRECHNER/node1.html>
- [Go98] Goralwalla A., Tamer, M., Szafron, D.: An Object Oriented Framework for Temporal Data Models, Etzion, O., Jajodia, S., Sripada, S.: Temporal Databases Research and Practice Berlin, Springer 1998, 1-353540645195, 9783540645191
- [Gr06] Gronau, N.: Potentiale Service-orientierter Architekturen gegenüber Client-Server-Architekturen, Universität Potsdam Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Electronic Government, 8. Paderborner Frühjahrstagung, Potsdam 2006
- [GS08] Lexikon Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock Geoinformatik-Service, 2008, <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/lexikon.asp>
- [Ha02] Hake, G., et al.: de Gruyter Lehrbuch Kartographie Visualisierung Raum-zeitlicher Informationen, 8., Berlin, Walter de Gruyter, 2002, 3110164043, 9783110164046
- [Ha02] Harper, S. Et al.: Management Application of an Agent-Based Model, Control of Cowbirds at the landscape scale, Gimblet, R.: Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling, Oxford University Press US, 2002, 105-124, 0195143361, 9780195143362
- [Ha03] Hao, H. : What Is Service-Oriented Architecture, O'REILLY School of Technology 2003, <http://webservices.xml.com/pub/a/ws/2003/09/30/soa.html>
- [He08] Heuer, A., Saake, G.: Transaktion, Integrität & Trigger, Datenbanken Konzepte und Sprachen, 3., Heidelberg, mitp, 2008, 4099783826616648

- 
- [Ho04] Hopf, H-G.: Vergleich der Datenmodellierung mit UML und EERFH, Nürnberg, Semantische Datenmodellierung, H.41, 2004,5
- [Im72] Imhof, E.: 15 Die Gefüge, Methodisches und Übersicht , Thematische Kartographie, 3., Berlin, Walter de Gruyter, 1972, 99-106, 3110021226, 9783110021226
- [IT08] ITWissen DATACOM Online-Lexikon DATACOM Buchverlag GmbH, 2008, <http://www.itwissen.info/definition/lexikon>
- [Ka05] Kampshoff, S.: Integration heterogener raumbezogener Objekte aus fragmentierten Geodatenbeständen, Geodät. Inst. der RWTH Aachen, 2005
- [Ke03] Kemper, P.: Modellierung und Simulation diskreter und stetiger Systeme, Institut für Angewandte Informatik, Systemorientierte Informatik, Technische Universität Dresden, 2003
- [Ke06] Kemper, A., Eickle, A.: Eine Einführung Datenbanksysteme, H6, Oldenburg, Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2006, 51,19783486576900
- [Ke99] Kelter, U.: Einführung in Datenbanksysteme [http://pi.informatik.unisiegen.de/kelter/lehre/99w/lm/lm\\_dbi\\_991103\\_info.html](http://pi.informatik.unisiegen.de/kelter/lehre/99w/lm/lm_dbi_991103_info.html)
- [Kl01] Klein, U.: Verteilte Simulation im Ausnahmetoleranten städtischen Verkehrsmanagement Universität Magdeburg, Doctoral Thesis Magdeburg, 2001, <http://www.kompetenzzentrum-hla.de/modules.php?index=1&name=Content&pa=showpage&pid=39>
- [Kl04] Klügel, F.: Multiagentensysteme, Informatik VI, Universität Würzburg Verteilte Künstliche Intelligenz, 2004, <http://www6.informatik.uni-wuerzburg.de/teach/ss-2004/vki/>
- [Kn94] Kurt, F. : Kneubühl Teubner Verlag Repetitorium der Physik, 5, Teubner 199420-223519430126
- [Kö01] In: (Hrsg. Köster, F.; Friebe, J.: Räumlich explizite Simulationen zur Analyse von Umweltsystemen - am Beispiel der Kopplung von i-EPISIM-2 und INTERGIS, Hilty, L., Gilgen, P.: Proceedings of the 15th International Symposium Informatics for Environmental Protection, Zürich, Metropolis Verlag, 2001 S. 811-817
- [Kr03] Kraak, M.: The Space-Time Cube Revisited from a Geovisualization Perspective ITC, Department of Geo-Information Processing Enschede, 2003 [www.itc.nl/library/Papers\\_2003/art\\_proc/kraak.pdf](http://www.itc.nl/library/Papers_2003/art_proc/kraak.pdf)
- [Kr04] Krcmar, H.: Informationsmanagement, 4., BerlinSpringer-Verlag GmbH & Co. KG, 2003, 24I, 3540230157
- [Kü 03] Küchlin, W.: Symbolisches Rechnen, Wilhelm-Schickard-Institut für Informatik, Universität Tübingen, Verteilte Systeme, 2003 <http://www-sr.informatik.uni-tuebingen.de>
- [La05] Laurini, R., Bres, S.: The Netherlands Revised Selected Papers, Visual Information and Information Systems, 8th International Conference, VISUAL 2005, Amsterdam Springer, 2005, 3540304886, 9783540304883
- [LA92] Langran, G.: Time in Geographic Information Systems, London, Taylor & Francis Travel / General 1992, S. 22, S. 41, S. 54 0748400036
- [Lo04] Lorenz, P.: Proof Animation Institut für Simulation und Graphik Simulation und Animation <http://isgwww.cs.uni-magdeburg.de/pelo/sa/sim1.php>
- [Lu02] Ludewig, J.: SESAM – Simulationssystem, Universität Stuttgart, SESAM – Software-Engineering-Simulation durch animierte Modelle, 2002, <http://www.iste.uni-stuttgart.de/se/research/sesam/>

- 
- [Lu99] Luftner, J.: Datentypkonzepte und funktionaler Vergleich einiger objektrelationaler Datenbanksysteme, Institut für Informatik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jenaer Schriften zur Mathematik und Informatik Math/Inf/99/02Jena 1999
- [Ma02] Manthey, R.: Deduktive Datenbanken, HS A 2002 <http://www.informatik.uni-bonn.de/III/lehre/vorlesungen/Informationssysteme/WS02/fohlen/DB10b-2.pdf>
- [Ma89] Mattern, F., Mehl, H.: Diskrete Simulation – Prinzipien und Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung, Informatik Spektrum, 12, Heft 4, Heidelberg, Springer-Verlag 1989198-210
- [Me03] Merker, C.: Data Processing Business Intelligence OLAP & Data Warehousing 1 <http://www.dvs.informatik.uni-kl.de/>
- [Me03] Meinert, S.: Ein Framework zur Kopplung von GIS und Multi-Agenten-Systemen, Universität Osnabrück, Thesis, 2003, [www.usf.uni-osnabrueck.de/~smeinert/mafia.pdf](http://www.usf.uni-osnabrueck.de/~smeinert/mafia.pdf)
- [Me06] Meier, P.: Die Agentenkomponente, Agentenkomponenten – ein komponentenorientierter Ansatz zur (grafischen) Entwicklung von Multi-Agenten-Systemen, 1, München, Martin Meidenbauer Verlag, 2006, 67-108, 389975588X, 9783899755886
- [ME08] Visualisierung Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, MEYERS LexikonOnline 2.0 Meyer Verlag, 2008, <http://lexikon.meyers.de/meyers/Visualisierung>
- [ME91] MacEachren, A. M.: Animated maps of aggregate data. In: Cartography and Geographic Information System 1991 DiBiase Vol. 18. No. 4
- [ME94] MacEachren, A. M.: Visualization in Modern Cartography: Setting the Agenda. MacEachren, A. M. und Taylor, D. R. F. Visualization in Modern Cartography Great Yarmouth: Oxford Pergamon, 1994, 1-120080424155
- [Mi94] Miller, G.A.: The Magical Number Seven, Plus or minus Two. Some Limits on Our Capacity for Processing Information. In: Psychological Review 1956, 1994/101, 343-352  
101037/0033295X1012343
- [Mo85] Morris, C.M.: Zeichen, Sprache und Verhalten. Ullstein Taschenbuchvlg. 19853548350771
- [Mo88] Morris, C. W.: Grundlagen der Zeichentheorie, Fischer Wissenschaft, Ästhetik und Zeichentheorie, 7406, Frankfurt/M Fischer, 1988, 3-596-27406-0
- [Mo97] Moellering, H.: Full International Descriptions of the Transfer Standards, ICA Commission Spatial Database Transfer Standards 2, characteristics for assessing standards and full descriptions of the national and international standards in the world, 412, Oxford, PERGAMON, 1997
- [Mü04] Wilke-Müller, G.: R-Baum eine dynamische Index-Struktur für räumliche Suche, FB Informatik Universität Konstanz, Support for Non-Standard, Data Types in DBMS, Friedrichshafen, 2004, 22-24
- [Ne98] Nestorov, S.: Extracting Schema from Semistructured, DataProc. ACM SIGMOD Int. Conf. on Management of Data, Seattle, Washington, 1998,  
<http://infolab.stanford.edu/~evtimov/papers/extract-schema.pdf>
- [OA08] Billerica OASIS Open Composite Services Architecture Consortium, 2008 <http://oasis-openca.org/SCA-policy-framework>
- [Oe01] Oestereich, B., et al.: Vorgehensmodelle und Managementpraktiken, für die objektorientierte Softwareentwicklung, Erfolgreich mit Objektorientierung, 2, München, Oldenbourg, Wissenschaftsverlag, 2001, 3486255657

- 
- [Om08] OMG's Meta Object Facility Object Management Group Needham, 2008,  
<http://www.omg.org/mof/>
- [Or94] Ormeling, F.: Neue Formen, Konzepte und Strukturen von Nationalatlanten, Kartographische Nachrichten 4444 6 (1994)
- [Ot01] Ott, T., Swiaczny, F.: Modeling the real world, Springer Science Business Media Time Integrative Geographic Information Systems, Management and Analysis of Spatio-Temporal Data, 1, Berlin, Springer, 2001, 29, 54, 3540410163
- [Pe88] Petry, E.: Versionenverwaltung von Objekten durch ein erweitertes relationales Datenbanksystem, Dissertation, Zürich, ETH Zürich 1988  
<ftp://ftp.inf.ethz.ch/pub/publications/diss/th076.pdf>
- [Pe94] Petersen, M. P.: Cognitive Issues in Cartographic Visualization, MacEachren, A. M., Taylor, D. R. (eds.), Modern Cartography, 1994, Vol.2. Oxford
- [Po06] Pollari, F. et al.: A GIS-driven integrated real-time surveillance pilot system for national West Nile virus dead bird surveillance in Canada, International Journal of Health Geographics, 2006, 171476072X517
- [Ri05] Richter, J.-P., et al.: Serviceorientierte Architektur, Informatik Spektrum, 28, 2005, 5413–41601706012 (Print) 1432122X (Online)
- [Ro00] Rose, M.; Milbradt, P., Rose, M.: Numerische Approximation makroskopischer Verkehrsmodelle mit der Methode der Finiten Elemente, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover, 2000, [www.bauinf.uni-hannover.de/~milbradt/Veroeffentlichungen/2000/ikm/paper.pdf](http://www.bauinf.uni-hannover.de/~milbradt/Veroeffentlichungen/2000/ikm/paper.pdf)
- [Ro01] Rose, M.: Makroskopische Simulation der Verkehrsabläufe auf Autobahnen, Institut für Bauinformatik Hannover, Universität Hannover, 2001, [www.martinrose.net/pdf/Muenchen2001.pdf](http://www.martinrose.net/pdf/Muenchen2001.pdf)
- [Ru06] Rudolf, M.: LuftPro Business Systematik. Die universale Systemtheorie; ein interdisziplinäres Basismodell und allgemeingültiges Ordnungsschema allen Seins im Hinblick auf das grundlegende Wesen der Dinge, 1, Berlin, 2006, 3939000949, 9783939000945
- [Sc00] Schumann, H., Müller, W.: Visualisierung: Grundlagen und allgemeine Methoden, 1, Berlin Springer Verlag, 2000, 15, 171, 9783540649441
- [Sc97] Schnabel, W., Lohse, D.: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, 2, Berlin Verlag für Bauwesen, 1997, 3345005654
- [Se94] Steyaert, L. T., Goodchild, M.: Integrating Geographic Information Systems and Environmental Simulation Models: A Status review Environmental Information System Management and Analysis, Taylor & Francis 1994
- [SI08] What is HLASISO Simulation Interoperability Standards Organization, 2008,  
<http://www.sisostds.org/>
- [Sk07] Skulschus, M., Wiederstein, M.: Oracle, PL/sql und XML, 1, Berlin, Comelio Medien, 2007, 3939701106
- [Sp04] Specker, A.: Modellierung von Informationssystemen, 2, Zürich, vdf Hochschulverlag AG 2004, 100-1203728129844
- [Sp08] Brethenoux, E, Widjaja, P.: Data Mining Gartner Group, Search of Order; White Paper, See it in SPSS, SPSS Inc. Agenda, 2008,  
[http://www.spss.com/events/e\\_id\\_2246/presentation.ppt#4](http://www.spss.com/events/e_id_2246/presentation.ppt#4)

- [St00] Storrer, A.: Was ist hyper am Hypertext, Kallmayer, Werner: Sprache und neue Medien, Jahrbuch des Instituts für deutsche Sprache, 1999, 1, Berlin, de Gruyter,
- [St05] Struckmeier, J.: Was ist mathematische Modellierung?, Universität Hamburg, FB Mathematik, Mathematische Modellierung und Simulation, 2005
- [Th05] Thomas, M.: OLAP, University of Michigan Database Systems A Practical Approach to Design, Implementation and Management, Kaiserslautern, Addison-Wesley 20051204-12310321210255, 9780321210258
- [Tü99] Türker, C. SQL99 & SQL03 Objektrelationales SQL, Heidelbergdpunkt Verlag 3898642194
- [Vas04] Vasconcelos, E., Pinheiro, V., Furtado, V.: Mining Data and Providing Explanation to Improve Learning in Geosimulation, University of Fortaleza, Mestrado em Informática Aplicada 2004, <http://www.mentores.com.br/vasco/artigos/ITS2004.pdf>
- [We05] Weiß, G., Jakob, R.: Auswahl und Evaluierung der vorgestellten Methoden, Xpert.press, Agentenorientierte Softwareentwicklung, 1, Berlin, Springer, 2005, 23-30978354000624
- [Wi70] Witt, W.: Veröffentlichungen der Akademie für Raumforschung und Landesplanung: Thematische Kartographie, 49, 22, 52., Hannover, Gebrüder Jänecke, 1970
- [Wi89] Wilkes, W.: Der Versionsbegriff und seine Modellierung in CAD/CAM-Datenbanken. Informatik Spektrum, Berlin, Heidelberg Springer-Verlag 1987
- [Wo03] Wolfson, O., Xu, B.: Time-series prediction with applications to traffic and moving objects databases, International Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access, Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Data engineering for wireless and mobile access New York, Association for Computing Machinery, 2003, 56-60, 1581137672, [http://www.cs.uic.edu/~wolfson/mobile\\_ps/mobide03final.pdf](http://www.cs.uic.edu/~wolfson/mobile_ps/mobide03final.pdf)
- [Yu04] Yuan, M.: Accepted. Knowledge discovery of geographic dynamics in spatiotemporal data. H. Miller and J. Han: Geographic Data Mining and Knowledge Discovery 2CRC Taylor and Francis, 2008
- [Zi01] Zipf, A.: TGML – Extending GML by Temporal Constructs – A Proposal for a Spatiotemporal Framework in XML European Media Laboratory -EML, Heidelberg 2001, Walid G. Aref ACM-GIS 2001 Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, Michigan ACM Press, 2001, 941581134436
- Sc07] Schlaucher, A.: Data Warehouse-Anforderungen an Datenbanken. Hrsg.: Oracle Deutschland : 2007 [http://www.oracle.com/global/de/pub/knowhow/data\\_ware.html](http://www.oracle.com/global/de/pub/knowhow/data_ware.html).
- Sn87] Snodgrass, R.: The temporal query language TQuel. Hrsg.: ACM Trans: Database System. Band 12, No. 3 . S. 1987, <http://www.cs.arizona.edu/people/rts/sql3.html>.

---

## Anhang

### Fragebogen zur Expertenbefragung

Ort: \_\_\_\_\_  
Datum: \_\_\_\_\_  
Person: \_\_\_\_\_  
Tätigkeit: \_\_\_\_\_

### Kommunikation

Beurteilen Sie den Zugang zu Informationen in Bezug auf

Layout \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Struktur \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

textliche  
Gestaltung \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

graphische  
Gestaltung \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### Transparenz

Beurteilen Sie die Anwendung der Analysemethoden hinsichtlich der mikroskopisch und makroskopisch gewonnenen Erkenntnisse

mikro-  
skopisch \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

makro-  
skopisch \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

---

**Relevanz**

Sind relevante Informationen:

lesbar

---

---

eindeutig

---

---

prägnant

---

---

mikroskopisch  
detailgenau

---

---

makroskopisch  
detailgenau

---

---

**Intervention**

Beurteilen Sie die Bewegungswahrnehmung hinsichtlich der Zustandsänderungen (räumlich und zeitlich).

---

---

Erscheint Ihnen die visuelle Analyse neben den algorithmischen Berechnungsverfahren als ein probates Mittel zur Entscheidungsfindung?

---

---

Beurteilen Sie die gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf Entscheidungsfindungen.

---

---

## Expertenbefragung 01

Ort: Strausberg  
 Datum: 15.09.2008  
 Person: Bäuml, Wolfgang  
 Tätigkeit: Sachgebietsleiter Verkehrstechnik, a. D.  
 Institution: Landesbetrieb Straßenwesen, Außenstelle Eberswalde

### Kommunikation

Beurteilen Sie den Zugang zu Informationen in Bezug auf:

Layout: Die Darstellung erlaubt grundsätzlich den Zugang zu Informationen, die zur Beurteilung von verkehrlichen Zuständen notwendig sind. Während im makroskopischen Bereich bestimmte Freiheiten existieren (Beispiel: Schematische Darstellung von Verkehrsanlagen oder maßstabsgerecht), sind im mikroskopischen Bereich Zwangspunkte gesetzt. Man sollte den mikroskopischen Bereich evtl. in Stufen soweit öffnen können, dass die Abhängigkeit von verkehrstechnischen Einrichtungen untereinander zu erkennen ist (1. Beispiel: Die Blockmarkierung B 1,5/1,5 muss mit der Anordnung der Vz 306 und 205 harmonisieren; oder 2. Beispiel: Die Markierungen für Fußgängerfurten, Radfahrerfurten oder für gemeinsame Geh- und Radwege müssten unterschieden und erkannt werden können. Die Masken in den LSA-Registern und deren geometrische Anordnung müssen mit den Markierungen im Einklang sein).

Struktur: Die Struktur ist gut gewählt und ist übersichtlich.

textliche

Gestaltung: Die textliche Gestaltung erfüllt alle Anforderungen.

graphische

Gestaltung: In Bezug auf die standardisierte Symbolisierung wird zur graphischen Gestaltung des mikroskopischen Bereiches vorgeschlagen, die Verkehrszeichen gemäß StVO darzustellen, um eine Einheitlichkeit mit anderen verkehrstechnischen Objekten, z. B. Markierungs- und Beschilderungsplänen, zu gewährleisten.

### Transparenz

Beurteilen Sie die Anwendung der Analysemethoden hinsichtlich der mikroskopisch und makroskopisch gewonnenen Erkenntnisse.

Die klare Trennung Hauptbild entweder makroskopisch mit separater Detaildarstellung oder mikroskopische Ansichten mit separater Übersichtsdarstellung rechts im Modell ermöglicht die Kombination beider Ebenen. Die schematischen Übersichtsdarstellungen der zu analysierenden Verkehrsanlagen sind gut der makroskopische Ebene zugeordnet, und die verkehrstechnischen Utensilien wie LSA, VZ und Markierungen sind mikroskopischer Natur; eine übersichtliche Trennung ist gegeben.

mikroskopisch: Die Transparenz ist mit den Einschränkungen des Vorsatzes gegeben.

makroskopisch: Besonders hervorzuheben ist hier die Möglichkeit der Einblendung von Fotos der zu bearbeitenden Verkehrsanlage.

## Relevanz

Sind relevante Informationen:

- lesbar: Alle Informationen sind einwandfrei lesbar. Der Nutzer hat die Möglichkeit, die Wichtigkeit der Informationen je nach Aufgabenstellung selbst zu bestimmen
- eindeutig: Die stark schematisierten Grundrissdarstellungen, die sich weitgehend auf geometrische Grundformen zurückführen lassen, erhöhen zwar die Lesbarkeit, jedoch kann dadurch die Eindeutigkeit besonders der relevanten Informationen verloren gehen. Je mehr man in die mikroskopische Ebene einsteigt, desto mehr muss von einer starken Schematisierung abgewichen werden, um die Relevanz der Informationen zu erkennen.
- Prägnant: Die im vorigen Abschnitt gemachten Aussagen sind auch hier zutreffend

mikroskopisch

detailgenau: Siehe dazu die Ausführungen im Absatz Kommunikation – graphische Darstellung.

makroskopisch

detailgenau: Die makroskopische Detailgenauigkeit ist z. B. durch die ausgewählte Verwendung von Farben gegeben.

## Intervention

Beurteilen Sie die Bewegungswahrnehmung hinsichtlich der Zustandsänderungen (räumlich und zeitlich).

Es ist aber unschwer vorstellbar, dass eine auf dem Bildschirm vorgenommene Simulation verkehrlicher Abläufe hinsichtlich der Zustandsänderungen gut wahrnehmbar ist. Eine Zustandsänderung könnte besonders genau erfassbar sein, wenn die Geschwindigkeit eines Details abweichend von der natürlichen regelbar gemacht wird.

Erscheint Ihnen die visuelle Analyse neben den algorithmischen Berechnungsverfahren als ein probates Mittel zur Entscheidungsfindung?

Für die praktische Arbeit eines Verkehrstechnikers ist eine visuelle Analyse eine unbedingte Voraussetzung für eine schnelle Entscheidungsfindung. Wenn notwendig, kann ein algorithmisches Berechnungsverfahren zur Untermauerung der gewonnenen Erkenntnisse dienen.

Beurteilen Sie die gewonnenen Kenntnisse im Hinblick auf Entscheidungsfindungen.

Es ist denkbar, dass das in dieser Arbeit vorgestellte Analyseverfahren für viele Verkehrsabläufe zur Entscheidungsfindung völlig ausreichend ist und für die praktische verkehrstechnische Arbeit ein sehr gutes Hilfsmittel darstellt.

## Expertenbefragung 02

Ort: Dessau  
 Datum: 10.09.2008  
 Person: Heise, Uwe  
 Tätigkeit: Sachbearbeiter Straßenverkehrstechnik  
 Institution: Landesbetrieb Bau Sachsen-Anhalt, NL Ost

## Kommunikation

Beurteilen Sie den Zugang zu Informationen in Bezug auf

Layout: Lokale Orientierung einfach,  
 Zuordnung Knotenpunkt im Netz gut erfassbar,  
 Knotenpunkte ausreichend dargestellt  
 Live-Bilder bringen wesentliche Hilfe für Knotenerfassung und Begreifbarkeit

Struktur: sehr gute Auswahl der erfassbaren Daten,  
 Trennung von Plan und Menüführung bringt Vorteile im Handling,  
 Menüaufruf übersichtlich und gut erfassbar,  
 Logischer Aufbau der Bearbeitungspunkte

Textliche  
 Gestaltung: kurz und leicht verständlich,  
 klare Benennung und Abgrenzung der einzelnen Kategorien,  
 Schriftwahl optimal, gute Lesbarkeit

graphische  
 Gestaltung: wirkt gelungen, ähnlich Multigeräten in der Fahrzeug- oder Hifi-Technik, daher  
 keine Berührungspunkte durch Nutzer  
 klare Trennung Graphikteil hilfreich

## Transparenz

Beurteilen Sie die Anwendung der Analysemethoden hinsichtlich der mikroskopisch und makroskopisch gewonnenen Erkenntnisse.

mikroskopisch: gutes Handling bei detaillierter Betrachtung,  
 komplette Straßenausstattung wie Markierung oder LSA über Display gut erfassbar  
 sehr komfortabel durch möglichen Abruf Signalprogramme bis zur Koordinierung

makroskopisch: vermittelt schnellen Überblick,  
 Lage im Netz wesentlich und schnell erfassbar,  
 Verkehrsbelastung über Strecken zu verfolgen ist vorteilhaft

**Relevanz**

Sind relevante Informationen

lesbar: sehr gute Lesbarkeit gegeben

eindeutig: sichere Zuordnung bzw. Erkennbarkeit der Einzelelemente vorteilhaft,  
Wiedererkennungseffekt durch gleiche Farbzuordnung gegeben

prägnant: auf jeden Fall gegeben, Schnellerkennung von Einzelproblematiken durch gute  
Vermittlung und Darstellung in ausgewogenem Umfang der Inhalte

mikroskopisch

detailgenau: sehr detailgetreu, Animationen verdeutlichen Aussagen, klare und wertvolle Infos

makroskopisch

detailgenau: für Erstbewertung und Verschaffen eines Überblicks gut geeignet

**Intervention**

Beurteilen Sie die Bewegungswahrnehmung hinsichtlich der Zustandsänderungen (räumlich und zeitlich).

Zustandsänderungen räumlich erfassbar, es bedarf einer gewissen Übung und Gewöhnung mit dem System in Bezug auf dynamisches Darstellen

Erscheint Ihnen die visuelle Analyse neben den algorithmischen Berechnungsverfahren als ein probates Mittel zur Entscheidungsfindung?

Auf jeden Fall, Vorstellungsvermögen wird wesentlich erweitert durch optische und graphische Informationen; Problempunkte schnell erkennbar ohne wesentliche Aufwendungen

Beurteilen Sie die gewonnenen Kenntnisse im Hinblick auf Entscheidungsfindungen.

- sehr hilfreich
- graphische Darstellungen ermöglichen schnelle Zustandsanalyse und geben Info über Schwachpunkte und Problemstellen
- Problemanalyse durch Praxisbewertung vor Ort oder anhand konventioneller Unterlagen weitaus aufwendiger mit eingeschränkten Möglichkeiten zur Entscheidungsfindung, kein Vergleich

---

## Expertenbefragung 03

Ort: Berlin  
Datum: 13.09.2008  
Person: Günter Kanne  
Tätigkeit: Betrieb Register Hochradioaktiver Strahlenquellen (HRQ)  
Institution: BfS (Bundesamt für Strahlenschutz)

### Kommunikation

Beurteilen Sie den Zugang zu Informationen in Bezug auf:

Layout: Gute Darstellung der räumlichen, zeitlichen und thematischen Aspekte des Verkehrs. Nutzerführung durch Menü-Leiste (oben) und grafische Navigationselemente (rechts) sind eindeutig. Es sollte aber auf gleiche Reihenfolge gleicher Elemente in allen Darstellungen geachtet werden.

Struktur: Gute Aufteilung und Größe der einzelnen Elemente.

textliche

Gestaltung: Alle Texte gut lesbar, gute Staffelung der Schriftstile entsprechend der Bedeutung

graphische

Gestaltung: schnell erfassbar, viele Informationen (Pläne, Diagramme, Video) werden in ausreichender Genauigkeit angeboten

### Transparenz

Beurteilen Sie die Anwendung der Analysemethoden hinsichtlich der mikroskopisch und makroskopisch gewonnenen Erkenntnisse.

mikro-

skopisch: Die detaillierte Darstellung der Knotenpunkte mit dem Hinzuschalten der Belastungen und Regelungszustände lassen sowohl Verkehrszustände analysieren als auch die Auswahl einer Handlungsstrategie zu.

makro-

skopisch: Übersichtsdarstellung mit Angebot an Grundinformationen ist gut. Es kann als Dauerzustand einer statischen Information oder zeitlich diskreten dynamischen Funktion eingeblendet werden.

**Relevanz**

Sind relevante Informationen:

Lesbar: gute Lesbarkeit und gute Unterstützung der Erkennbarkeit durch Symbole und Farben

Eindeutig: immer wiederkehrende Farben, Signaturen und Texte für gleiche Sachverhalte in den Darstellungsebenen sind gut. Es ist aber auf die Widerspruchsfreiheit zwischen den verschiedenen Informationsarten (Text, Bild, Symbol, Legende) zu achten.

Prägnant: Die Auswahl der angewendeten Stilmittel (Plan, Bild, Text) für die den jeweiligen verkehrstechnischen Aspekt ist ausreichend prägnant.

mikroskopisch  
detailgenau: ja

makroskopisch  
detailgenau: ja

**Intervention**

Beurteilen Sie die Bewegungswahrnehmung hinsichtlich der Zustandsänderungen (räumlich und zeitlich).

In reduzierter Form gut wahrnehmbar.

Erscheint Ihnen die visuelle Analyse neben den algorithmischen Berechnungsverfahren als ein probates Mittel zur Entscheidungsfindung?

Die visuelle Analyse ist für mich ein sehr probates Mittel zur Erkenntnisgewinnung. Die Verknüpfung verschiedener Darstellungen des räumlichen und zeitlichen Verlaufs von Fahrzeugbewegungen im Verkehrsnetz in Verbindung mit LSA-Regelungen ermöglicht komplexere Analysen gegenüber den meist nur Einzelbetrachtungen in den algorithmischen Berechnungsverfahren. Die visuelle Analyse macht zum Teil erst die großen anfallenden Datenmengen für die Verkehrsplaner und -techniker beherrschbar.

Beurteilen Sie die gewonnenen Kenntnisse im Hinblick auf Entscheidungsfindungen.

Schnelles Erkennen ist die Grundlage für ein rechtzeitiges und richtiges Handeln.

Ein Vorteil der Visualisierung ist auch der, zu prüfen, ob ein bestimmter Knotenausbau und ein bestimmtes Signalprogramm das Verkehrsaufkommen bewältigt. Die Vorhersagegenauigkeit der Modelle kann durch die Erkenntnisse verbessert werden.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit an keiner anderen Hochschule eingereicht sowie selbstständig und nur mit den angegebenen Mitteln angefertigt wurde.

Potsdam, den 06.08.2009

Antje Schmallowsky