

**Ansprüche an Geovisualisierungen
von Simulationsergebnissen
aus Verkehrsmodellen
und prototypische Implementierung**

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
„Master of Science“ (M. Sc.)

Eingereicht an der Geographischen Fakultät
der Universität Potsdam

von

B. Eng. Daniel Teske
daniel.teske@uni-potsdam.de

Erstbetreuer Prof. Dr. Hartmut Asche (Universität Potsdam) hartmut.asche@uni-potsdam.de	Zweitbetreuer Rita Cyganski (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.) rita.cyganski@dlr.de
---	--

Berlin, den 11. Juli 2014

„Alles Unheil kommt von einer einzigen Ursache,
dass die Menschen nicht in Ruhe in ihrer Kammer sitzen können.“

B. Pascal um 1660

Danksagung

Zu allererst möchte ich meiner Frau Sabine von ganzem Herzen danken, dass sie bereit war, mich auf dem entbehrungsreichen Weg durch das Masterstudium zu begleiten. Sie half mir, die Abschlussarbeit in ein würdiges Format zu verpacken und leistete gerade im „Endspurt“ ein übermenschliches Arbeitspensum, das nicht zuletzt gesundheitsgefährdend war.

Selbstverständlich danke ich auch meinen Betreuern Herrn Prof. Dr. Hartmut Asche und Frau Rita Cyganski, die mir stets das Gefühl gaben, ein potentes Thema zu bearbeiten und mich anspornten, am Ball zu bleiben. Die vielen Ratschläge in den intensiven Gesprächen halfen mir dabei, mich auf die wesentlichen Aspekte zu konzentrieren. Einen speziellen Dank auch an Rita, die trotz „150 roter Fähnchen im Postfach“ noch Zeit für meine Fragen fand.

Weiter danke ich den Kollegen vom DLR-IVF, die äußerst aufgeschlossen waren und jederzeit offene Ohren für meine Fragen hatten. Namentlich sind dies Paul Boeck, Kay Gade, Dr. Matthias Heinrichs, Stefan Huber, Katja Köhler, Martin Kurowski, Andreas Lischke und Wenke Zimmermann. Danke auch an Dr. Paul Salvini von Side Effects Software für die Bereitstellung einer unveröffentlichten Kartenanimation.

Ich danke ebenfalls meinen Kommilitonen und Freunden Marcel Hibbe, Franziska Noack, Lasse Scheele und Henriette Sens für die Klärung von fachlichen Fragen, Unterstützung bei der Quellenrecherche und für das Korrekturlesen einzelner Kapitel.

Außerdem bedanke ich mich bei der gesamten Familie, insbesondere bei meiner Mutter, für Korrekturarbeiten und die Betreuung der Kinder über manche Wochenenden. Zuletzt, aber nicht weniger wichtig, möchte ich meinen beiden Kindern Anaïs Veronika und Jonathan Daniel Danke sagen. Sie führen mir immer wieder vor Augen, dass es außer Studium und Arbeit noch viele weitere schöne Dinge im Leben gibt.

Inhalt

Danksagung	5
Kurzfassung	1
1 Einführung	2
2 Verkehrsmodelle	4
2.1 Aufgabe von Verkehrsmodellen.....	5
2.2 Arbeitsweise von Verkehrsmodellen.....	6
2.3 Anforderungen an die Geovisualisierung von Verkehrsmodellen	9
2.3.1 Vorhandene Geovisualisierungsgrundlagen.....	11
2.3.2 Vorhandene Geovisualisierungstechnologien.....	21
2.3.3 Vorhandene Implementierungstechniken	25
2.4 Vorhandene Verkehrsmodelle und deren Einsatz von Geovisualisierungen	28
2.4.1 Verkehr In Städten - SimulationsModell (VISSIM).....	28
2.4.2 Multi-Agent Transport Simulation Toolkit (MATSim).....	30
2.4.3 Integrated Land Use, Transportation, Environment (ILUTE)	32
2.4.4 Travel and Activity Patterns Simulation (TAPAS).....	34
2.5 Zwischenfazit	35
3 Neue Geovisualisierungen für TAPAS.....	38
3.1 Gewählte Ausgangsdaten.....	38
3.2 Gewählte Implementierungstechnik.....	46
3.3 Hintergrundinformationen durch interaktive Thematische Karten	49
3.3.1 Umsetzung.....	50
3.3.2 Implementierung.....	52
3.3.3 Ergebnisse.....	55
3.4 Einzelne Individuen: Raum-Zeit-Pfade	55
3.4.1 Umsetzung.....	56
3.4.2 Implementierung.....	60
3.4.3 Ergebnisse.....	62

3.5	Aggregierte Individuen: Verkehrsströme zwischen Raumeinheiten.....	64
3.5.1	Umsetzung.....	64
3.5.2	Implementierung.....	70
3.5.3	Ergebnisse.....	75
3.6	Alle Individuen als animierte Punktkarte mit Dashboard	76
3.6.1	Umsetzung.....	77
3.6.2	Implementierung.....	82
3.6.3	Ergebnisse.....	85
3.7	Betrachtung von Laufzeiten und Geschwindigkeiten.....	86
4	Ergebnisse.....	89
5	Diskussion und Ausblick	91
6	Referenzen	93
7	Abbildungsverzeichnis.....	100
8	Tabellenverzeichnis	103
9	Listingverzeichnis.....	103
	Anhang A – Öffnen der umgesetzten Geovisualisierungen über die beigefügte DVD	104
	Anhang B – Rohdaten von drei Personen eines Haushalts	105
	Anhang C – Zuordnung der Wegezwecke zu Aktivität	110
	Anhang D - Berliner Ortsteile	112
	Anhang E – Poster für die Vorstellung des TAPAS-Verkehrsmodells	113

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Konzeptionierung, Umsetzung und Implementierung von Geovisualisierungen für das Travel Activity Patterns Simulation-Verkehrsmodell (TAPAS), das am Institut für Verkehrsorschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR-IVF) entwickelt und eingesetzt wird.

Da im Vorfeld keine nennenswerten Ansätze für die Arbeit mit Geovisualisierungen existierten, war eine Analyse über geeigneter Kartentypen und möglicher Nutzergruppen notwendig. Diese brachte zum Vorschein, dass die unterschiedlichen Betrachtungsweisen der Verkehrsorschler auch verschiedene Kartentypen erfordern. Die Fragestellungen und Kartentypen können durch verschiedene Aggregationsstufen der simulierten Verkehrsteilnehmer in drei Gruppen zusammengefasst werden: Fragestellungen und Karten über einzelne Individuen, aggregierte Individuen und alle Individuen. Eine weitere Analyse über Erstellungsmöglichkeiten durch vorhandene Software ergab, dass für die Erstellung individueller Geovisualisierungen kein geeignetes System in Frage kommt. Empfehlenswert ist daher die Eigenentwicklung auf Basis von Web-Visualisierungstechniken.

Die umgesetzten Raum-Zeit-Pfade ermöglichen eine detaillierte Betrachtung der raumzeitlichen Veränderungen einzelner Individuen. Dadurch ist es den Verkehrsorschern möglich die Plausibilität einzelner von generierten Aktivitätenketten zu prüfen. Räumlich aggregierte Individuen werden durch Verkehrsströme dargestellt, in welchen ein besonderer Fokus auf die durchgeföhrten Aktivitäten liegt. Durch eine differenzierte Betrachtung des Quell- und Zielverkehrs ist es möglich Ausschnitte aus Aktivitätenketten räumlich zu verorten. Abschließend wurde für die Betrachtung aller Individuen eine Kartenanimation als Dashboard erstellt, welche die genutzten Standorttypen aller Personen zu jedem Zeitpunkt darstellt. Durch die Kartenanimation können Aktivitätenmuster visuell analysiert werden und homogene von heterogenen Raumnutzungsstrukturen differenziert werden.

Die Implementierungen orientieren sich an der Visualisierungspipeline. Dabei wurden spezielle Ansprüche an die Datenprozessierung und Datenhaltung identifiziert. Außerdem wurde großer Wert auf eine flüssige Darstellung gelegt.

Durch die Umsetzungen ist es den Verkehrsorschern am DLR-IVF nun möglich drei verschiedene interaktive Kartentypen automatisiert zu erzeugen. Diese sind für die Plausibilisierung, Verifizierung, visuellen Analyse und der Erkenntnisvermittlung an außenstehende Fachleute und Nicht-Fachleute geeignet.

1 Einführung

Die modellhafte Abbildung von Verkehrsprozessen beruht auf hochkomplexen Berechnungsmethoden, deren Datengrundlage aufwändig zu recherchieren ist und einen sehr engen geographischen Bezug zur Modellregion aufweist. Die Ergebnisdaten von Verkehrssimulationen sind ähnlich umfangreich und besitzen einen mindestens ebenso starken geographischen Bezug wie die Ausgangsdaten. Da die simulierten Verkehrsdaten im konkreten Raum verankert sind, bieten sich geographische Visualisierungen (*Geovisualisierungen*) dieser Daten an. Wegbereitend für solch ein Vorhaben ist ebenfalls, dass die zugehörigen Methoden und Techniken in der Literatur ausgiebig beschrieben sind (Batty et al. 2013; Klein 2013; Pohl 2010).

Das Institut für Verkehrsorschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR-IVF) hat ein eigenes Verkehrsmodell entwickelt und publiziert regelmäßig Forschungsergebnisse, die auf dessen Simulationsergebnissen beruhen (Zimmer et al. 2013; Infas & DLR-IVF 2010; Cyganski & Justen 2007). In diesen Publikationen kommen ausschließlich Mittel der deskriptiven Statistik wie Tabellen, Diagramme und Zeitreihen zum Einsatz, was dazu führt, dass der gesamte geographische Bezug der Ergebnisdaten verloren geht. Begründet wird dies durch hohe Anschaffungskosten für professionelle Visualisierungssysteme und zu wenig Zeit für die Erstellung von Karten. Gleichzeitig gibt es starke Differenzen in den Visualisierungsansprüchen der jeweiligen Verkehrsforcher, die mit großer Wahrscheinlichkeit aus den verschiedenen fachlichen Hintergründen resultieren: Verkehrsingenieure, Geographen, Stadt- und Regionalplaner, Wirtschaftswissenschaftler, Informatiker, Mathematiker, Soziologen und Politikwissenschaftler haben unterschiedliche Ansprüche an Geovisualisierungen. Während die einen die Komplexität von Visualisierungen stark unterschätzen und diese lediglich als Anwendungen betrachten, bei denen „eine Lampe, die grün oder rot aufleuchtet, wenn es stimmt oder nicht stimmt“ (Lischke 2013), wird deren Vielschichtigkeit von anderen durchaus erkannt. Jedoch gestaltet sich die konzeptionelle oder praktische Umsetzung von Geovisualisierungen am Institut als schwierig, da dort derzeit noch keine ausreichende Erfahrung darüber vorhanden ist.

Dadurch stellt sich zwangsläufig die Frage, welche Ansprüche seitens der Verkehrsorschung an Geovisualisierungen von Ergebnisdaten aus Verkehrsmodellen tatsächlich existieren. Außerdem muss geklärt werden, welche der zur Verfügung stehenden Kartentypen sich für die Geovisualisierung der Ergebnisdaten besonders anbieten. Auf der Basis dieser Kartentypen sind gilt es, geeignete Techniken zu finden, die zur Umsetzung von Geovisualisierungen beitragen können. Abschließend sollen die Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung von Geovisualisierung überprüft werden.

Zur Klärung dieser Fragen ist zuerst eine theoretische Aufarbeitung der Anwendungsbereiche und Arbeitsweisen von Verkehrsmodellen sowie der möglichen Methoden und Techniken von Geovisuali-

sierungen notwendig. Darauf aufbauend werden mögliche Zielgruppen und Kartentypen für Geovisualisierungen von Verkehrsdaten identifiziert und priorisiert. Für die Beantwortung der praktischen Fragen soll zunächst eine angemessene Technik für die prototypische Kartenerzeugung ausgewählt werden. Betrachtet wird dabei die visuelle Umsetzung der Geovisualisierungen und die dafür notwendigen Arbeitsschritte und Prozessketten.

Entsprechend der zuvor erläuterten Methodik, ist die Arbeit in zwei große Teile gegliedert. Der erste Teil befasst sich mit den Grundlagen der Verkehrsmodellierung und Geovisualisierung im Kontext der Verkehrsmodelle. Außerdem werden vier ausgewählte Verkehrsmodelle auf Eingangsdaten, Modellierungsprozess und Ergebnisdaten sowie ihren Einsatz von Geovisualisierungen untersucht. Nach einem Zwischenfazit werden die gewonnenen Erkenntnisse im zweiten Teil der Arbeit in die Praxis überführt. Die erhaltenen Resultate rekapitulierend, handelt es sich dabei um ein interaktives dreidimensionales Raum-Zeit-Diagramm, ein interaktives Verkehrsflussdiagramm und eine interaktive Animation. Abschließend sollen alle gewonnenen Ergebnisse zu den eingangs genannten Forschungsfragen zusammengetragen, erläutert und in einer sich anschließenden Diskussion kritisch betrachtet werden.

Die praktischen Umsetzungen sind in Form einer DVD am Ende der vorliegenden Arbeit beigelegt. Eine Anleitung, wie die Geovisualisierungen dargestellt werden können, befindet sich im Anhang A. Zusätzlich stehen die praktischen Umsetzungen online unter der Webadresse <http://dante.bplaced.de> zur Ansicht bereit. Ihre Verfügbarkeit wird mindestens bis zum Zeitpunkt der Verteidigung der vorliegenden Arbeit gewährleistet sein.

2 Verkehrsmodelle

2012 klagten das Bezirksamt Friedrichshain-Kreuzberg und 15 Privateute gegen die Stadtverwaltung Berlin. Anlass ihrer Klage war der umstrittene Ausbau der Berliner Stadtautobahn A100 vom Stadtbezirk Neukölln in den benachbarten Ortsteil Friedrichshain. Während der sich anschließenden Gerichtsverhandlung wurden die vom Senat beauftragten Stadtplaner aufgefordert, das Verkehrsmodell hinter der von ihnen berechneten Verkehrsprognose offenzulegen. Der Richter wertete dieses anerkennend als „komplexes und anspruchsvolles Berechnungsmodell“. Die Tatsache, dass in dem Modell sogar der durchschnittliche Sicherheitsabstand zwischen hintereinanderfahrenden Fahrzeugen einbezogen wurde, mache die Verkehrsprognose jedoch auch „wackelig“, so der Richter weiter. Die Kläger hingegen titulierten die offengelegte Verkehrsprognose als „Kaffeesatzleserei“. Zu ihrer Verteidigung machten nun die Planer auf den Mangel an Quellen „für eine seriöse Verkehrsprognose“ aufmerksam, woraufhin der Richter die Diskussion mit den Worten abschloss, „dass für die Planfeststellung sehr wohl eine plausible, auf das Projekt bezogene Verkehrsprognose gefordert sei.“ (Fahrur 2012; Kurpjewit 2012)

Dieser Vorfall verdeutlicht, welche Bedeutung Verkehrsprognosen zugemessen werden kann und wie belastbar die von ihnen prognostizierten Werte sein müssen. Erstellt wird eine Verkehrsprognose i.d.R. durch Simulationsrechnungen an einem Verkehrsmodell. Mittels Verkehrsmodellen können Wirkungen bzw. Effekte von verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen gemessen werden. Derlei Maßnahmen können sehr vielseitig sein: Das Existieren einer City-Maut (politisch), das Vorhandensein von Elektrofahrzeugen (technologisch) oder der demographische Wandel (strukturell). Damit die berechneten Verkehrsprognosen - wie im eingangs aufgeführten Beispiel gezeigt - auch belastbare Ergebnisse erzielen, müssen Verkehrsmodelle folgende vier Bedingungen erfüllen (Wermuth 2005): *Adäquatheit und Maßnahmenempfindlichkeit* (die Wirkungen einer zu untersuchenden Maßnahme müssen möglichst zuverlässig abgebildet werden), *Logische Konsistenz* (innere Widersprüche wie das Fahren ohne Fahrzeug dürfen im Modellaufbau nicht existieren), *Operationalität* (die Modellrechnung - Simulation - muss mit vertretbarem Aufwand gewährleistet sein) und *Transparenz* (die Ergebnisse müssen jederzeit nachvollziehbar und kontrollierbar sein).

Zusammenfassend muss ein Verkehrsmodell also so viel wie nötig, aber so wenig wie möglich Modellierung beinhalten, damit es logisch konsistent, maßnahmenempfindlich, transparent und zu guter Letzt operabel ist.

2.1 Aufgabe von Verkehrsmodellen

Die Bedeutung von Verkehrsmodellen wurde bereits im vorherigen Abschnitt offengelegt. Die allgemeine Aufgabe von Verkehrsmodellen ist die modellhafte Abbildung von Verkehrsprozessen. Ziel dieser Modelle ist es, Verkehrsflüsse und Verkehrsnachfragen abzuleiten und zu prognostizieren (Wermuth 2005) und verkehrspolitische Entscheidungsgrundlagen anzubieten. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Abbildung von Maßnahmen und der Abschätzung ihrer Wirkung auf die Verkehrsflüsse oder Verkehrsnachfragen. Zu diesen Maßnahmen gehören bspw. Infrastrukturmaßnahmen, Veränderungen der Siedlungsstruktur, Maßnahmen im öffentlichen Verkehr (ÖV), Einführung nutzungsbezogener Abgaben für Verkehrsinfrastrukturen (*Mobility Pricing*), Veränderungen der Energiepreise, ordnungspolitische Maßnahmen oder Verkehrssteuerungsmaßnahmen (Friedrich 2011) sowie Steuerung und Ausmaße der demographischen Entwicklung.

Drei Beispiele sollen im Folgenden veranschaulichen, welche Bedeutung der korrekten Abbildung von Maßnahmen zukommt, damit auf ihrer Grundlage angemessene Prognosen erstellt werden können. Zu den Infrastrukturmaßnahmen gehören bspw. die Verengung oder Sperrung einer bereits bestehenden Straße bspw. durch eine Baustelle. Die zu erwartende Wirkung ist, dass die eingeschlagenen Umwege der betroffenen Verkehrsteilnehmer die benachbarten Straßen beanspruchen und diese somit höher als im Normalfall belasten. Durch eine Prognose auf der Basis von Verkehrsmodellen kann nun genauer abgeschätzt werden, ob die zusätzlichen Verkehrsbelastungen der Umfahrungsstraßen auf ein potentiell kritisches Niveau steigen werden. In einem solchen Fall wäre es möglich, individuelle oder kollektive Leitsysteme einzubinden, welche helfen die Umfahrungen zu regulieren oder eine Anpassung des Bauplanes vorzunehmen (Halbritter et al. 2002).

Ein Beispiel für Mobility Pricing-Maßnahmen ist die Einführung einer kostenpflichtigen City-Maut in deutschen Großstädten. Im Ergebnis einer Studie des Instituts für Verkehrsorschung im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR-IVF) wird von einer City-Maut für Berlin abgeraten: „Die Ausdehnung der Mautzone ist zu groß und die veranschlagten Mautkosten zu hoch. Die zu erwartenden Auswirkungen sind sozial unverträglich, schädlich für den Berliner Einzelhandel und würden dem Ziel der Reurbanisierung der Innenstadt entgegenwirken. [...] Es wird hingegen eine flächenhafte Verkehrsberuhigung innerhalb des großen [Stadtrings], die Ausweitung der Parkraumbewirtschaftung sowie eine stärkere Förderung der Verkehrsträger des Umweltverbundes empfohlen“ (Trommer 2008, p.120).

Demographische Entwicklungen werden vor allem in längerfristigen Verkehrsprognosen thematisiert. Hierzu zählen die Änderung der Altersstruktur und der prozentualen Anteile zwischen Inländern, Ausländern und Eingebürgerten an der Gesamtbevölkerung ebenso wie Zuzüge und Fortzüge von

Personen und –gruppen. Eine 2009 veröffentlichte Studie des Instituts für Stadtentwicklung und Bauwirtschaft der Universität Leipzig befasst sich mit den gegensätzlichen Trends schrumpfender Städte und Regionen einerseits und der Entwicklung kostspieliger Verkehrsentwicklungspläne andererseits, wie etwa Angebotsverbesserungen im Öffentlichen Verkehr (ÖV), Lückenschlüsselfüllungen im Straßennetz und Ortsumgehungen (Selz 2009). Langzeitprognosen bis in das Jahr 2020 zeigten „einschneidende Veränderungen der Verkehrsnachfrage“ in Mitteldeutschland auf (Selz 2009, p.53). Zwar nähme durch den Bevölkerungsrückgang die Anzahl der Ortsveränderungen ab, doch würden die zurückgelegten Distanzen auch im Schnitt länger, was insgesamt zu einer leichten Erhöhung der Verkehrsleistung führe. Auch mit einer steigenden Nachfrage am schienengebundenen Nahverkehr sei zu rechnen, wohingegen die Frequentierung von Regionalbussen perspektivisch sinken.

Zusammenfassend können drei wesentliche Aufgabenbereiche von Verkehrsmodellen genannt werden: Die Prognose zukünftiger Entwicklungen und Zustände; das Abschätzen von Maßnahmenwirkungen sowie das Verstehen von Wirkungszusammenhängen (Wermuth 2005). Konkret stellen Verkehrsmodelle „eine Voraussetzung für die Bewertung von Verkehrsmaßnahmen zur Beurteilung der Zweckmäßigkeit, der Wirtschaftlichkeit und der Umweltverträglichkeit dar. Ihre Ergebnisse beeinflussen die zentralen Eingabegrößen für die Abschätzung von Verkehrsnachfragen, Reisezeiten, Umweltauswirkungen, Verkehrsnutzerkosten etc. Verkehrsmodelle sind letztendlich das Fundament, auf dem die verkehrspolitischen Entscheidungen ruhen (sollten)“ (Sammer 2012, p.277).

2.2 Arbeitsweise von Verkehrsmodellen

Wirkungen einzelner Maßnahmen, wie sie im vorherigen Abschnitt beschrieben wurden, können im Hinblick auf den gesamten Verkehrsprozess als Details angesehen werden. Die wesentlichen Einflussgrößen auf den Verkehrsprozess stellen hingegen die Bevölkerungs- und Wirtschaftsstruktur, Verkehrsangebote und verkehrsrelevante Verhaltensweisen der Bevölkerung dar (Wermuth 2005). Erst wenn diese Einflussgrößen im Verkehrsmodell abgebildet werden, ist es möglich, einzelne Maßnahmen einzuarbeiten und deren Wirkungen in die Ergebnisdaten einfließen zu lassen.

Bevor diese Eingangsgrößen genauer erläutert werden um darauffolgend den Modellierungsprozess und schlussendlich die Ergebnisdaten zu beschreiben, sei auf den Einfluss der Größe des Zielgebietes (Modellsystem) hingewiesen. So ist es in kleinen Modellsystemen wie dem einer Stadt oder eines Stadtteils durchaus sinnvoll, Verhaltensweisen einzelner Verkehrsteilnehmer zu simulieren (wie bspw. die Wahl zwischen möglichen Einkaufsgelegenheiten oder des genutzten Fahrstreifens). In diesem Fall handelt es sich um ein Mikro- oder Individualverhaltensmodell bzw. agentenbasiertes- oder disaggregiertes Modell. Bei größeren Modellsystemen wie bspw. einzelnen Bundesländern oder der Bundesrepublik Deutschland sind diese Einzelentscheidungen nur von sehr geringer Bedeutung

und entsprechend der Operabilitäts-Maßgabe eines Modells zu umfangreich. Die Verkehrsteilnehmer werden darum in Form von Durchschnittswerten aggregiert verarbeitet, weswegen man bei einem solchen Modell von Makro- bzw. Aggregatmodell spricht. Die Erhebung der Eingangsdaten des Verkehrsmodells richtet sich also ganz nach dem Modellsystem und dem genutzten Modelltyp.

Daten zur Bevölkerungs- und Wirtschaftsstruktur bestehen neben den demographischen Merkmalen (Altersaufbau, Geschlechtsverteilung, Familien- und Haushaltsstruktur) auch aus Beschäftigungsquote, Verteilung der Arbeits- und Ausbildungsplätze sowie Haushaltseinkommen und Verkaufsflächen. Diese Daten können im Allgemeinen von statistischen Institutionen wie dem Statistischen Bundesamt (Destatis) oder den einzelnen statistischen Landesämtern der Bundesländer bezogen werden. Diese Daten sind auf Zielgebiete (Zonen) verschiedener Auflösungen aggregiert wie bspw. Bundesländer, Kreise und Städte, aber auch in Bezirke, Ortsteile, Ortslagen oder Verkehrszellen zusammengefasst.

Das Verkehrsverhalten umfasst Angaben zur räumlichen Alltagsmobilität(also über alltägliche Ortsveränderungen), zum Wegezweck, dem dabei genutzten Hauptverkehrsmittel (Modus), der Strecke, Abfahrtzeit und Fahrtdauer sowie zu beförderten Personen oder Gütern (Collin 2005). Diese Angaben werden i.d.R. durch strukturierte oder unstrukturierte Beobachtungen, mündliche oder schriftliche Befragungen sowie Sondererhebungen gewonnen. Im Rahmen von Befragungen ist es auch möglich Angaben zur Familien- und Haushaltsstruktur zu verfeinern. Auf Basis aller Angaben können die Probanden später in Personengruppen und Verhaltensgruppen zusammengefasst werden.

Routingfähige Verkehrsnetze müssen für jedes Verkehrsmittel des Verkehrsmodells separat vorliegen. Gängige Verkehrsmittel sind der *motorisierte Individualverkehr (MIV)* mit Motorrädern und Autos und der *nichtmotorisierte Individualverkehr (NMIV)* bzw. *Langsamverkehr* mit Fußgängern und Fahrradfahrern. Daneben gibt es den *öffentlichen Verkehr (ÖV)* mit Bussen, Bahnen und ggf. Schiffen und Flugzeugen sowie den *öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV)* in städtischen und regionalen Räumen, welcher die Verkehrsmittel Bus, Tram, U-, S- und Regionalbahn aufweist. In digitalen routingfähigen Verkehrsnetzen werden Kreuzungen und Weichen durch Knoten (Nodes) abgebildet, Straßen und Schienen verbinden diese in Form von Kanten (Edges) (de Lange 2013; Dijkstra 1959). Für den ÖV und ÖPNV müssen zusätzliche Haltestellen, Routen und Fahrpläne hinterlegt sein.

Neben dem strukturellen Aufbau sollten auch Angaben zur *Leistungsfähigkeit* wie bspw. Fahrzeuge oder Personenkilometer pro Stunde oder zum *Widerstand* bzw. der Maximalgeschwindigkeit in Form von Gewichtungen für alle Netzwerkelemente hinterlegt sein (Geroe et al. 2011). Bei äußerst großmaßstäbigen Mikromodellen kann es außerdem wichtig sein Verkehrsregeln, Fahrspuren und sogar Ampeltaktungen abzubilden. Diese Daten eigenständig zu erheben ist sehr aufwändig. Besonders die Validierung der Topologie, Leistungsfähigkeits- und Widerstandsparameter benötigen systematische

und zeitaufwändige Arbeitsschritte. Daher werden diese oftmals in Kooperation mit kommerziellen Routing-Dienstleistern wie *Tele Atlas* oder *Navteq* (heute *Nokia*) bereitgestellt (Zielstra & Zipf 2010).

Somit sind die typischen Eingangsdaten beschrieben. Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge zwischen den Eingangsdaten und den individuellen Verkehrsverhaltensmustern ist es sinnvoll, ein Verkehrsmodell in Teilmodelle zu untergliedern. Etabliert hat sich seit den sechziger Jahren der so genannte Vier-Stufen-Algorithmus (VSA), durch den der Verkehr in vier Stufen modelliert wird (Wermuth 2005; Hilty et al. 1998; Mäcke 1964). In Abbildung 1 wird der VSA schematisch dargestellt. Bei der Abarbeitung des VSAs hängt es dabei vom Typ des Verkehrsmodells ab, ob die Personen aggregiert oder separat in Form von Agenten betrachtet werden.

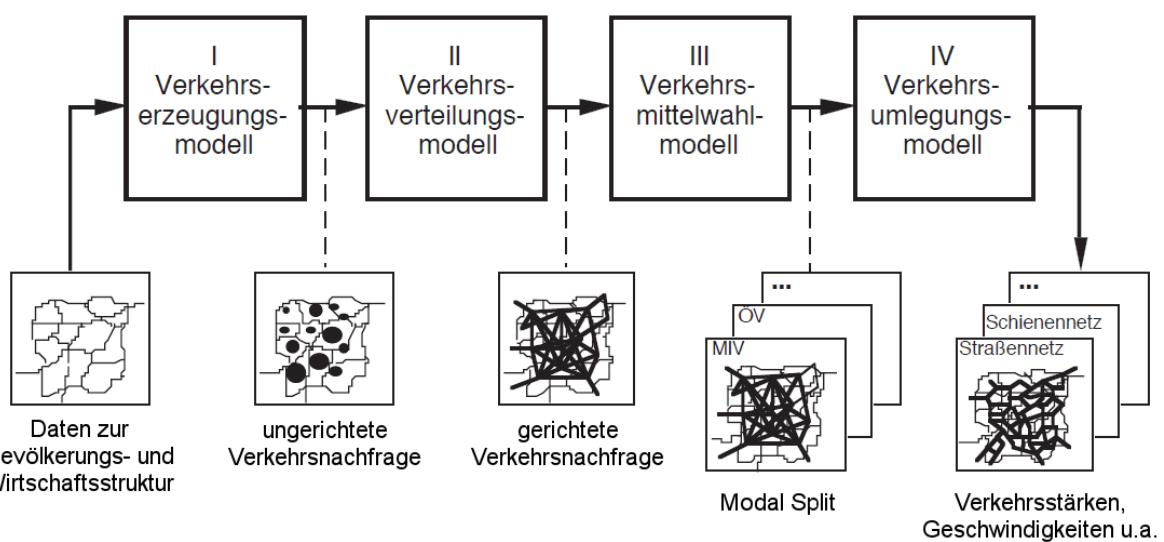


Abbildung 1: Schematischer Ablauf des Vier-Stufen-Algorithmus (VSA) (Hilty et al. 1998, p.64)

In der ersten Stufe des VSAs wird auf Basis der recherchierten Bevölkerungs- und Wirtschaftsstruktur eine synthetische Bevölkerung und eben solche Wirtschaft generiert. Daraus leitet ein *Verkehrs-erzeugungsmodell* die Stärken von Quell- und Zielverkehr ab und erzeugt ungerichtete Verkehrs nachfragen. In diesem Fall beschreibt „ungerichtet“ die Festlegung, dass bspw. 10.000 Personen der Zone A arbeiten gehen oder 15.000 Personen der Zone B kommen um einzukaufen. Wohin die Arbeiter gehen oder woher die Einkäufer stammen, wird erst in der nächsten Stufe festgelegt.

Dies wird mit Hilfe des *Verkehrsverteilungsmodells umgesetzt*. Hier werden die ungerichteten Verkehrs nachfragen passend miteinander verbunden, also zu jedem Quellverkehr ein Ziel gesucht und umgekehrt. Bspw. gehen von den 10.000 Arbeitern aus Zone A 4.000 in der gleichen Zone arbeiten, 1.000 in Zone B, 900 in Zone C usw. Dadurch entstehen gerichtete Quell-, Ziel- und Binnenverkehre, die in Form von Verflechtungs- oder Fahrtenmatrizen gespeichert werden.

Erst in der dritten Stufe, dem *Verkehrsmittelwahlmodell*, wird den gerichteten Verkehrs nachfragen ein Hauptverkehrsmittel (Modus) zugeteilt. Bspw. nutzen von den 4.000 Arbeitern auf ihrem Weg von Zone A nach Zone B 1.500 ihr MIV, weitere 1.500 den ÖPNV und 800 das Fahrrad, 400 gehen zu Fuß. Die Ergebnisse werden in Form von Verflechtungs- und Fahrtenmatrizen je Modus gespeichert. In der letzten Stufe, dem *Verkehrsumlegungsmodell*, werden die genau zu wählenden Routen bestimmt. Dabei ist der gewählte Modus dafür ausschlaggebend, welches Verkehrsnetz als Berechnungsgrundlage gewählt wird.

Dieser traditionelle Ansatz wurde bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt stark erweitert. So erfolgt meist keine isolierte Betrachtung einer einzelnen Stufe, sondern auch Wechselwirkungen innerhalb und zwischen den einzelnen Stufen werden mit in die Analyse aufgenommen: "Beispielsweise kann sich der Stau im Straßenverkehr, den das Umlegungsmodell (Stufe IV) berechnet, auf die Verkehrsmittelwahl (Stufe III) auswirken, indem er einige Teilnehmer zum Umsteigen auf öffentliche Verkehrsmittel bewegt." (Hilty et al. 1998, p.70). Dafür ist natürlich die Integration eines Verkehrsflussmodells innerhalb des Umlegungsmodells notwendig.

Die Ergebnisdaten eines Verkehrsmodells werden als *Verkehrsmengen* bezeichnet, was einer Liste von *Ortsveränderungen (Trips)* entspricht (Wermuth 2005). Jede Ortsveränderung besitzt *räumliche*, *zeitliche* und *sachliche* Merkmale. Bei den räumlichen Merkmalen handelt es sich um *Quellort*, *Zielort* und *Route*, aus der sich wiederum *Wegelänge* und genutzte Netzelemente ableiten lassen. Zu den zeitlichen Merkmalen gehören lediglich die beiden Zeitpunkte *Beginn* und *Ende* der Ortsveränderung, welche die Grundlage für die Berechnung der *Wegedauer* bilden. Die wichtigsten sachlichen Merkmale betreffen den gewählten *Modus* und den *Wegezweck* des unternommenen Weges.

Zusammenfassend lassen sich also sieben wesentliche Merkmale einer Ortsveränderung benennen: *Quellort*, *Zielort*, *Route*, *Abfahrtszeit*, *Ankunftszeit*, *Verkehrsmodus* und *Fahrtzweck*.

2.3 Anforderungen an die Geovisualisierung von Verkehrsmodellen

Geovisualisierungen kombinieren die beiden traditionellen Fachbereiche der Kartographie und der wissenschaftlichen Visualisierung. Eine wesentliche Aufgabe beider Disziplinen ist die Abbildung komplexer Sachverhalte. In der Regel handelt es sich bei Geovisualisierungen um thematische Karten, die durch zahlreiche Fachinformationen angereichert sind. Jede Geovisualisierung dient einem bestimmten Zweck, wie bspw. der visuellen Analyse, der Unterstützung der Kommunikation oder der Evaluation von Ergebnisdaten. Je nach Bestimmungszweck eignen sich verschiedene Formen von Geovisualisierungen, welche durch die folgenden drei Kriterien maßgeblich charakterisiert sind (MacEachren 1995): Von Bedeutung für die zu erstellende Geovisualisierung ist zunächst, ob sie Bekanntes darstellen oder Unbekanntes aufdecken soll (presenting knowns vs. revealing unknowns).

Ein zweiter wesentlicher Faktor ist weiterhin, ob die Geovisualisierung perspektivisch in einem kleinen Rahmen genutzt wird oder aber für ein breites Publikum bestimmt ist (private vs. public). Drittens und abschließend spielt auch der Grad der Interaktion eine wichtige Rolle (low vs. high human-map interaction). Diese drei Kriterien können als Achsen eines würfelförmigen Kartennutzungsraumes (cubic map-use space) genutzt werden, wie in Abbildung 2 dargestellt.

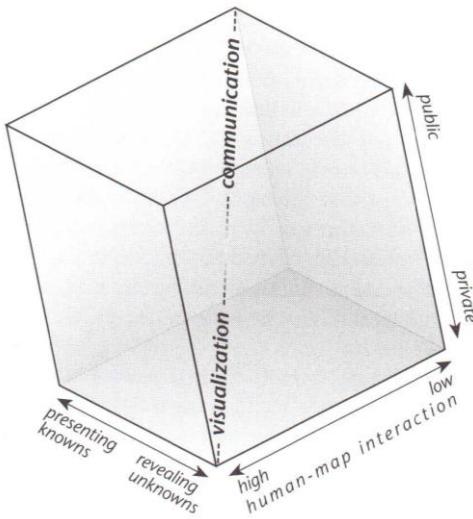


Abbildung 2: Würzelförmiger Kartennutzungsraum (MacEachren 1995, p.358)

Durch die Achsen des in Abbildung 2 dargestellten Würfels wird der Einsatzbereich einer Geovisualisierung definiert (MacEachren 1995). So gibt es Geovisualisierungen die der *Kommunikation* (communication) dienen. Diese bilden bekannte Informationen ab, haben ein geringes Maß an Interaktion, weisen jedoch ein breites Publikum auf. Bei einer anderen möglichen Form steht hingegen die *Darstellung* (visualization) im Vordergrund. Diese dient der Informationsgenerierung. Geovisualisierungen mit diesem Verwendungszweck sind durch ein hohes Maß an Interaktion charakterisiert, haben aber nur eine kleine Nutzergruppe.

Der Übergang zwischen dem Einsatzbereich der Kommunikation hin zur Darstellung ist auch ein Übergang vom Fachbereich der Kartographie zu jener der Explorativen Datenanalyse (Explorative Data Analysis, EDA). Jedoch ist auch festzuhalten, dass diese Übergänge keine klaren Grenzen aufweisen. So besitzen Geovisualisierungen für den Verwendungszweck der Kommunikation auch eine Darstellungskomponente, Geovisualisierungen für den Einsatzbereich der Darstellung hingegen auch eine Kommunikationskomponente (Slocum et al. 2009; MacEachren 1995).

Die Ansprüche an die Geovisualisierungen hängen maßgeblich vom Nutzer und dessen Fragestellung, unter der er die Karte oder Geovisualisierung betrachtet, ab. Primär sind es die Verkehrsforscher selbst, welche Kartenmaterial zu Ergebnisdaten von Verkehrsmodellen nutzen und sich entweder mit der Modellierung oder der Weiterverarbeitung der Simulationsergebnisse befassen. Sie stammen

i.d.R. aus unterschiedlichen Fachdisziplinen wie der Geographie, Soziologie, Mathematik oder Informatik und betrachten Ergebnisdaten dementsprechend aus verschiedenen Perspektiven und unter differierenden Fragestellungen.

Grundsätzlich steht jedoch die Verifizierung und Plausibilisierung der Ergebnisdaten stets im Vordergrund. Daher ist zu prüfen ob die Simulationsergebnisse auch repräsentativ und belastbar sind. Außerdem existiert in der Forschung ein kontinuierliches Interesse an der visuellen Analyse im Sinne einer explorativen Datenanalyse (Explorative Data Analysis, EDA), um raum-zeitliche Phänomene und Muster innerhalb der Daten zu erkennen und sie ggfs. zu visualisieren. Weiterhin messen die Verkehrsforcher Geovisualisierungen eine hohe Bedeutung als Hilfsmittel zur Erkenntnisvermittlung gegenüber externen Fachleuten und Laien zu. Diese kommen im Rahmen von Publikationen, Workshops, Präsentationen oder auf Postern zum Einsatz. Ziel ist es dabei, die Forschungsbereiche des Instituts aufzuzeigen und die Simulationsergebnisse anschaulich darzustellen.

Durch die Tatsache, dass Geovisualisierungen externen Forschern und Laien zur Erkenntnisvermittlung dienen, sind diese als weitere Nutzer von Geovisualisierungen zu betrachten. Ziel dieses Nutzerkreises ist die Erfassung eines generellen Überblickes über die wichtigsten Inhalte der Ergebnisdaten. Anzunehmen ist hierbei, dass externe Fachleute und Laien kein vertieftes Fachwissen über die Verkehrsforchung besitzen.

Für Stadtplaner oder andere Entscheider verkehrspolitischer Maßnahmen bieten Simulationsergebnisse keine ausreichende Datenbasis. Für diese Gruppen müssen die Ergebnisdaten erst durch Umweltmodelle, Emissionsmodelle, Verbrauchsmodelle oder andere erweitert werden, um auf ihrer Basis Handlungsempfehlungen ableiten zu können.

Zusammenfassend können also zwei verschiedene Nutzergruppen ausgemacht werden: Fachleute mit konkreten sowie Laien ohne konkrete Fragestellungen. Diese Nutzergruppen lassen sich auf dem oben erläuterten Kartennutzungsraum verorten: Die Geovisualisierungen für Fachleute werden lediglich im Rahmen des Verkehrsforchungsinstituts genutzt. Ihr wesentlicher Verwendungszweck ist das Aufdecken von Unbekanntem. Sie gehen mit einem hohen Darstellungsanspruch einher und benötigen daher umfangreiche Interaktivitäten. Die Geovisualisierungen für Laien hingegen dienen der Kommunikation, werden einem breiten Publikum gezeigt, bilden bekannte Verkehrssachverhalte ab und benötigen daher geringere Interaktionsmöglichkeiten.

2.3.1 Vorhandene Geovisualisierungsgrundlagen

Nachdem zuvor die Anforderungen an Geovisualisierungen für Ergebnisdaten aus Verkehrsmodellen beschrieben wurden, sollen nun die Geovisualisierungsgrundlagen im Kontext zum Verkehr erörtert werden. Die allgemeinen Grundlagen zur Erzeugung und Anwendung von Geovisualisierung sind in

einschlägigen Standardliteraturen bereits ausgiebig dargestellt worden (Slocum et al. 2009; Hake et al. 2002; MacEachren 1995; Bertin 1974). Ein wesentliches Fazit aus deren Lektüre ist die Notwendigkeit, die verschiedenen Ausdrucksmittel korrekt anzuwenden, um Raumbezug effizient abzubilden. Eine weitere Erkenntnis stellt die Information dar, dass die maximale Anzahl der darzustellenden Informationsebenen auf sechs bis sieben begrenzt ist.

So stehen beim Erstellen von Geovisualisierungen lediglich drei verschiedene geometrische Grundformen zur Verfügung: Punkt, Linie und Fläche. Zieht man in Betracht, dass es sich bei der räumlichen Lage von Objekten bereits um Information handelt, stehen insgesamt acht so genannte *visuelle Variablen* zur Verfügung, um zusätzliche Angaben abzubilden: *Größe* (Size), *Helligkeit* (Lightness), *Sättigung* (Saturation), *Muster* (Texture), *Farbe* (Hue), *Richtung* (Orientation) und *Form* (Form). Slocum zählt hingegen zudem noch die *Anordnung* (Arrangement) und die *Fokussierung* (Focus) zu den visuellen Variablen.

Eine gute Geovisualisierung lässt sich durch ihre Effizienz beim Lesen messen. Effizienz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Betrachter einer Karte die dargestellten Informationen schnell und korrekt interpretiert und versteht. Dies kann am besten dadurch erreicht werden, dass sowohl die Nutzergruppe als auch der Zweck und die primäre Aussage genau definiert sind. Dadurch können bspw. sekundäre Informationen identifiziert und gezielt einbezogen oder ausgeschlossen werden. Außerdem sollte eine eindeutige, der Nutzergruppe vertraute Symbolologie verwendet werden, die eine Fehlinterpretation der Informationen ausschließt. Diese und noch weitere Techniken zur Steigerung der Effizienz sind in der oben aufgelisteten Standardliteratur ausgiebig beschrieben.

Bei der Geovisualisierung von raumzeitlichen Informationen, um welche es sich bei den Ergebnissen von Verkehrsmodellen handelt, spielt der Kontext der Zeit eine ganz besondere Rolle (Klein 2013; Vasiliev 1996). In Abbildung 3 ist dargestellt wie Klein diese Formen von Zeit mittels der eingangs genannten visuellen Variablen auf die geometrischen Dimensionen Punkt, Linie und Fläche überträgt.

Klein hält außerdem fest, dass es Informationen über *Zeitpunkte* (Moments) gibt, wie bspw. die erste Inbetriebnahme eines Bahnhofes oder einer Bahnstrecke oder ein bestimmter Hochwasserstand, die durch alle Grundgeometrien abgebildet werden können. Das gilt auch für Informationen über eine *Zeitdauer* (Duration) wie bspw. die Aufenthaltsdauer an einem Ort, Fahrtzeiten zwischen zwei Orten oder Öffnungszeiten von Arealen. Informationen über die *Zeitstrukturen* (structuring time) wie Öffnungstage bestimmter Einrichtungen oder die Frequentierungen von Buslinien können dagegen nicht als Fläche dargestellt werden.

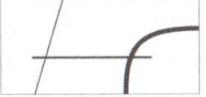
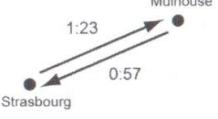
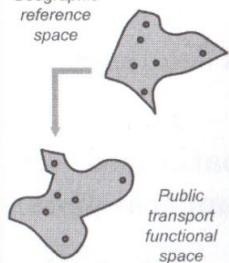
Category	Geometric dimensions		
	Point	Line	Area
Moments Events dates	● June 2007 <i>Opening of the high speed train station in Lorraine</i>	June 2007 <i>High speed East line put into service</i>	 <i>Flooding of the Savoureuse river 2005</i>
Durations Events continuity	Station not served from 25 th to 29 th December 2006 Bus stations for the route 12 9:45 ● 9:56 ● 10:02 ● 10:02 ●	German attack on Douaumont, 21 th to 25 th February 1916 9:56 ● 10:02 ● 9:45 ● Bus route 12 (stops and connections)	 <i>North PSA car park use from Thursday to Saturday</i> Thursday  Friday  Saturday 
Structuring time Frequency	Opening days for ticket office at Sochaux FC ● Monday ● Tuesday ● Wednesday	Frequency of 3 bus lines  — once a week — twice a week — daily	
Standard time	 Central time zone UTC		
Time as distance Time interval	Temporal locations of places from the train station 	Time-distance by train 	Geographic reference space 
Space as Clock	East: sunrise West: sunset		Time zones

Abbildung 3: Kategorien von Zeitinformationen und deren Visualisierungsmöglichkeiten (Klein 2013)

Sobald Informationen über *zeitliche Distanzen* (*time as distance*), wie bspw. Standorte, die in einer bestimmten Zeit erreicht werden können oder Fahrzeiten einer Strecke, behandelt werden, verschwimmt die strikte Trennung von Punkt und Linie. So wird das Beispiel der zeitlichen Lage zu einer bestimmten Station (*temporal locations of places from the train station*) von Klein als Punkt, von Vasiliev jedoch als Linie kategorisiert. Richtiger handelt es sich jedoch um eine Kombination aus Punkt und Linie, da die Information erst durch eine gemeinsame Verwendung beider Grundgeometrien dargestellt werden kann. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass auch Informationen über einen Raum, durch den Zeit gemessen werden kann (*space as a clock*) - wie etwa Sonnenauf- und –untergänge oder Zeitzonen - durch eine Kombination von Punkt und Fläche abgebildet werden können.

Klein hält fest: Die Gruppierung der Ausdrucksmöglichkeiten nach Kategorien der Zeit verdeutlicht, dass raumzeitliche Sachverhalte im zweidimensionalen Format nur begrenzt darstellbar sind. Er führt weiter aus, dass wegen der starken zeitlichen Variabilität der darzustellenden, umfangreichen Daten weitere Ausdrucksmöglichkeiten untersucht werden müssen. Innerhalb der Kartentypen, die sich mittels der soeben vorgestellten Ausdrucksmöglichkeiten erstellen lassen, besitzen Isochronenkarten (Abbildung 4), Choroplethenkarten (Abbildung 5) und anamorphe Karten (Abbildung 6 und Abbildung 7) die stärkste Aussagekraft.

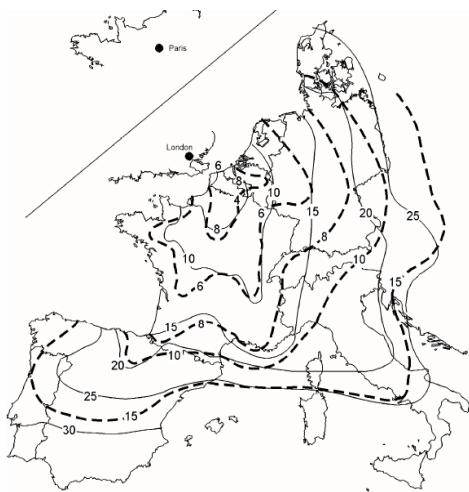


Abbildung 4: Isochronenkarte
(Spiekermann & Wegener 1993, p.5)

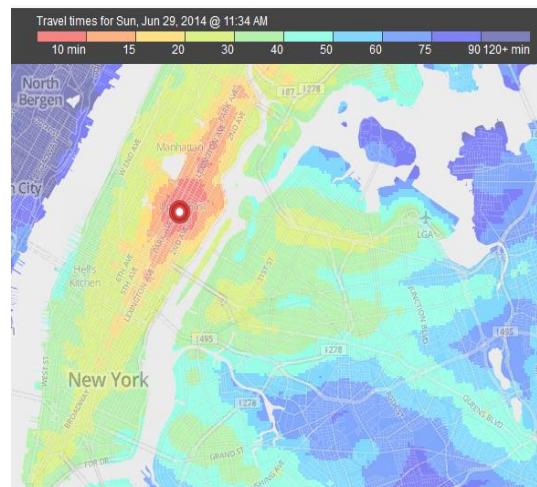


Abbildung 5: Chronoplethenkarte
(Hardin 2014)



Abbildung 6: Unipolar anamorphe Karte
(Dunn 2014)

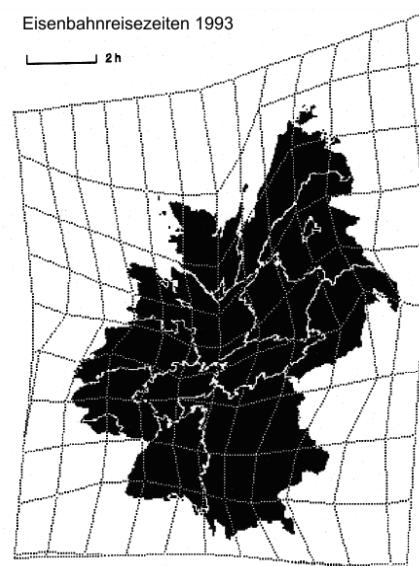


Abbildung 7: Multipolar anamorphe Karte
(Spiekermann & Wegener 1993, p.36)

Durch Isochronenkarten werden Reisezeiten und Erreichbarkeiten eines bestimmten Ausgangspunktes durch Linien gleicher zeitlicher Erreichbarkeit (Isochrone) dargestellt, siehe Abbildung 4. Die Isochronen repräsentieren die durchschnittliche oder maximale mögliche Entfernung vom Startpunkt in der jeweiligen Zeit. Demnach umschließen sie gleichzeitig das Gebiet, in welchem jeder Ort des abgebildeten Areals innerhalb einer bestimmten Zeit erreicht werden kann (Gortana et al. 2014; Hardin 2014). Wird diese Fläche zusätzlich eingefärbt, spricht man von einer Chronoplethenkarte (siehe Abbildung 5).

Unipolar anamorphe Karten besitzen ebenfalls nur einen Ursprung zur Reisezeitbestimmung und Linien gleicher Reisezeit, jedoch sind diese Linien konzentrisch angeordnet, vergleiche Abbildung 6. Entsprechend der Reisezeit, nähert oder entfernt sich die geographische Lage einzelner Zielpunkte zum Ausgangsort. Das in Abbildung 6 dargestellte Beispiel zeigt die Reisezeiten der Bostoner Metro an. Ausgehend von der zentralen Station *Massachusetts Bay*, haben alle Stationen der blauen Linie in Richtung *Wonderland* (rechts in der Karte) einen Abstand von 2 Minuten, wohingegen schwankende Fahrtzeiten zwischen den Stationen der grünen Linie in Richtung *Health Street* (links in der Karte) auftreten.

Multipolare anamorphe Karten unterscheiden sich sehr stark von den zuvor erläuterten Kartentypen. Bei diesen überlagern Linien gleicher Länge den Raum in Form eines Rasters. Gemäß der Reisezeit von Eckpunkt zu Eckpunkt der Rasterzelle werden Raster und Raum jeweils verkleinert oder vergrößert dargestellt. Im Ergebnis kann die Reisezeit zwischen frei wählbaren Start- und Zielpunkten relativ genau abgemessen werden. Außerdem entstehen großflächige Vergrößerungen oder Verkleinerungen, wodurch sich Gebiete mit besonders kurzen oder langen Reisezeiten lokalisieren lassen. Ein Beispiel: Abbildung 7 zeigt die Eisenbahnreisezeiten in den alten und neuen Bundesländern im Jahr 1993. Deutlich erkennbar ist, dass trotz vergleichbarer Distanzen Bahnreisen in den neuen Bundesländern zu diesem Zeitpunkt erheblich mehr Zeit erforderten als in den alten. Nach Modellrechnungen wurde durch die Einführung von Schnellzug-Trassen spätestens 2010 ein Gleichgewicht hergestellt (Spiekermann & Wegener 1993).

Die vier zuvor beschriebenen einfachen Kartentypen gelten als mono-temporale Formen, da sie lediglich Informationen eines bestimmten Zeitabschnittes abbilden können. Multi-temporale Informationen, die Angaben zu mehreren Zeitabschnitten beinhalten, können durch animierte Karten (Kartenanimationen) oder dreidimensionale Karten (3D-Karten) dargestellt werden.

Mit Hilfe von Kartenanimationen können Karten verschiedener Zeitabschnitte hintereinandergeschaltet werden und bieten sich besonders an, wenn bereits im Vorfeld Informationen zu verschiedenen Zeitschnitten vorliegen. Durch Kartenanimationen können aus der Zeit resultierende Veränderungen

besonders gut in den Blickpunkt gerückt werden. Hinsichtlich der Verkehrsmodelle betrifft das bspw. die Fokussierung auf Bewegungen einzelner Personen oder -gruppen (Ferzoco et al. 2014; Carr 2013a; Vanhala 2013), die Auslastung einzelner Straßenzüge (FlightAware 2013a; Ostermann et al. 2005) oder die Wandelung von Flächennutzungen (En-topia 2014; Masucci et al. 2013).

Kartenanimationen verfügen über einen hohen Grad an Interaktivität (Harrower & Fabrikant 2008; MacEachren 1995). Neben der möglichen Verwendung der Funktionen *Start*, *Pause*, *Stopp* und der Regulierung der Abspielgeschwindigkeit können auch entscheidende Animationssequenzen (*Key Frames*) hervorgehoben werden. Kartenanimationen ergänzen die visuellen Variablen um sechs weitere dynamische Variablen. Die wichtigsten vier seien an dieser Stelle genannt: Die *abgebildete Zeitspanne* (Display Date), die Zeitspanne, in der Objekte oder *Szenen* unterscheidbar sind (Duration), die *Reihenfolge* der Szenen (Order) und die *Änderungsrate* zwischen den Szenen (Rate Of Change). Von besonderer Bedeutung ist, dass für eine effiziente Wahrnehmung von Kartenanimationen eine konstante Änderungsrate vorherrscht und eine angemessene Abspieldauer angeboten wird, die sich mittels Multiplikation aus der Anzahl der Szenen und der Änderungsrate ergibt. In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind Standbilder von Kartenanimationen beispielhaft dargestellt.

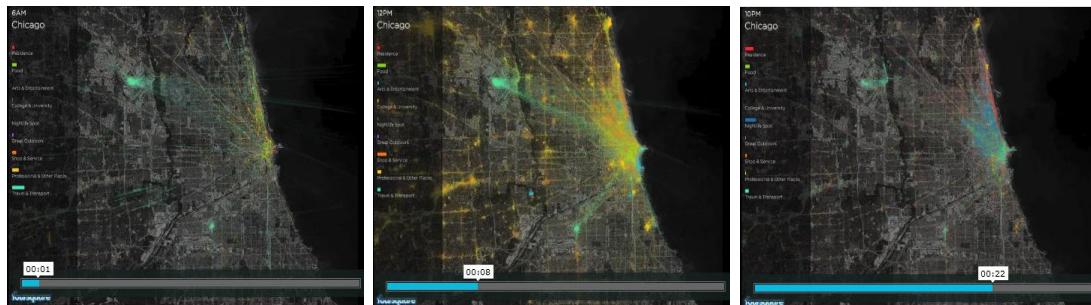


Abbildung 8: Standbilder einer Kartenanimation von Aktivitäten in Chicago (Carr 2013b)
links: 6:00 Uhr, mittig: 12:00 Uhr, rechts, 22:00 Uhr



Abbildung 9: Standbilder einer Kartenanimation von Flughafenauslastungen der USA (FlightAware 2013b)

Die Kartenanimation in Abbildung 8 stellt den Verlauf von Aktivitäten in Chicago dar. Die Daten stammen aus dem sozialen Netzwerk *Foursquare*. Die Animation hat eine Abspieldauer von 32s und betrachtet 24h eines Tages, beginnend und endend bei 8:00 Uhr. In der Legende auf der linken Seite

werden die Uhrzeit der aktuellen Szene angezeigt, die Signaturen benannt und durch horizontale Balken quantitativ beschrieben.

Die in Abbildung 9 dargestellte Kartenanimation befasst sich mit den Auslastungen und Verspätungen von Flughäfen in den USA. Die Animation enthält stets aktuelle Daten und bildet die vergangenen 48h ab, bemessen zum Zeitpunkt des Kartenaufrufes. Die Abspielzeit beträgt 25s, wobei es Geschwindigkeitssprünge gibt. Die Auslastungen werden durch Kreisdiagramme an den Positionen der Flughäfen quantitativ beschrieben, durch eine Segmentierung der Diagramme können die anteiligen Verspätungen ebenfalls abgelesen werden. Unterhalb der Karte befindet sich ein gestapeltes Flächendiagramm (Stacked Area Plot), in dem die Uhrzeit der Szene und die Summe aller Flughafen-auslastungen abgebildet sind.

Ein Nachteil von Animationen ist jedoch, dass sie vom Nutzer meist mehrmals betrachtet werden müssen und selbst dann oftmals noch nicht alle Informationen erfasst werden konnten. Außerdem gilt es, multi-temporale Kartenanimationen von sogenannten Überflug-Animationen (Fly-Over) abzutrennen, in denen ein bestimmter Raum überflogen wird. Charakteristisch für Überflug-Sequenzen ist, dass sie die Informationen nicht um eine weitere zeitliche Komponente erweitern, womit es sich bei ihnen um mono-temporale Kartenanimationen handelt.

Neben der Kartenanimation ist es auch durch 3D-Karten möglich, multi-temporale räumliche Informationen darzustellen. Dabei erfolgt eine Übertragung der zeitlichen Komponente auf die z-Achse, wodurch es sich um künstlich erzeugte Höheninformationen statt echter geographischer Höhe handelt. Dies führt formal gesehen zu einer 2,5D-Karte. Durch die Separierung der Zeit auf einer eigenen Achse können Raum- und Zeitkomponenten der Informationen vom Kartennutzer gleichzeitig betrachtet werden, was die Animation hingegen nicht ermöglicht.

Im Bereich der Verkehrsorschung können 3D-Karten z.B. für die Darstellung zeitlicher Änderungen von Nutzflächen oder Infrastrukturen genutzt werden, wie in Abbildung 10 dargestellt. Der gesamte abgebildete Zeitraum beträgt hierbei ein Jahr. Betrachtet man die dargestellten „Säulen“, fällt auf, dass es einmalige, tägliche, wöchentliche und monatliche Öffnungen gibt (wobei der Rhythmus der täglichen Öffnung einmalig unterbrochen wird und jener der monatlichen zwischen März und April eine zusätzliche Öffnung aufweist).

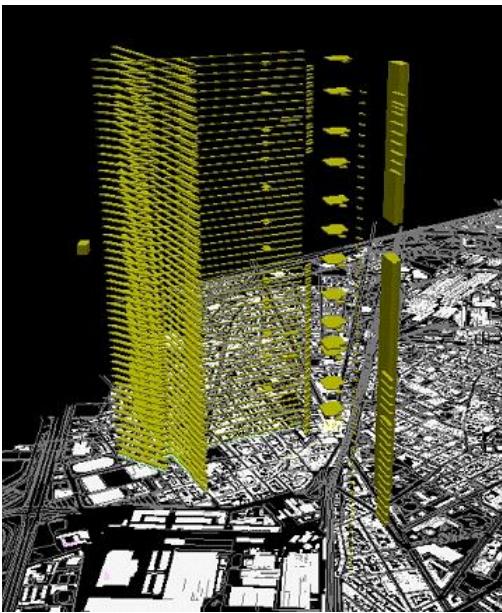


Abbildung 10: 3D-Darstellung der Öffnungszeiten ausgewählter Einrichtungen (Ostermann et al. 2005, p.17)

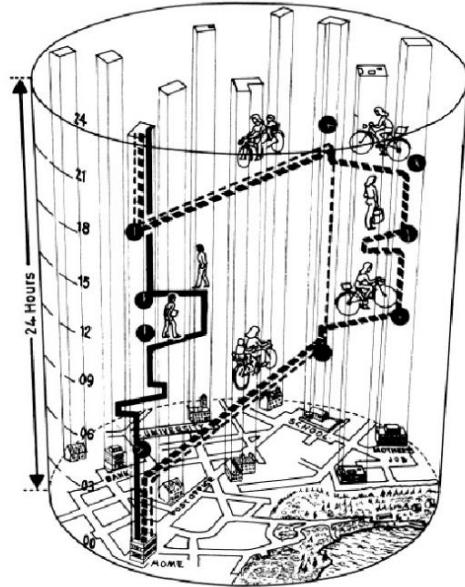


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Raum-Zeit-Pfades (Lenntrop 1976)

In der Verkehrsorschung kommen multi-temporale 3D-Darstellungen in Form von *Raum-Zeit-Pfaden* (Space-Time Paths) wesentlich häufiger zum Einsatz. Dieser Kartentyp entstand um 1970 innerhalb des Fachbereichs Zeitgeographie der Universität Lund in Südschweden. Im Vordergrund stehen dabei die raumzeitlichen Bewegungen von Personen, eines Fahrzeugs oder weiterer Objekte. Durch diese Darstellungsform lassen sich Interaktionen zwischen Personen und Infrastruktur sehr genau verfolgen (Lenntrop 1976; Hägerstrand 1975).

Raum-Zeit-Pfade bieten sich als Darstellungsform an, wenn raumzeitliche Änderungen einzelner Objekte nachvollzogen werden sollen. So wird dieser Kartentyp bspw. in Gerichtsverhandlungen eingesetzt um potentielle Aufenthaltsorte beschuldigter Personen zu bestätigen oder zu widerlegen (Schmitz et al. 2009; Fyfe 1992). Außerdem können sie in Sportanalysen eingesetzt werden. Sie kommen auch in der Zoologie, speziell der Ornithologie, zum Einsatz, um Brut- und Fütterungsverhalten zu visualisieren (Zhao et al. 2013). Außerdem können auch virtuelle Interaktionen wie das Telefonieren oder Verfassen von E-Mails dargestellt werden (Schwanen & Kwan 2008). Ein beliebtes Anwendungsbeispiel von Raum-Zeit-Pfaden ist auch eine Übertragung der Karte Charles Joseph Minards des verlustreichen Russland-Feldzugs Napoleons im Jahr 1812 (Kraak & Ormeling 2010, p.156).

Der Einsatz von 3D-Karten muss jedoch kritisch betrachtet werden: Einige bei ihrer Verwendung auftretenden Nachteile resultieren aus einer Überlastung der vertikalen Bildachse (y-Achse im Bild), die durch die Abbildung einer 3D-Szene als 2D-Rasterbild zwangsläufig entsteht (Hudson-Smith 2008a). Während die horizontale Bildachse (x-Achse im Bild) ausschließlich Rauminformationen darstellt, bildet die vertikale Achse Raum- und Zeitinformationen gleichzeitig ab. Das Beispiel in Abbildung 10

demonstriert dies: Die einmalige mehrtägige Öffnung ganz links kann zwar auf der vertikalen Bildachse geographisch eindeutig zugeordnet werden, die zeitliche und geographische Komponente auf der vertikalen Bildachse ist aber nicht eindeutig oder nur mit größerem Aufwand zuzuordnen.

Darüber hinaus entstehen Verdeckungen, die durch verschiedene Maßnahmen wieder behoben werden können (Hudson-Smith 2008b). Verdeckende Objekte können bspw. herausgefiltert (object culling), minimiert (object minimization) oder verschoben (object displacement) werden. Alternativ kann die Sicht auch verzerrt (view distortion) oder der Blickwinkel verschoben werden (rotation or viewer movement). Außerdem ist es möglich, Symbolen Transparenzen (symbol transparency) oder Schatten (symbol shadow) zuzuweisen. Schließlich können auch mehrere Sichten auf die Daten gleichzeitig angeboten werden (multiple linked views).

Viele negative Beispiele beim Einsatz multi-temporaler 3D-Karten resultieren aus ihrer Verwendung zur Abbildung bergiger Regionen, da die gleichzeitige Darstellung der natürlichen Gelände-Höhe und künstlichen Zeit-Höhe im starken Widerspruch stehen (Kwan 2000). Ein weiterer bedeutender Nachteil der 3D-Karten ist, dass die Zahl der abgebildeten Informationen beschränkt sein muss, da diese ansonsten nur schlecht angezeigt werden können (Klein 2013, p.189; Kwan 2000, p.197)

Wie dargelegt, spielt die Abbildung der zeitlichen Informationskomponente in Geovisualisierungen eine sehr große Rolle. Karten über Verkehrsströme und Straßenauslastungen sind ebenfalls wichtige Instrumente bei der Arbeit mit Verkehrsdaten. Bei diesen Kartentypen bildet das jeweilige Verkehrsnetz die Kartengrundlage. Das Volumen von Verkehrsströmen wird typischerweise auf die Linienbreite einzelner Straßensegmente übertragen, wobei teilweise die Fahrtrichtung getrennt betrachtet wird. Bei Auslastungskarten ist es hingegen üblich, die Straßensegmente gemäß dem Ampelprinzip einzufärben, also Grün zur Darstellung fließenden Verkehrs, Orange für stockenden Verkehr und Rot zur Abbildung von Stau zu verwenden, siehe .

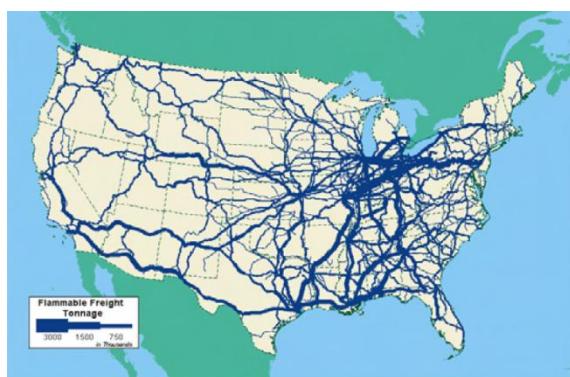


Abbildung 12: Verkehrsvolumen, abgestuft durch Linienbreite (Caliper 2008, p.2)



Abbildung 13: Verkehrsfluss, abgestuft durch Ampelfarben (Caliper 2008, p.7)

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass die im Vorfeld präsentierten Kartentypen durchaus kombiniert werden können. So lassen sich bspw. Verkehrsströmungskarten oder anamorphe Karten einzelner Zeitschnitte auch als Animationen darstellen. Das in Abbildung 14 angeführte Beispiel stellt die Verkehrsauslastung dreidimensional dar. Zusätzlich werden verschiedene Zeitpunkte durch eine Animation verbunden und können auch einzeln betrachtet werden.

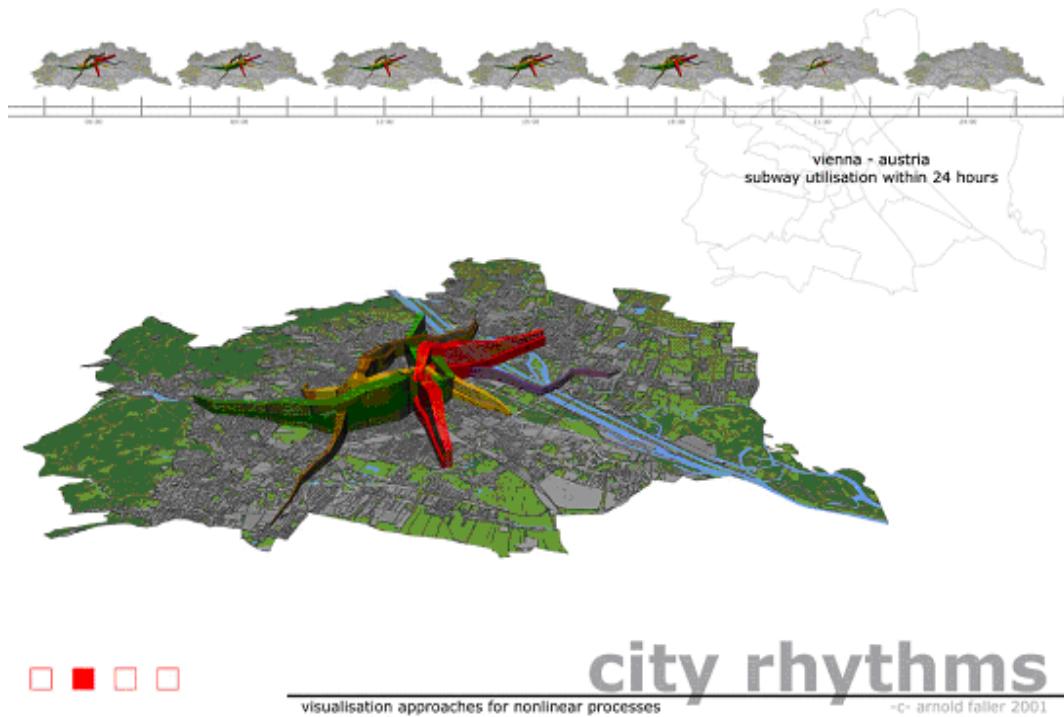


Abbildung 14: Kombination aus 3D-Karte, Auslastungskarte und Animation

Da interaktive Geovisualisierungen meist eine grafische *Benutzerschnittstelle* (Graphical User Interface, GUI) besitzen, muss auch auf eine effiziente *Handhabbarkeit* (Usability) geachtet werden (Tobón 2002; Andrienko et al. 2002; Slocum et al. 2001). Ein Betrachter, der durch die Nutzung der Interaktivität zum Benutzer wird, könnte mit einer zu aufwändig gestalteten GUI schnell überfordert sein. Ein typischer Nutzer einer interaktiven Karte beginnt i.d.R. damit, sich durch bloßes Betrachten der Startansicht eine Übersicht über die dargestellten Karteninhalte zu verschaffen. Als zweites führt er Navigationsaktionen wie das Vergrößern, Verkleinern oder Verschieben des Kartenausschnittes aus, um sich genauer zu orientieren und erste genaue Informationen abzulesen. Erst in einem dritten Schritt verwendet der Nutzer Werkzeuge, um bestimmte Aufgaben an der Karte durchzuführen zu können. Diverse Funktionen für die Suche oder das Anpassen von Karteninhalten sind meist in komplexen Menüstrukturen, Dialogen und Formularen eingebettet. Dabei gilt es unerfahrene Nutzer mittels *Assistenten* (Wizards) zu führen und erfahrenen Nutzern umfangreiche *Konfigurationsdialoge* bereitzustellen.

2.3.2 Vorhandene Geovisualisierungstechnologien

Die Methoden, Techniken und Anwendungen zum Erzeugen von Geovisualisierungen sind einem fortwährenden Wandel unterworfen, dessen Motor vor allem die rasante Entwicklung aller Bereiche der Computertechnik ist (Batty et al. 2013). Neue Hardwareperipherien ermöglichen innovative Formen der Darstellung und Interaktion, rufen aber auch bislang unbetretene Wege der Datenerzeugung hervor. Neuartige Softwaresysteme hingegen eröffnen fortschrittliche und effiziente Lösungsansätze seitens der Datenprozessierung. Dabei sind zwei grundlegende Trends erkennbar: Die Bewegung weg von der Visualisierung am Arbeitsplatzrechner (*Desktopvisualisierung*) hin zur Visualisierung im Internet (*Webvisualisierung*) und die Ablösung der 2D-Visualisierung durch die 3D-Visualisierung (Batty et al. 2013).

Gleichgültig, ob Desktop oder Web, 2D oder 3D - für die Erzeugung einer Geovisualisierung muss ein Kartenmodell erzeugt werden. Dafür ist die strukturierte Abarbeitung der allgemeinen Visualisierungspipeline ratsam, wie sie in Abbildung 15 schematisch dargestellt ist. Ähnlich dem Vier-Stufen-Algorithmus ist auch die *Visualisierungspipeline* aus hintereinandergeschalteten Stufen aufgebaut (Griethe & Schumann 2006). In der ersten Stufe, dem Filtern (*Filtering*), werden die Rohdaten ausgedünnt, ergänzt, korrigiert oder interpoliert. In der zweiten Stufe, dem Zuweisen (*Mapping*), werden die aufbereiteten Daten durch Regeln, die im Normalfall weit über ein einfaches 1:1-Zuweisen hinausgehen, um Darstellungsparameter wie Farbe, Textur oder Größe ergänzt. Die entstandenen Geometriedaten werden in einer dritten und letzten Stufe in ein Rasterbild übertragen (*Rendering*). Mit Hilfe der Visualisierungspipeline lassen sich die in Abschnitt 2.3.1 genannten Techniken zur Erhöhung der Interpretationseffizienz systematisch anwenden.

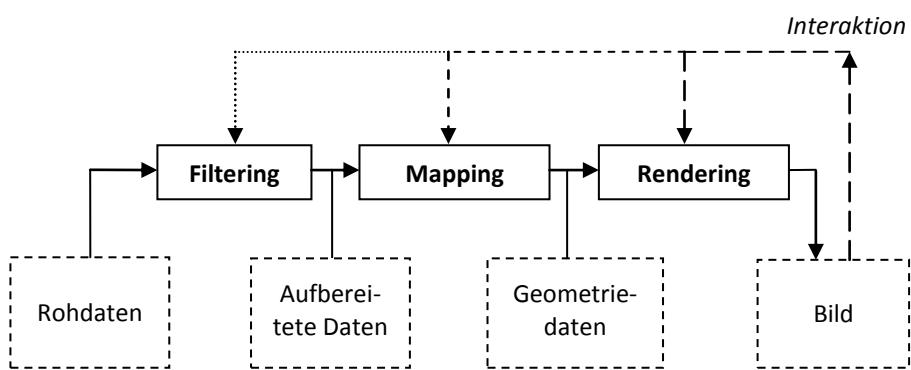


Abbildung 15: Schematischer Ablauf der Visualisierungspipeline

Die Visualisierungspipeline kann sowohl für das Erstellen als auch für das Betrachten von Geovisualisierungen herangezogen werden. Beim Erstellen filtert der Autor die Rohdaten, mappt die Attribute und rendert das Bild durch spezielle Software. So kann er nach der Betrachtung des entstandenen

Bildes einen der drei Arbeitsschritte wieder fortsetzen und die Bildausgabe weiter optimieren. Ein Betrachter kann, je nach Grad der Interaktivität einer Geovisualisierung, ebenfalls das Rendering beeinflussen, die Zuweisung von Darstellungsparametern anpassen oder Rohdaten filtern und somit zum Nutzer werden.

Fertige Geovisualisierungen liegen oft in verschiedenen Formaten vor: Als digitales Rasterbild bspw. im Joint Photographic Experts Group-Format (JPEG), Portable Network Graphic-Format (PNG) oder Graphics Interchange Format (GIF), als digitale Vektordatei etwa im Scalable Vector Graphics-Fomat (SVG) oder im Keyhole Markup Language-Format (KML), im Portable Document Format (PDF), integriert in eine bestehende Desktop-Anwendung (*GoogleEarth*, *GIS*, *VIS*) oder Web-Plattform wie *MapTube*, als eigenständige Videodatei (bspw. MPG, AVI) und nicht zuletzt auch als eigenständige Desktop- sowie Web-Anwendung.

Digitale Rasterbilder und Vektordateien können mittels Standard-Visualisierungssoftware (Standard-VIS) wie den kommerziellen Programmen *Adobe Illustrator* und *Corel Draw* oder dem quelloffenen *Inkscape* erzeugt werden. In diesen Standard-VIS werden alle Elemente per Hand gezeichnet. Speziell für die Kartographie entwickelte Erweiterungen (Plugins) beschleunigen das Erstellen von Geovisualisierungen erheblich. Beispiele dafür sind die kostenfreien *Plugins für die Kartografie* der ETH-Zürich oder der kommerzielle *MAPublisher* von Avenza. Problematisch wird der Einsatz dieser Standard-VIS jedoch bei sehr umfangreichen und komplexen Visualisierungsprojekten oder bei sich schnell ändernden Basis- und Fachdaten. Im schlimmsten Falle müsste jede Geometrie per Hand einzeln erstellt werden. Deshalb werden i.d.R. automatische Geovisualisierungsansätze angestrebt, die möglichst optimale *Kartenvorstufen* erzeugen, welche dann durch ein VIS lediglich „veredelt“ werden müssen.

Eine Möglichkeit, Kartenvorstufen zu erzeugen bieten die *General Mapping Tools (GMT)*. Dabei handelt es sich um eine Sammlung (Suite) mehrerer kleiner Kommandozeilenprogramme. Ein Großteil der separaten Programme sind für das Einlesen einzelner Daten zuständig und visualisieren diese nach definierten Mapping-Regeln. Weitere Programme sind für die Ergänzung um zusätzliche Kartelemente wie Titel, Legende, Maßstab usw. verantwortlich. Die einzelnen Programmaufrufe können gesammelt und in Form von Anweisungsketten (Skript) automatisch sequenziell aufgerufen werden. So kann ein Skript nach Änderungen der Eingangsdaten sehr schnell angepasst und ausgeführt werden, um eine neue Kartenvorstufe zu erzeugen.

Dieses Vorgehen machen sich auch spezielle VIS, wie *R* oder *Processing*, zunutze. Sie verkörpern Skripting- und Visualisierungskomponente in Einem und sind durch ausgesprochen umfassende und vielseitige Skriptsprachen gekennzeichnet. Mit ihnen können praktisch alle Stufen der Visualisie-

rungspipeline automatisiert durchlaufen werden. Durch das Skript entsteht eine enge Kopplung zwischen den Daten und dem Ergebnisbild, womit sich durch Anpassungen des Skriptes schnelle Aktion-Reaktion-Ketten aufbauen lassen und ein sehr rasches visuelles Erkunden der Daten bewirkt wird. Dadurch eignen sich diese Anwendungen für die Explorative Datenanalyse (EDA).

Der Nachteil dieses Ansatzes und auch jener der *GMT* ist jedoch, dass diese auf Visualisierungsprototypen wie etwa Netzdiagrammen oder Choroplethenkarten aufbauen, die über Parameter mit den eigenen Daten gefüllt werden müssen. Das heißt, dass eigene Geovisualisierungsmethoden den Vorgaben der Visualisierungsprototypen untergeordnet werden müssen. Individuelle Geovisualisierungen können lediglich durch aufwändige Bearbeitung der Visualisierungsparameter erstellt werden oder sind in diesen Umgebungen gar nicht realisierbar.

Ein weiterer Ansatz für die Erzeugung von Rasterbildern oder Vektordateien ist die Nutzung eines Geoinformationssystems (GIS) wie bspw. *ESRI ArcMap*, *Quantum GIS* (QGIS) oder *OpenJUMP*. Sein großer Vorteil ist, dass räumliche Basisdaten und Fachdaten überwiegend bereits mit einem GIS verwaltet werden und dieses auch eine Vielzahl an Methoden für die Aufbereitung von Informationen bereitstellt. Durch Druck- und Export-Dialoge können die visualisierten Daten um Titel, Legende, Nordpfeil usw. ergänzt werden. Hauptproblem ist allerdings, dass GIS nur Datenmodelle visualisieren können, jedoch keine Kartenmodelle. Darum sollte ein GIS lediglich für das Erzeugen oder Bearbeiten der Rohdaten innerhalb der Filtering-Stufe der Visualisierungspipeline eingesetzt werden.

GIS sind hauptsächlich für die Arbeit mit 2D-Daten konzipiert. Durch *ESRI ArcScene* können jedoch auch 3D-Daten erzeugt, bearbeitet und visualisiert werden. Diese Funktionalitäten können auch bei *QGIS* und *OpenJUMP* durch Erweiterungen wie *NVIZ* oder *Globe* nachträglich integriert werden. Fertige 3D-Geovisualisierungen lassen sich damit allerdings nicht erzeugen. So könnten höchstens Standbilder geschaffen oder Filmaufnahmen vom Bildschirm mitgeschnitten werden.

Losgelöst vom eigenen Desktop kann auch Software eingesetzt werden, die eine starke Anbindung zum Web besitzt, also mit externen Servern verbunden ist. Dabei bieten sich besonders *Google Earth* oder der *NASA World Wind* an, welche eine 3D-Umgebung bereitstellen, in denen die eigenen Daten visualisiert werden können. Die jeweiligen Umgebungen bieten außerdem Hintergrunddaten an, die von externen Servern bezogen werden. Das Rendering der Hintergrund- und eigenen Daten erfolgt auf dem persönlichen Desktop. Die eigenen Daten müssen bereits aufbereitet sein und bspw. im KML-Format vorliegen. Ein großer Vorteil dieser Umgebungen ist, dass sie Funktionen für die 2D- und 3D-Navigation, Datenabfrage und Interaktivität anbieten. Diese Interaktivitäten beschränken sich aber i.d.R. auf das Hervorheben von Geometrien oder das Öffnen eines Infodialoges, in dem die Sachdaten der abgebildeten Objekte aufgelistet werden. Zusätzlich ist jedoch das Erstellen und Ab-

spielen von 3D-Animationen möglich. Als nachteilig zu werten ist, dass die genannten Umgebungen für die bloße Betrachtung einer Geovisualisierung vollständig auf dem eigenen Desktop installiert sein müssen. Außerdem besteht eine Abhängigkeit zwischen einer schnellen Internetverbindung für das Laden der externen Hintergrunddaten einerseits und einer potenzen Grafikleistung für das Rendern der 3D-Inhalte andererseits. Beim Arbeiten mit den Hintergrunddaten der jeweiligen Anwendung gibt es zusätzlich das Problem, dass Angaben zur Genauigkeit und zum Erstellungsdatum üblicherweise fehlen, was den Umgang mit eigenen zeitgebundenen und lagekritischen Daten erschwert.

Serverseitige Visualisierungs-Plattformen wie *MapTube* oder *MapBox* bieten einen noch höheren Grad der Unabhängigkeit vom eigenen Desktop. Bei diesen müssen die eigenen Daten erst auf den externen Server hochgeladen werden. Das Rendering erfolgt meist auf dem jeweiligen Server oder teilweise wiederum auf dem Desktop des Nutzers. Ein großer Vorteil bei diesem Verfahren ist, dass die fertig gestellten Geovisualisierungen für die Öffentlichkeit bereitgestellt und standortunabhängig weiterbearbeitet werden können. Negativ jedoch ist, dass die Visualisierungsmöglichkeiten eigener Daten derzeit noch sehr stark eingeschränkt sind und somit individuelle Geovisualisierungen nur im begrenzten Maße erstellt werden können (Batty et al. 2013). Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass durch das Hochladen der eigenen Daten nicht mehr nachvollzogen werden kann, ob diese vom Betreiber des Servers weiterverarbeitet oder evtl. sogar an Dritte weitergegeben werden. Personenbezogene Daten, die bspw. durch Wegeaufzeichnungen (Tracking) entstanden sind, sollten daher vor dem Hochladen unbedingt einer Anonymisierung unterzogen werden.

Alle in diesem Rahmen aufgelisteten Erstellungsmöglichkeiten von Geovisualisierungen sind für die Arbeit mit Ortsveränderungen letztlich unzulänglich. Aus diesem Grund existieren bereits kommerzielle Programme wie *Senozon Via* und *Caliper TransCAD* und bieten professionelle Geovisualisierungen für Verkehrsdaten an. Diese können als Verkehrs-VIS bezeichnet werden. Bei Senozon Via handelt es sich um eine Software, welche die Ergebnis-Tripfiles eines Verkehrsmodells als Eingangsdaten nutzt. Entwickelt wurde sie in einer Kooperation mit der TU-Berlin und dessen Verkehrsmodell MATSim. Dementsprechend ist Senozon Via auf die Ergebnisdaten von MATSim optimiert und seine Anwendung auf die Tripfiles anderer Verkehrsmodelle mit einem gewissen Aufwand verbunden. Caliper TransCAD erfüllt die Aufgaben eines Transport-GIS (T-GIS), durch das Datenmodelle der Verkehrssimulation verwaltet, analysiert und visualisiert werden können.

Eine große Hürde für den Einsatz eines dieser Verkehrs-VIS stellen die Anschaffungskosten von 4.000€ für Senozon Via und 12.000€ für Caliper TransCAD für Einjahreslizenzen dar. Zusätzlich erschwerend kommen die damit verbundenen Einarbeitungsaufwände und die nicht gering zu schätzenden Mühen bei der Anpassung der Tripfiles hinzu. Die Simulationsergebnisse von Verkehrsmodellen liegen je Modell in einem eigenen Spezialformat vor, welches auf das Eingangsformat der kom-

merziellen Verkehrs-VIS aufwändig zugeschnitten werden muss. So gilt auch hier, dass die eigenen Geovisualisierungsansprüche notwendigerweise dem angebotenen Funktionsumfang der jeweiligen Software untergeordnet werden.

2.3.3 Vorhandene Implementierungstechniken

Wie bereits erläutert, ist das Aufbauen auf vorhandenen Desktop- oder Web-Anwendungen für den anvisierten Zweck ungeeignet, da die Ergebnisse in diesem Fall zu aufwändig herzustellen sind und zudem drohen, unbefriedigend auszufallen. Darum sollen Möglichkeiten und Aufwände betrachtet werden, die notwendig sind, um eine eigene Desktop- oder Web-Anwendung für Geovisualisierungen zu entwickeln.

Für die Entwicklung einer solchen kann eine Vielzahl an entsprechender Literatur herangezogen werden. Dabei sind die Schriften zum Thema Datenaufbereitung und Datenvisualisierung i.d.R. auf die einzelnen Programmiersprachen oder jeweiligen Bibliotheken zugeschnitten. Die aktuell verbreiteten Programmiersprachen mit einem GIS-/VIS-Bezug sind *C++*, *Java*, *Python* und *JavaScript* (Bourguignon 2014). Bei den drei erstgenannten handelt es sich um Desktop-Programmiersprachen, welche vor dem Ausführen (Interpretation) in Maschinencode umgewandelt (kompiliert) werden müssen. *JavaScript* hingegen ist eine Web-Programmiersprache und kann ohne Kompilierung ad hoc interpretiert werden.

Die Desktop-Programmiersprachen verfügen über keine direkten Visualisierungskapazitäten. Methoden für die 2D- und 3D-Visualisierungen werden i.d.R. durch die Open Graphics Library (*OpenGL*) angesprochen (Apetri 2010). Bei OpenGL handelt es sich um eine Programmierschnittstelle (Application Programming Interface, API), durch welche auf die Rechenkapazitäten der Grafikkarte zugegriffen werden kann. Sie ist plattformunabhängig und wird von allen gängigen Grafikkarten unterstützt. Jedoch gibt es eine direkte Konkurrenz zu *DirectX* und *Direct3D*, die ausschließlich auf Windows-Plattformen genutzt werden können.

C++ ist eine objektorientierte Programmiersprache (OOP), die auf der Programmiersprache *C* aufbaut. Sie ist sehr nah an der Hardware ausgerichtet, was das Erstellen sehr leistungsstarker (hochperformanter) Anwendungen ermöglicht. So können bspw. ausgesprochen aufwändige und realitätsnahe 3D-Visualisierungen erstellt werden. Die Nähe zur Hardware wirkt sich jedoch auch nachteilig aus, da durch sie sehr hohe Anforderungen bei der Implementierung anfallen. Außerdem werden Programme in *C++* als Binärdateien ausgeliefert, welche für das jeweilige Zielsystem kompiliert vorliegen müssen, also plattformabhängig sind. Funktionen für die Arbeit mit räumlichen Informationen liefert die Bibliothek *Geometry Engine Open Source (GEOS)* (Warmerdam 2008). Beispiele

für die Anwendung von C++ und GEOS stellen bspw. *QGIS*, die *PostGIS*-Erweiterung für das DBMS *PostgreSQL* und der Kartenserver der Universität Minnesota *UMN-Mapserver* dar.

Bei *Java* handelt es sich ebenfalls um eine OOP. Programme in *Java* sind im Gegensatz zu *C++*-Programmen plattformunabhängig, da sie nicht vom Betriebssystem sondern von der *Java Virtual Machine* (JVM) interpretiert werden (Herter & Koos 2008). Die JVM selbst muss jedoch für jedes Betriebssystem separat installiert sein. Durch die Abkapselung der Hardware über die JVM können Java-Programme nicht so maschinennah und somit theoretisch weniger performant als *C++* sein. Funktionen für die Arbeit mit räumlichen Informationen werden durch die Bibliothek *Geotools* bereitgestellt. Visualisierungsmethoden für 2D- und 3D-Abbildungen bietet hingegen die Bibliothek *Java 3D API*. Diese muss jedoch zusätzlich zur JVM installiert sein, was nicht selbstverständlich gegeben ist und dazu führt, dass die versprochene Plattformunabhängigkeit der Java-Programme nicht mehr im vollen Maße besteht. Zahlreiche Desktop-GIS wie das Userfriendly Desktop und Internet-GIS (*uDig*) und *deegree OpenJUMP* wurden in *Java* entwickelt. Darüber hinaus existieren auch WebGIS-Server wie der *Geoserver* und der *deegree Web Services* in dieser Programmiersprache, wobei letzterer die *Java 3D API* auch für das Rendering von 3D-Karten einsetzt.

Python besitzt gerade im GIS-Bereich einen sehr hohen Stellenwert, da viele Plugin-Schnittstellen für diese Programmiersprache existieren (Zandbergen 2013; Westra 2010). Erweiterungsschnittstellen für Python werden bspw. von *ArcGIS*, *QGIS*, *PostGIS* und *Processing* angeboten. Der Grund dafür ist, dass der Einsatz von *Python* auch als Skriptsprache möglich ist, der Programmcode also nicht manuell kompiliert werden muss sondern vom System direkt interpretiert werden kann. In der Regel bietet jedes Softwaresystem dafür eine eigene Python-Bibliothek an: *ArcPy* für *ArcMap* und *PyQGIS* für *QGIS*. Außerdem lassen sich räumliche Funktionalitäten durch die Bibliotheken *GeoPy* und *Python Library for Spatial Analytical Functions* (PySAL) nachrüsten (Morais 2012). Funktionen für die Visualisierungen werden durch die GIS und CAD-Programme bereitgestellt oder müssen selbst mittels OpenGL implementiert werden. Daneben existiert aber auch die Möglichkeit mit der Bibliothek *RPy* eine Schnittstelle zum Spezial-VIS *R* herzustellen.

JavaScript als Web-Programmiersprache wird nicht durch das Betriebssystem, sondern durch den Webbrowser interpretiert (de Lange 2013; Mitchell 2005). Die Hauptaufgabe von Webbrowsern ist die Darstellung einzelner Webinhalte wie bspw. Text, Rasterdaten, Vektordaten und Video, in Form einer Website (Webseite). Die Webinhalte einer Webseite sind in Form eines Hypertext Markup Language-Dokuments (HTML) beschrieben. Das HTML-Dokument und die anderen Webinhalte werden von Webservern bereitgestellt. Webbrowser und Webserver kommunizieren dabei über das Hypertext-Transfer-Protokoll (HTTP). Komplexe dynamische Webseiten wie bspw. ein WebGIS können als Webapplikation bezeichnet werden, wobei der Webserver i.d.R. zusätzliche Logik- und Datenhal-

tungsschichten für die jeweiligen Webinhalte einsetzen. Eine typische Web-Architektur ist in Abbildung 16 dargestellt (de Lange 2013).

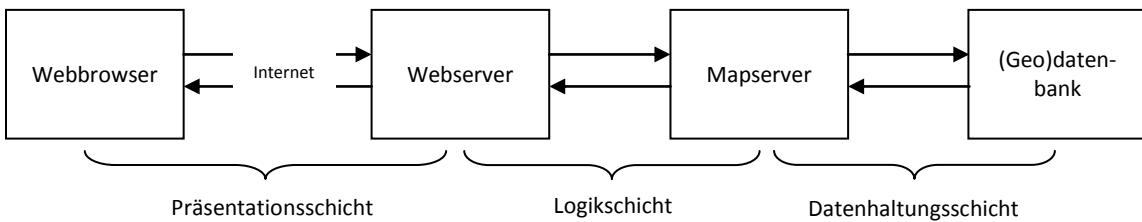


Abbildung 16: Typische Web-Architektur für ein WebGIS (nach de Lange 2013)

Für die Darstellung statischer Geovisualisierungen im Webbrowser bieten sich Rasterdaten im JPEG-, PNG- oder GIF-Format sowie Vektordaten im SVG-Format an. Da die Vor- und Nachteile des Einsatzes von Raster- und Vektordaten in der Standardliteratur bereits ausgiebig beschrieben wurden, soll an dieser Stelle nur auf das SVG-Format näher eingegangen werden. Bei SVG handelt es sich um einen Webstandard, der (wie bspw. auch HTML) durch das World Wide Web Consortium (W3C) festgelegt wird. SVG beschreibt die Strukturierung von Vektoren, also Polygone, Linien, Punkte sowie Kreise, Ellipsen, Rechtecke und auch Text. Erstmals 2001 eingeführt, liegt SVG seit 2008 in der Version 1.2 vor. SVG hat sich auch außerhalb des Webs etabliert. Es wird von allen bekannten GIS und VIS als Export- und vereinzelt als Import-Format angeboten. Es kann als Zielformat für ad-hoc Geovisualisierungen (Slocum et al. 2009) oder für sehr aufwändige Geovisualisierungen wie bspw. dem Tirol Atlas eingesetzt werden (Aistleitner 2009). Ein großer Vorteil von SVG ist zudem, dass für seine Darstellung kein VIS notwendig ist, sondern ein üblicher Webbrowser genügt.

SVG stellt nicht die einzige Web-Visualisierungstechnik dar. Auch die *Web Graphics Library* (WebGL) und *Canvas* bieten sich an. Bei diesen handelt es sich jedoch nicht um ein Dateiformat wie bei SVG, sondern um Programmierschnittstellen (API). Durch Canvas können komplexe Vektor-Bilder erstellt werden, wobei mehr Ausdrucksmittel zur Verfügung stehen, als bei SVG. WebGL erweitert diese noch einmal um 3D-Kapazitäten, die API ist dabei sehr dicht an OpenGL angelehnt. Auch wenn diese drei Techniken sich durch deren Einsatzschwerpunkt von 2D- und 3D-Szenen und die erweiterten Ausdrucksmöglichkeiten wie Farbverläufe und Schattierungen stark unterscheiden, sind ihre geometrischen Grundformen dennoch identisch (Punkt, Linie und Fläche). Auf Basis dieser Gemeinsamkeiten unterscheiden sie sich ausschließlich hinsichtlich ihrer Laufzeiteigenschaften und Implementierungsaufwände (Kee et al. 2012). WebGL-Visualisierungen sind aufgrund der vorhandenen Unterstützung durch die Graphikkarte am schnellsten, jedoch auch am aufwändigsten zu implementieren. Canvas-Visualisierungen hingegen sind etwas langsamer, benötigen jedoch nicht einmal ein Viertel des Im-

plementierungsaufwands. Am langsamsten werden SVG-Visualisierungen im Webbrowser dargestellt, wobei die Dauer ihrer Implementierung nur noch ein Siebtel derer von WebGL beträgt.

Zahlreiche JavaScript-Bibliotheken unterstützen dabei die Arbeit mit SVG, Canvas und WebGL. Für SVG eignet sich *Data Driven Documents (D3.js)* besonders, welche SVG-Elemente sehr eng an die Daten koppelt (Murray 2013). Die Erstellung von Canvas-Grafiken kann durch Bibliotheken wie *KineticJS.js* und *Processing.js* unterstützt werden. Deren Schwerpunkt liegt hauptsächlich in der Koordination von Interaktivitäten, die in SVG bereits ohne Zusatzbibliothek sehr unkompliziert an einzelne Vektor-Elemente gekoppelt werden können. Im Hinblick auf WebGL überzeugt die Bibliothek *Three.js*, die komplexe WebGL-Befehle vereinfacht abbildet, Animationen erstellen lässt und Interaktionsmöglichkeiten mit den 3D-Vektoren ermöglicht.

Die Bereitstellung hochperformanter 3D-Visualisierungen stellte einst ein Alleinstellungsmerkmal von Desktop-Software dar. WebGL markiert jedoch nur einen weiteren Meilenstein für den in Abschnitt 2.3.2 erwähnten Übergang von der Desktop-Visualisierung hin zur Web-Visualisierung.

2.4 Vorhandene Verkehrsmodelle und deren Einsatz von Geovisualisierungen

In den vorherigen Abschnitt wurden verschiedene theoretische Aspekte der Erstellung von Geovisualisierungen besprochen. An dieser Stelle wird nun geprüft, welche Methoden und Techniken in etablierten Verkehrsmodellen tatsächlich eingesetzt werden. Untersucht werden die Verkehrsmodelle Verkehr In Städten - SimulationsModell (VISSIM), Multi-Agent Transport Simulation Toolkit (MATSim), Integrated Land Use, Transportation, Environment (ILUTE) und Travel and Activity Patterns Simulation (TAPAS).

Untersucht werden die Modelle dabei auf deren Besonderheiten, Eingangsdaten, Simulationsprozessierung und Ergebnisdaten mit besonderen Blickwinkel auf Geovisualisierungen.

2.4.1 Verkehr In Städten - SimulationsModell (VISSIM)

Das kommerzielle Verkehrsmodell VISSIM wird von der Planung Transport Verkehr AG (PTV) in Karlsruhe entwickelt. Es wird auch als Simulationssystem bezeichnet, in dessen Kern ein psychophysisches Wahrnehmungsmodell hinterlegt ist (PTV 2011; Wiedemann 1974). Durch VISSIM ist es möglich, die technischen Aspekte des Verkehrs zu modellieren, was die Schwerpunktsetzung auf Lichtsignalsteuerung, Fahrstreifenwahl und Reaktionsgeschwindigkeit des Fahrers belegt. Die PTV AG, welche Kunden in über 100 Ländern und 600 Mitarbeiter besitzt, stellt mit VISSIM das marktführende Verkehrsmodell (Gust 2013). Implementiert ist es in C++ .

Eingabedaten wie routingfähige Netze, können mit Hilfe von VISSIM selbst erstellt oder bearbeitet werden. Auch das Konfigurieren von Ampelanlagen, Kreisverkehren oder Routen von ÖPNV-Linien ist möglich. Um das psycho-physische Modell nach Wiedemann durchführen zu können, müssen außerdem sogenannte Fahrer-Fahrzeug-Einheiten beschrieben werden. Dazu gehört die technische Spezifikation des Fahrzeugs (Länge, Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungsvermögen etc.), das Verhalten des Fahrers (Schätzvermögen, Sicherheitsempfinden, Risikobereitschaft, Gedächtnis u.a.m.) sowie die Verknüpfung zu vorrausfahrenden bzw. folgenden Fahrer-Fahrzeug-Einheiten.

Zur Auswahl stehen zwei Simulationstypen: ein statisches sowie ein dynamisches (Doina & Chor 2009; AG 2012). In der statischen Variante wird der Verkehr durch die Knoten und Kanten des Verkehrsnetz konfiguriert und ist somit immer gleich. Für die dynamische Form ist es nötig, eingehende und ausgehende Verkehrsströme manuell auf Zellen abzubilden, die anschließend automatisch auf das Verkehrsnetz aufgeteilt werden. Somit beginnt VISSIM die eigentliche Simulation erst mit der zweiten Stufe des VSAs.

Die Arbeit mit VISSIM ähnelt der an einem GIS. So wird das Datenmodell in einem großen Bildschirmbereich permanent visualisiert. Zum Einsatz kommen Verkehrsflusskarten (Abbildung 17) und Kartenanimationen (Abbildung 18). Außerdem kann in einen 3D-Modus gewechselt werden, in dem Gebäude, Verkehrswege sowie Autos und Fußgänger animiert dargestellt werden können, (Abbildung 19 und Abbildung 20). Diese sind sehr großmaßstäbig und von daher eher für die Betrachtung des Verkehrsflusses in kleineren Arealen geeignet, wie einzelne Straßenzüge, Plätze oder Kreuzungen. Die PTV AG selbst bewirbt die Visualisierungsmöglichkeiten mit den Worten: „Wechseln Sie in PTV VISSIM die Perspektive per Mausklick und stellen Sie Ihre Analyseergebnisse überzeugend dar: Unterstützen Sie öffentliche Entscheidungsprozesse mit detaillierten Berichten, 2D-Animationen und beeindruckenden 3D-Visualisierungen. So machen Sie komplexe Verkehrsabläufe für jeden ansprechend und verständlich.“



Abbildung 17: Durchschnittsgeschwindigkeit auf den Autobahnauffahrten (PTV 2014b)



Abbildung 18: „Simulation eines teilsignalisierten Kreisverkehrsplatzes mit Spiralmarkierung und ÖV-Priorisierung“ (PTV 2014a)



Abbildung 19: „Verkehrsmanagement in PTV VISSIM: Integrierte Simulation von variabler Geschwindigkeitsanzeige und temporärer Seitenstreifenfreigabe“ (PTV 2014b)



Abbildung 20: „Simulation von nicht spurgebundenem Verkehr mit PTV VISSIM: Verschiedene Fahrzeugarten teilen sich die Fahrbahn“ (PTV 2014c)

2.4.2 Multi-Agent Transport Simulation Toolkit (MATSim)

MATSim ist ein mikroskopisches Verkehrsmodell, das vom Institut für Land- und Seeverkehr an der TU-Berlin und dem Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH-Zürich gemeinsam entwickelt wird (Kagerbauer 2010, p.24). Ziel von MATSim ist es, einen Werkzeugkoffer (Toolkit) bereitzustellen, durch welchen eine Bandbreite von Anwendungsmöglichkeiten abgearbeitet werden kann, zu denen die Verkehrs nachfrage-Simulation, Verkehrsflüsse-Simulation und Aspekte der Stadtplanung gehören. Dabei arbeitet MATSim „mit der Annahme, dass der Verkehr ein Nebenprodukt der menschlichen Aktivitäten ist und durchgeführt wird, um bestimmte Bedürfnisse zu befriedigen“.

MATSim ist Open Source Software und in der Programmiersprache Java implementiert.

Die Eingangsdaten müssen in verschiedenen Dateien hinterlegt sein, die in einem MATSim-eigenen Dateiformat vorliegen (Zilske 2011). Dazu gehört das *Plans File*, in dem die Personen der Bevölkerung einzeln beschrieben werden, das *Network File* für die Verkehrsnetze, das *Facilities File* für die verschiedenen Standorte. Außerdem wird die jeweilige Simulation in einem *Configuration File* wieder gegeben. Zu beachten ist dabei, dass im *Plans File* bereits Aktivitätenpläne für jede Person hinterlegt

werden und die Aktivitätstypen im Configuration File genauer beschrieben sein müssen. Die genaue Wahl der Datenquelle ist dem Nutzer des Toolkits selbst überlassen.

Für die Modellierung werden die Aktivitäten in primäre (Arbeit und Ausbildung) und sekundäre (Freizeit und Einkauf) Klassen untergliedert (Kagerbauer 2010). Die primären Aktivitäten werden durch eine Monte-Carlo-Simulation platziert, wohingegen die sekundären per Zufall innerhalb eines bestimmten Radius an der vorherigen Aktivität platziert werden. Das Routing findet unter der Berücksichtigung des Verkehrsflusses durch den Dijkstra-Algorithmus statt. Ungleichgewichte im Verkehrsfluss werden durch Änderungen der Aktivitätenpläne angeglichen.

In den Ergebnisdaten von MATSim stehen neben den üblichen Protokolldateien (Logfiles) detaillierte Informationen zum Tagesablauf (Events) einzelner Personen innerhalb der Verkehrsnetze und Standorte, typische Diagramme und Tabellen (Plots and Text Files) wie Modal Split und Reisezeiten, Aufsummierungen (Counts) des Verkehrsaufkommen pro Stunde, Tag oder Woche. Hinzu kommen Geovisualisierungen, die durch die Module *On The Fly Visualisierung* (OTFVis) oder *Senozon Via* nachträglich erzeugt werden können (Nagel 2013; Balmer 2011).

Das Open Source Modul OTFVis und das kommerzielle Modul Senozon Via sind eigenständige Module, die in MATSim integriert werden können. Beide Module bieten eine interaktive Visualisierung an. Sie unterscheiden sich darin, dass OTFVis auch zur Steuerung der Simulation genutzt werden kann und Senozon Via erweiterte Analysemethoden bereitstellt. Die Geovisualisierungen sind vielfältig: Nachverfolgung einzelner Tagespläne (Abbildung 21), Verkehrsflusskarten (Abbildung 22), Erreichbarkeitskarten und Heatmaps können erzeugt werden. Durch den Export von KML-Dateien können Ergebnisdaten in Google Earth visualisiert werden (Abbildung 23). Außerdem ist es möglich, Kartenanimationen zu exportieren, in denen mehrere oder einzelne Verkehrsmittel hervorgehoben werden

Abbildung 24. Die beiden Module sind ebenfalls in Java implementiert.

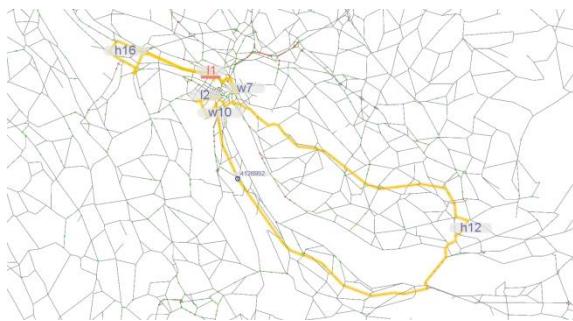


Abbildung 21: Nachverfolgung des Tagesplanes einer einzelnen Person durch OTFVis (MATSim 2012a)

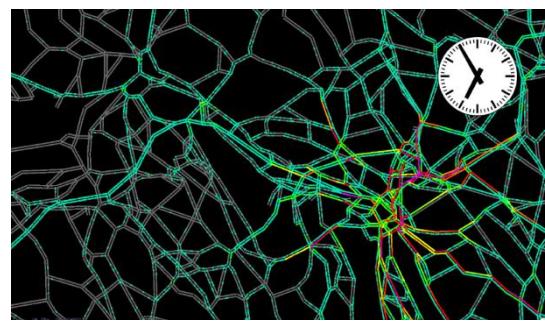


Abbildung 22: Ausschnitt einer Kartenanimation zur Visualisierung von Verkehrsflüssen durch OTFVis (MATSim 2012b)

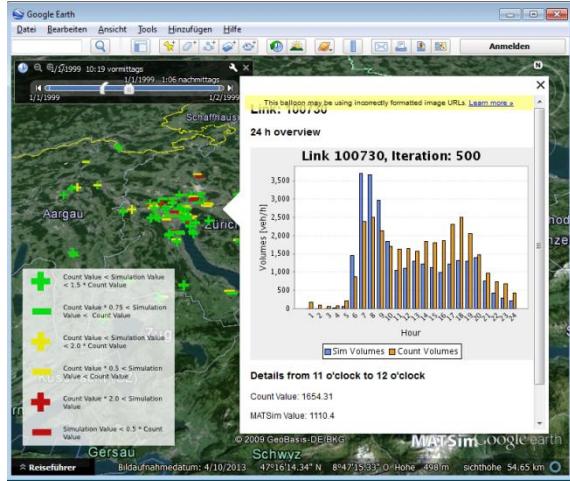


Abbildung 23: Visualisierung durch Google Earth;
Diagramme und Legende als Bilder integriert;
Details einzelner Verkehrsknoten können in
Infobox dargestellt werden (MATSim 2012b)



Abbildung 24: Ausschnitte aus Kartenanimation.
Signaturierungen können nach Attributen der Personen
angepasst werden (Senozon 2014)

2.4.3 Integrated Land Use, Transportation, Environment (ILUTE)

Das mikroskopische Modell ILUTE wird vom Transportation Research Institute der University of Toronto (UTTRI) entwickelt. Es stellt ein integriertes Rückkopplungsmodell (integrated full-feedback model) dar, welches übergeordnete Entscheidungen abbilden kann, wie bspw. die Wahl des Wohnortes oder des Arbeitsplatzes, den Kauf eines Autos oder eine Eheschließung (Salvini & Miller 2005). Diese haben maßgeblichen Einfluss auf untergeordnete Entscheidungen wie Freizeit- und Einkaufsaktivitäten. Als Hauptuntersuchungsgebiet dient die Greater Toronto Area (GTA). Implementiert ist das Modell in C++ und kann per Anfrage von den Entwicklern bezogen werden.

Neben den grundlegenden Eingangsdaten wie Daten zur Bevölkerungsstruktur und den Verkehrsnetzen, sind detaillierte Angaben über den Wohnungs- und Arbeitsmarkt notwendig, um die höherwertigen Entscheidungen abbilden zu können (Liu et al. 2013; Harmon 2013; Farooq et al. 2008a). Die Datenquellen dafür sind der *Census of Canada* (Volkszählung), in denen auch der Ausbildungsgrad beschrieben ist, der *Canadian Labour Force Survey*, der Beschäftigten- und Arbeitslosenquoten nach Industriesektor prognostiziert, der *InfoCanada Business Register*, welche Firmenstandorte nach Industriesektor mit geographischen Angaben auflistet und der *Survey of Labour and Income Dynamics*, der Umfrageergebnisse zum Wohlbefinden und der wirtschaftlichen Verschiebung von Einzelpersonen und Haushalten liefert.

Die Prozessierung des ILUTE-Modells beginnt mit der Erstellung der Bevölkerung (Farooq et al. 2008b). Dabei wird geprüft, ob synthetische Personen der letzten Census Datenerhebung noch vorhanden sind, geheiratet haben oder geschieden wurden. Als nächstes werden die Veränderungen des Immobilien- und Arbeitsmarktes auf die letzten Ausgangsdaten übertragen. Abschließend werden Tagespläne generiert, in denen auch die untergeordneten Aktivitäten integriert werden.

Die Ausgabe der Ergebnisdaten ist in einem binären Format oder in Form von relationalen Datenbanktabellen möglich. Geovisualisierungen der Ergebnisdaten können durch das 3D-Animationserkzeug *Huidini* realisiert werden, das Teil von *Side Effects Software* ist (Salvini & Miller 2005). Huidini und Side Effects Software ist in C++ implementiert, die Visualisierung erfolgt durch OpenGL.

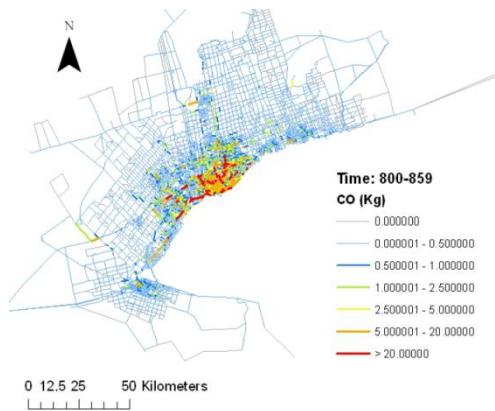


Abbildung 25: Ausschnitt einer manuell erstellten Kartenanimation über Kohlenstoffmonoxid-Emissionen im Zeitraum zwischen 13:30 und 14:30 Uhr (Miller 2010a, p.63)

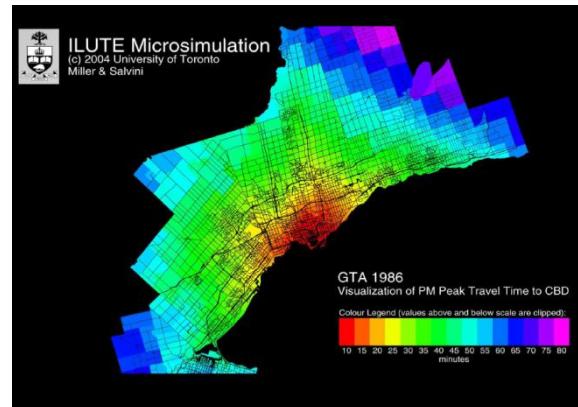


Abbildung 26: Reisezeiten, ausgehend vom CBD am Nachmittags-Berufsverkehr (Miller 2010b, p.93)

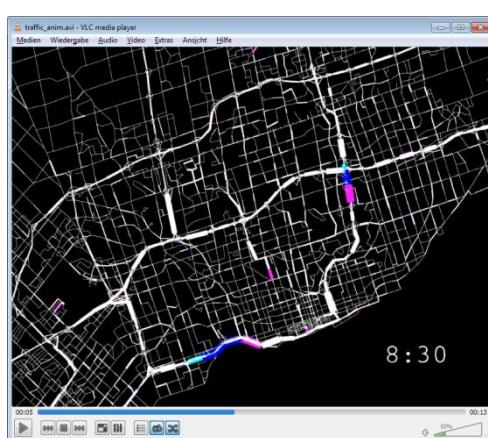


Abbildung 27: Ausschnitt einer Kartenanimation, die automatisch durch Houdini erstellt wurde (Salvini 2005)

2.4.4 Travel and Activity Patterns Simulation (TAPAS)

Das Verkehrsmodell TAPAS ist ebenfalls ein mikroskopisches Modell und wird vom DLR-IVF entwickelt. Der Fokus dieses Verkehrsmodells liegt auf der detaillierten Betrachtung vieler verschiedener Einzelaktivitäten (Kagerbauer 2010; Cyganski & Justen 2007). Außerdem wird die Maßnahmenwirkung auf Einzelpersonen anhand zeitlicher und finanzieller Faktoren bemessen. TAPAS betrachtet, wie auch ILUTE, den Haushaltszusammenhang einzelner Personen. Hauptzielgebiete sind die Städte Berlin, Dresden und Braunschweig. Implementiert ist das Modell in Java.

Die notwendigen Eingangsdaten stammen hauptsächlich von den Statistischen Bundes- und Landesämtern sowie dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Neben den üblichen Bevölkerungsstrukturdaten gehören dazu der Bericht zur *Mobilität in Deutschland* (MiD), die *Einkommens- und Verbrauchsstichprobe* (EVS) und die *Zeitbudgeterhebung* (ZBE).

Die Prozessierung des Modells beginnt mit der Haushaltsbildung, in der die Bevölkerungsstrukturen mit Aktivitätenmustern verknüpft werden, welche sich aus der ZBE ergeben (Kagerbauer 2010; Cyganski & Justen 2007). Für die Verteilung der anzusteuernden Ziele wird ein mehrstufiges Verfahren angewendet, in dem erst die übergeordneten, dann die untergeordneten Aktivitäten nach dem Intervening Opportunities-Ansatz platziert werden. Das Ergebnis sind Aktivitätenpläne, die mit auf zeitliche und finanzielle Durchführbarkeit, dem Personenhaushalt und Restriktionen der Umgebung, wie bspw. Ladenöffnungszeiten, geprüft und ggf. angepasst werden müssen. Die Zuweisung des Hauptverkehrsmittels geschieht empirisch auf Basis der Daten im MiD-Bericht, wobei der Haushaltskontext gewahrt wird.

Die Simulationsergebnisse werden in einer Datenbank gespeichert und können von dort manuell in andere Textdatei-Formate exportiert werden. Geovisualisierungen der Ergebnisdaten existieren derzeit nicht. Einzig durch den am DLR-IVF entwickelten *Mobility Calculator* ist es möglich, den raumzeitlichen Verlauf von Wegeketten auf Basis von Google Maps darzustellen. Über den Mobility Calculator können Außenstehende ihr Haushaltsprofil eingeben (Haushaltsgröße, Haushaltseinkommen, Erwerbsstatus etc.) sowie Wohnort und Standort der Hauptaktivität (bspw. des Arbeitsplatzes oder der Schule) eintragen. Abschließend wird, wie oben beschrieben, der Person ein Aktivitätenmuster zugewiesen, das dann als Animation auf der Karte durchlaufen wird.

2.5 Zwischenfazit

Die Ergebnisdaten der komplexen Verkehrsmodelle finden verschiedenste Anwendungen, obwohl es sich lediglich um Tripfiles handelt. Die Art und Weise der Verkehrsmodellierung ist dabei stark von den speziellen Rahmenbedingungen der jeweiligen Anwendungsregion und der Datenverfügbarkeit abhängig. So ist es durchaus notwendig, für neue Zielgebiete oder neue Modellierungsschwerpunkte ein eigenes Verkehrsmodell zu erstellen (ILUTE, TAPAS) oder ein generalisiertes Verkehrsmodell aufwändig zu konfigurieren (VISSIM, MATSim). Es gibt also kein „one fits all“-Verkehrsmodell, das keine Wünsche mehr offen lässt.

Beim Abgleich der Geovisualisierungsgrundlagen, aus Abschnitt 2.3.2, und der eingesetzten Geovisualisierung der ausgewählter Verkehrsmodelle, aus Abschnitt 2.4, sind drei Auffälligkeiten festzuhalten. Zum einen werden alle beschriebenen Kartentypen, bis auf die Raum-Zeit-Pfade, von den Verkehrsmodellen angeboten. Das ist überraschend, da dieser Kartentyp in der Literatur zur Geovisualisierung von raumzeitlichen Phänomenen inflationär beschrieben wird. Kartenanimationen hingegen werden sind die am häufigsten anzutreffende Visualisierungsform. Zum anderen kommen 3D-Inhalte ausschließlich in großmaßstäbigen Ansichten vor. Insgesamt ist zu erkennen, dass die Aggregationsstufe von Personen der ausschlaggebende Faktor zum Einsatz der jeweiligen Kartentypen ist. Diese Aggregationsstufen sind folgendermaßen gestaffelt:

1. Geovisualisierungen mit Fokus auf einzelne Individuen
2. Geovisualisierungen mit Fokus auf aggregierte Individuen
3. Geovisualisierungen mit Fokus auf alle Individuen

Für die Geovisualisierung der Ergebnisdaten bieten sich die in Abschnitt 2.3.1 vorgestellten monotemporalen sowie multi-temporalen 2D, temporalen 3D und zeitgeographischen Geovisualisierungen an. Deren Eignung, Vor- und Nachteile ebenso wie Einschätzungen ihres Erzeugungsaufwand sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

	Mono-temporal 2D	Kartenanimation	3D-Karten	Raum-Zeit-Pfade
Eignung	Reisezeiten, Einzelbilder aus dynamischen Karten und Animationen	Linear verlaufende raumzeitliche Änderungen; Aktivitätenmuster	Nichtlinear verlaufende raumzeitliche Änderungen	Verfolgung und Vergleich raumzeitlicher Änderungen einzelner Objekte
Vorteile	Geringe Informationsdichte erleichtert Informationsvermittlung	Intuitive Erfassung raumzeitlicher Veränderungen von Objekten; hohes Interaktivitätspotential	Intuitive Erfassung raumzeitlicher Veränderungen von Objekten; hohes Interaktivitätspotential; Anschaulichkeit durch 3D	Akteursbezogene Perspektive; Erkenntnisgewinn durch innovative Darstellungsform
Nachteile	Teilweise zu hohe Abstraktionsleistung des Betrachters notwendig (betrifft v.a. anamorphe Karten); teilweise fehlende Interaktivität	Unterschiedliche Wahrnehmung einzelner Betrachter erfordert evtl. Wiederholungen	Überlastung der Y-Bildachse; unterschiedliche Wahrnehmung einzelner Betrachter erfordert längere Wiederholungen; Verdeckungen	Überlastung der Y-Bildachse; unterschiedliche Wahrnehmung einzelner Betrachter erfordert längere Wiederholungen; Verdeckungen; Abbildung großer Datenmengen nicht möglich
Erzeugungsaufwand	Gering, hauptsächlich Grundfunktionen gängiger GIS/VIS	Gering bei vorliegenden Einzelbildern; mittel bei vorliegenden Vektordaten	Mittel, bei genutzter 3D-Umgebung; hoch bei notwendiger Eigenentwicklung	Mittel bei genutzter 3D-Umgebung; hoch bei notwendiger Eigenentwicklung

Tabelle 1: Zusammenfassung von Eignung, Vorteilen, Nachteilen und Erzeugungsaufwand der vier Darstellungstypen (nach Ostermann et al. 2005, p.27)

Die Einschätzungen zum Erzeugungsaufwand der einzelnen Darstellungstypen in Tabelle 1 stehen zueinander in Relation. So ist die Erzeugung von Kartenanimationen oder 3D-Karten stets aufwändiger als das Erzeugen mono-temporaler 2D-Karten. Die Erstellung von Animationen aus Vektordaten gestaltet sich mindestens so umfangreich wie die Erzeugung von 3D-Karten in einem 3D-Client. Grund hierfür sind die etwa gleichhohen Aufwände in den Filtering- und Mapping-Stufen der Visualisierungspipeline.

Die beschriebenen Geovisualisierungstechniken in Abschnitt 2.3.2 zeigen vielfältige Möglichkeiten zur Erzeugung von Geovisualisierungen eigener Ergebnisdaten. Diese haben im Falle der Standard-VIS jedoch einen sehr großen manuellen Arbeitsaufwand, der sich nur in Ausnahmefällen automatisieren lässt. Bei der Nutzung von Spezial-VIS überwiegt der Aufwand beim Erstellen von Skripten zur Datenaufbereitung und in der Ansteuerung der Visualisierungsprototypen. Außerdem besteht eine sehr starke Abhängigkeit von den Möglichkeiten des jeweils eingesetzten Systems bzw. dessen Erweite-

rungen, so dass es vorkommen kann, eigene Darstellungsformen nicht umsetzen zu können. So existiert auch in diesem Zusammenhang kein „one fits all“-VIS.

In solchen Fällen ist es nötig die Geovisualisierungen eigenhändig zu implementieren, wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben. Bei der Abwägung zwischen dem Einsatz von C++, Java und Python sind grundsätzlich Performanceansprüche, Kompatibilitätsansprüche und die Integration bestehender GIS- oder VIS-Komponenten gegeneinander abzuwägen. Die Visualisierung selbst erfolgt in der Regel über OpenGL, was für die Erstellung von mono-temporalen 2D-Darstellungen jedoch zu aufwändig erscheint. Empfehlenswert ist dagegen der Einsatz von Web-Visualisierungstechniken wie dem etablierten SVG-Format. Durch dieses können Kartenvorstufen automatisch erzeugt werden um sie zu einem späteren Zeitpunkt durch ein VIS zu veredeln. Der Einsatz von Webtechniken hat auch den Vorteil, dass die Geovisualisierungen ggf. weltweit verfügbar gehalten werden können. Der einzige Nachteil ist die Abhängigkeit zur Erreichbarkeit des Webservers, der die Webinhalte an die Webclients ausliefert.

Im Hinblick auf eine GUI, in der eine Karte integriert ist, muss die Reihenfolge der Benutzerinteraktionen streng beachtet werden: Der Kartenausschnitt sollte im Fokus liegen, Navigationswerkzeuge und andere Werkzeuge hingegen dezent angeboten werden. Außerdem sollten innerhalb einzelner Dialoge nur die wichtigsten Funktionen bereit gestellt werden und vielschichtige Konfigurationen ausschließlich einem separaten „Expertenmodus“ vorbehalten sein.

3 Neue Geovisualisierungen für TAPAS

Nachdem nun die Grundlagen zur Verkehrsmodellierung und Geovisualisierung erläutert wurden, soll mit der Erstellung eigener Geovisualisierungen von Ergebnisdaten des TAPAS-Verkehrsmodells begonnen werden. Da im Vorfeld keine nennenswerten Ansätze für die Arbeit mit Geovisualisierungen existieren und sich die Fragestellungen der Verkehrsforcher ebenfalls von den Aggregationsstufen abhängen, wird es als notwendig erachtet für jede Aggregationsstufe einen Kartentyp umzusetzen.

Somit wird sich darauf festgelegt Raum-Zeit-Pfade für die Nachverfolgung einzelner Individuen, Verkehrsflüsse für die Visualisierung aggregierte Individuen und eine Kartenanimation für die Betrachtung aller Individuen umzusetzen. Hinzu kommen Thematische Karten, die als Hintergrunddaten in den drei Kartentypen eingebettet werden.

Dass die Umsetzung der Geovisualisierungen nur einen prototypischen Charakter haben kann ist dem zeitlichen Rahmen dieser Arbeit geschuldet. „Prototypisch“ meint in diesem Fall, dass nicht für eine 100%ige Laufzeitstabilität garantiert werden kann, also durchaus Laufzeitfehler auftreten können. Außerdem wird auf lediglich zwei bestimmte Zielplattformen zugearbeitet und für die Kompatibilität zu anderen nicht garantiert. Bei den umgesetzten Geovisualisierungen handelt es sich um Web-Visualisierungen, die in den zwei Webbrowsern *Microsoft Internet Explorer 9* und *Mozilla Firefox 30* getestet wurden. Eine Kompatibilität zu anderen Webbrowsern wie *Chrome*, *Opera* oder *Safari* wurde zwar festgestellt, aber nicht ausgiebig getestet. Ältere und neuere Versionen des Internet Explorers wie die Versionen 8, 10 oder 11 wiesen hingegen größere Darstellungsfehler auf.

3.1 Gewählte Ausgangsdaten

Bevor umfassende Visualisierungsszenarien ausgearbeitet werden können, ist es wichtig, zunächst die zu visualisierenden Ausgangsdaten grundlegend zu beschreiben. Zu diesem Zweck erfolgt in diesem Abschnitt eine Erläuterung des Aufbaus der Daten, eine Untersuchung der Bevölkerungsstruktur und abschließend eine Schilderung der geographischen Verteilung ausgewählter Wegezwecke. Die Beschreibung und Visualisierung der Ausgangsdaten kann als explorative Datenanalyse (EDA) bezeichnet werden. Sie ist ergebnisoffen und bringt – im Idealfall – Phänomene und Anomalien innerhalb der Daten zum Vorschein, welche eine vertiefende Datenanalyse nach sich ziehen sollten.

Bei dem gewählten Datensatz handelt es sich um die Ergebnisdaten einer Verkehrsnachfragesimulation in Berlin, erzeugt durch das Verkehrsnachfragemodell TAPAS. Der Datensatz stammt vom 18. März 2013. Durch die Simulation wurde eine synthetische Bevölkerung von 298.274 Personen erzeugt, was etwa 9% der tatsächlichen Berliner Stadtbevölkerung entspricht. Bei durchschnittlich 4,7 Trips pro Person verfügt der Datensatz über insgesamt 1.408.246 Trips. Die Daten haben ein Speichervolumen von 297 Megabyte (MB).

Die generierten Trips sind als Tabelle in einer Datenbank hinterlegt und enthalten die sieben wichtigsten Informationen bezüglich einer Ortsveränderung: Quellort, Zielort, Route, Abfahrtszeit, Ankunftszeit, Verkehrsmodus und Fahrtzweck (siehe Abschnitt 2.2 dieser Arbeit). Die Datenbank enthält außerdem weitere Basisdaten hinsichtlich der Haushalte, Personen und Standorte sowie Fachdaten zu Aktivitäten und Verkehrszellen, welche mit den Trips verknüpft werden können. So lassen sich die sieben wesentlichen Merkmale eines Trips um zahlreiche zusätzliche Attribute erweitern. Im Fall der vorliegenden Ausgangsdaten liegen somit insgesamt 32 Attribute vor. Zur Veranschaulichung sind die Rohdaten eines Dreipersonenhaushalts in Anhang A aufgelistet.

Von diesen beziehen sich bereits zehn Attribute auf die einzelne Person und deren Haushalt - mit Informationen zu Personengruppe, Haushaltseinkommen, Alter und Geschlecht sowie Besitz von Führerschein, Fahrrad und Monatskarte. Zu den räumlichen Attributen gehören neben Quellort, Zielort und Strecke auch die Information, ob es sich beim Ziel um den Wohnort der Person handelt. Der Quell- und Zielort wird jeweils durch Koordinatenpaare beschrieben. Zeitliche Attribute sind sowohl Abfahrt- und Ankunftszeiten als auch die Dauer der am Zielort durchgeföhrten Aktivität. Aus der Aktivität ist der Wegezweck später direkt ableitbar. Neben der Aktivität gibt es auch das sachliche Attribut des Bewegungsmodus.

Es handelt sich also um typische Ergebnisdaten eines Verkehrsmodells, wie es in Abschnitt 2.2 beschrieben wurde. Neben räumlichen, zeitlichen und sachlichen Attributen sowie Angaben zu Person und Haushalt zählen auch interne Identifikationsnummern (IDs) zum Datensatz. Durch diese Verweise lassen sich später Bezüge zu den Ausgangsdaten, aus denen die synthetischen Personen und Trips generiert wurden, herstellen, wodurch ggf. weitere Informationen abgeleitet und die Ergebnisdaten verifiziert werden können.

Bezüglich der erzeugten synthetischen Bevölkerungsstruktur ist festzustellen, dass diese sich in 48,5% Frauen und 51,5% Männern teilt. 11,2% der Bevölkerung sind unter 18 Jahre alt, können also als Jugendliche bezeichnet werden. Bei 18,7% handelt es sich um Rentner, sie sind über 64 Jahre alt. In Abbildung 28 ist die Altersstruktur in Form einer Alterspyramide dargestellt. Zusätzlich ist dort auch ablesbar, welche Anzahl an Führerscheinen und Fahrzeugen je Altersgruppe vorhanden ist. Die jüngsten Personen sind 6, die ältesten 90 Jahre alt.

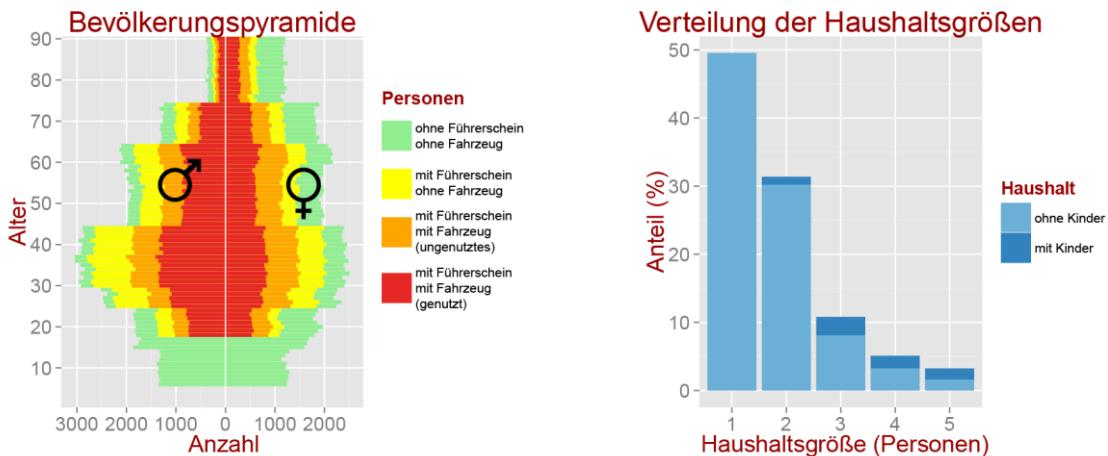


Abbildung 28: Alterspyramide der synthetischen Bevölkerung mit Differenzierung nach Führerschein, Fahrzeugbesitz und Fahrzeugnutzung

Abbildung 29: Verteilung der Haushaltsgrößen

Die Bevölkerungspyramide in Abbildung 28 zeigt die typische Form einer so genannten „Bischofsmütze“, in der die Folgen des verlustreichen zweiten Weltkriegs und die Einführung der Antibabypille („Pillenknick“) wiederzufinden sind. Ebenso ablesbar ist, dass insgesamt 79% der mindestens 18jährigen Personen einen Führerschein ihr Eigen nennen. Der Besitz eines Führerscheins tritt innerhalb der Altersgruppen gleichmäßig, geschlechtsbezogen jedoch ungleichmäßig auf (Männer 86%, Frauen 71%). Selbiges gilt für das Vorhandensein von Fahrzeugen in den Haushalten und deren Nutzung.

Einzelpersonen und Personengruppen werden als Haushalte zusammengefasst. Diese differenzieren sich, wie in Abbildung 29 dargestellt, zur Hälfte in Singlehaushalte, zu einem Drittel in Zweipersonenhaushalte und einem Zehntel in Dreipersonenhaushalte. Der Anteil an Kindern im Haushalt nimmt mit steigender Haushaltsgröße stetig zu. Wird der Faktor Haushaltsgröße auf die Personen übertragen, leben 30% aller Personen in einem Singlehaushalt, 35% in einem Zweipersonenhaushalt, 17% in einem Dreipersonenhaushalt, 10% in einem Vierpersonenhaushalt und 8% in einem Fünfpersonenhaushalt.

Um die geographische Verteilung der Bevölkerung darzustellen, bietet sich eine Strukturierung nach den 95 Berliner Ortsteilen an. Andere, ebenfalls zu Verfügung stehende administrative Einheiten sind entweder zu großflächig (12 Bezirke) oder zu kleinflächig (897 Teilverkehrszellen). Für eine detailliertere Darstellung der Berliner Ortsteile (einschließlich deren Bezeichnungen) sei an dieser Stelle auf Anhang B verwiesen.

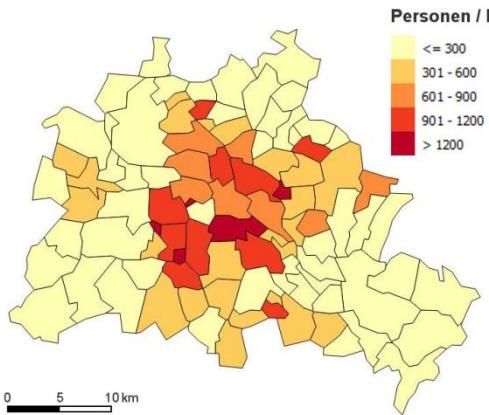


Abbildung 30: Bevölkerungsdichte nach Ortsteil

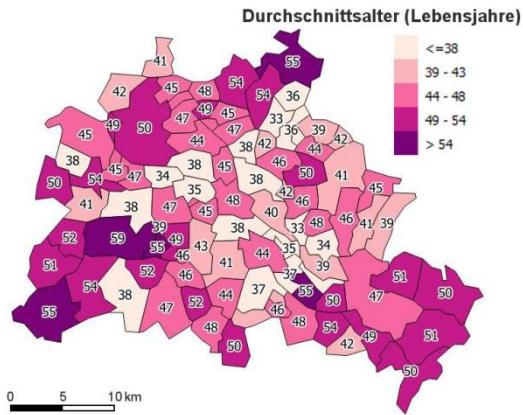


Abbildung 31: Durchschnittsalter nach Ortsteil

Im Hinblick auf die geographische Verteilung können folgende Aussagen gemacht werden: Die Bevölkerungsdichte, wie in Abbildung 30 dargestellt, ist im Stadtinnern erheblich höher als in den Randgebieten. Am dichtesten besiedelt sind die kleinflächigen Ortsteile Friedenau, Fennpfuhl und Halensee sowie der großflächige Ortsteil Kreuzberg mit jeweils über 1200 Personen pro km². Zu den dünn besiedelten Ortsteilen im Stadtinneren gehören Tiergarten und Tempelhof, da sie über große Grünflächen verfügen. Das Durchschnittsalter ist im Stadtinneren nur tendenziell niedriger als in den Randlagen, wie Abbildung 31 zeigt. Zu den „ältesten“ Ortsteilen gehören dabei Grunewald, Buch und Wannsee mit durchschnittlich über 55 Lebensjahren pro Person.

Erste Aussagen zur Mobilität der Bevölkerung wurden bereits im Zusammenhang mit der Bevölkerungspyramide getroffen. Hinzu kommt, dass alle synthetischen Personen ein Fahrrad besitzen und 45,6% eine Monatskarte für den ÖPNV vorweisen können. Beides stellen Voraussetzungen für das Nutzen eines *Hauptverkehrsmittel* (Modus) dar. Noch aufschlussreicher als das Summieren der Modi ist die Betrachtung der vollzogenen Personenkilometer je Modus. In Abbildung 32 ist dargestellt, dass der ÖPNV mit etwa drei Millionen Personenkilometern der wichtigste Modus ist. Selbstfahrer und Mitfahrer des motorisierten Individualverkehrs absolvieren zusammen etwa die gleiche Anzahl von Personenkilometern. Fußgänger und Radfahrer schließlich legen gemeinsam etwa 1,2 Millionen km zurück. Zug- und Taxiverkehr zählen mit unter einer viertel Million absolviert Personenkilometern so gering, dass sie für alle weiteren Betrachtungen unter „Andere“ zusammengefasst werden können. Die farbliche Gestaltung entspricht der des MiD-Berichtes von 2008, somit sind Verkehrsforcher mit der Farbzordnung i.d.R. vertraut.

Zusätzlich können die zurückgelegte Strecke und die benötigte Zeit aller einzelnen Bewegungen ins Verhältnis gesetzt werden. Durch eine differenzierte Betrachtung des Bewegungsmodus (siehe Abbildung 33) lassen sich Muster feststellen, die in der Durchschnitgeschwindigkeit begründet liegen. So haben alle Fußwege eine Durchschnitgeschwindigkeit von 4,7 km/h, Fahrradfahrten 10,0 km/h,

ÖPNV-Fahrten 13,9 km/h und (Mit-)Fahrten mit dem MIV 21,6 km/h. Außerdem ist zu erkennen, dass die Fahrzeiten des ÖPNV-Modus stärker gestreut sind als die anderer Modi.

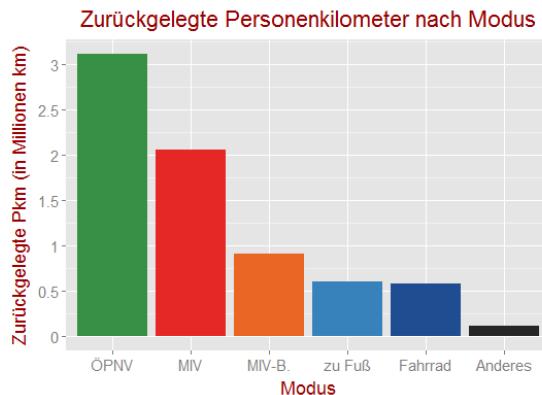


Abbildung 32: Zurückgelegte Personenkilometer (Pkm) nach Modus

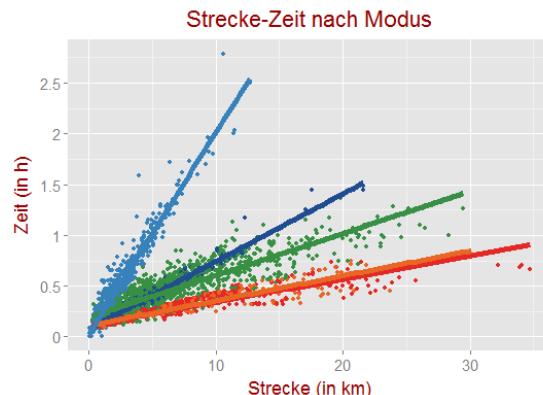


Abbildung 33: Gegenüberstellung von Strecke und Zeit nach Modus (dargestellt ist eine Stichprobe von 10.000 Probanden)

Alle Trips einer Person werden als „Tagesplan“ bezeichnet. Dabei erstreckt sich ein Tagesplan i.d.R. über die Länge eines Tages. Eine Ausnahme bilden dabei jene 3% der Personen, deren Tagespläne so umfangreich sind, dass bei ihnen auch nach Mitternacht noch Bewegungen aufgezeichnet sind. Der Tagesplan aller synthetischen Personen beginnt und endet an ihrem Wohnort. Innerhalb des Tagesplanes gibt es Wegeketten, bei denen eine Aktivität mit der darauffolgenden verknüpft ist. Dabei unterscheidet TAPAS zwischen 29 verschiedenen Aktivitäten, die jeweils einem der sechs Wegezwecke zugeordnet werden können: Arbeit, Bildung, Freizeit, Einkauf, private Erledigung oder Sonstiges. Die genaue Zuordnung von Aktivität und Wegezweck ist in Anhang B abgebildet.

Die Bewegungen zwischen den Wegezwecken sind in Abbildung 34 in Form eines Netzdiagramms dargestellt. Die Darstellung der sechs verschiedenen Wegezwecke erfolgt durch Knoten, die der Bewegungen zwischen den Wegezwecken hingegen durch Kanten. Bei der Betrachtung des Netzes fällt auf, dass vor allem Freizeitaktivitäten durchgeführt werden und diese zum großen Teil aufeinanderfolgend stattfinden, also insgesamt viele Bewegungen von einer Freizeitaktivität zur nächsten führen. Generell geht allen Aktivitäten, mit Ausnahme der Arbeitsaktivitäten, eine Freizeitaktivität voraus.

Hinsichtlich der Untersuchung der Wegezwecke ist zu beachten, dass hierbei ausschließlich die Folgeaktivität maßgeblich ist und der Standort keine Rolle spielt. Das zeigt sich insbesondere bei den in der eigenen Wohnung ausgeübten Aktivitäten. Begibt sich eine Person also nach dem Einkauf in die Wohnung um dort Freizeitaktivitäten auszuführen, handelt es sich um einen Freizeit-Wegezweck. Das gleiche gilt auch für zuhause durchgeführte Arbeiten (Arbeit-Wegezweck) und ähnliches. Für die Untersuchung der Bewegungen zwischen den echten Standorten muss also die Information mit einbe-

zogen werden, ob es sich um die eigene Wohnung handelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 35 dargestellt.

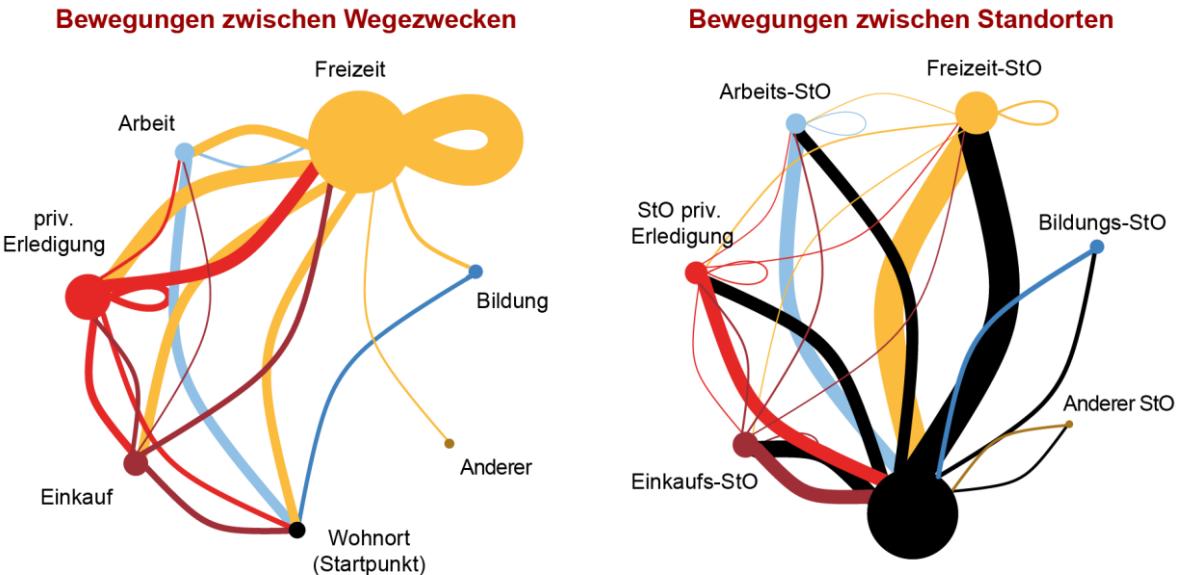


Abbildung 34: Bewegung zwischen Wegezwecken

Abbildung 35: Bewegung zwischen Standorten

Die Verlagerung des Betrachtungsschwerpunkts auf den Standort der Wegezwecke in Abbildung 35 bewirkt, dass nicht mehr von durchgeföhrten Freizeitaktivitäten oder Arbeitsaktivitäten gesprochen werden kann, sondern stattdessen von besuchten Freizeitstandorten und Arbeitsstandorten. Der Vergleich beider Bilder zeigt, dass viele Freizeitwegezwecke am eigenen Wohnort stattgefunden haben. Ausgangspunkt der meisten Bewegungen ist nun die Wohnung. Außerdem erscheint das Bewegungsvolumen der Hin- und Rückwege zwischen zwei Standorten stets gleich groß. Dies spricht für eine zirkuläre Mobilität, in der zwischen Alltagswegen immer der Wohnort aufgesucht wird und dieses Verhalten zu „Pendelbewegungen“ führt (Angerer & Hadler 2005, p.154).

Die geographische Verteilung der durchgeförderten Aktivitäten lässt sich durch Heatmaps je Wegezweck besonders gut verdeutlichen. Im Unterschied zur Karte der Bevölkerungsdichte nach Ortsteil (Abbildung 30) werden administrative Unterteilungen bei Heatmaps nicht berücksichtigt. Abbildung 36 zeigt die Bevölkerungsdichte der Ergebnisdaten als Heatmap. Für eine größere Anschaulichkeit sind die Grenzen der Ortsteile mit abgebildet, diese haben allerdings keinen Einfluss auf die Berechnung der Heatmap. Die Abbildungen 24 und 25 zeigen, dass die geographische Verteilung mittels Heatmaps sehr viel natürlicher darzustellen ist als durch die Orientierung an vergleichsweise „starken“ administrativen Unterteilungen. Das genaue Ablesen der Werte wird jedoch durch den hohen Detailgrad und der Einheit (Anzahl von Objekten innerhalb eines 1 km Durchmessers) erschwert.

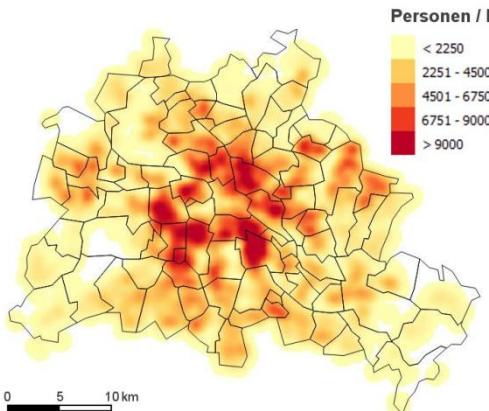


Abbildung 36: Bevölkerungsdichte

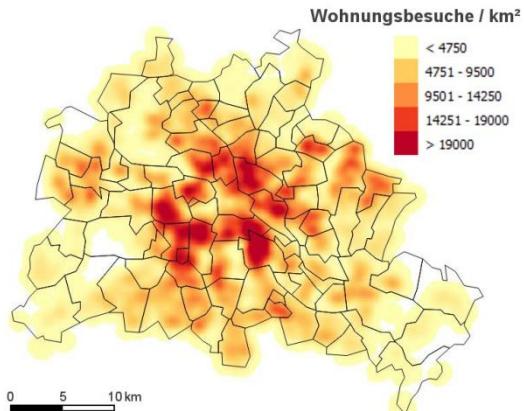


Abbildung 37: Aktivitätendichte in Wohnung

Die Bevölkerungsdichte in Abbildung 36 zeigt mehrere Konzentrationen (Cluster) in den zentralen Ortsteilen, jedoch nicht in Mitte und Tiergarten. Die stärksten Konzentrationen (Hotspots) treten dabei im Westen von Prenzlauer Berg, Neukölln, Charlottenburg sowie dem Norden Schönebergs auf. In die Berechnung der Bevölkerungsdichte geht der Wohnort jeder Person einmalig ein, wie im Bsp. der Bevölkerungsdichte nach Ortsteil in Abbildung 30. Da die Netzdiagramme jedoch Pendelbewegungen vermuten lassen, soll auch die mehrmalige Nutzung der Wohnungsstandorte betrachtet werden. Das Ergebnis in Abbildung 37 verdeutlicht, dass sich die Dichteverhältnisse über das gesamte Testgebiet gleichmäßig verdoppeln. Bei entsprechender Anpassung der Skalen sieht die Heatmap sogar identisch aus. Daraus lässt sich zum einen schlussfolgern, dass alle Personen im Durchschnitt zweimal die Wohnung verlassen und betreten, zum anderen aber auch, dass die Dichteverhältnisse zwischen Standort und Standortnutzung durchaus miteinander vergleichbar sind.

Die Dichte der Arbeitsaktivitäten in Abbildung 38 zeigt, dass diese sich noch stärker zentral konzentrieren als die Wohnorte. So existieren nur schwache Cluster von Arbeitsaktivitäten außerhalb des Stadtzentrums. Im Vergleich zwischen Wohnort und Arbeitsaktivitäten sind auch Verschiebungen der Cluster wahrzunehmen. So lösten sich Wohnungscluster in Moabit und Nord-Neukölln auf, während Arbeitscluster in Mitte und Friedrichshain entstehen.

Die Verteilungen der außerhalb der eigenen Wohnung stattfindenden Freizeitaktivitäten sind in Abbildung 39 dargestellt. Ihre Verteilung ähnelt stark jener der Arbeitsaktivitäten, weist aber eine im Vergleich stärkere Clusterbildung um das Stadtzentrum herum auf. Ganz anders verhält es sich bei der Verteilung der Einkaufsaktivitäten in Abbildung 40. Hier präsentieren sich viele kleinflächige Cluster, die sich stets innerhalb von Wohnclustern befinden (vgl. Abbildung 37). Bei den wenigen großflächigeren Einkaufsclustern handelt es sich um die großen Einkaufs- und Touristengegenden: Den Kurfürstendamm im Ortsteil Charlottenburg, die Schlossstraße in Steglitz, die Spandauer Vorstadt in Mitte und den Kottbusser Damm in Neukölln.

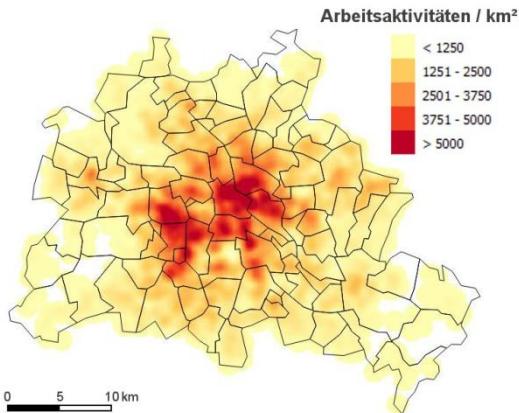


Abbildung 38: Dichte Arbeitsaktivitäten

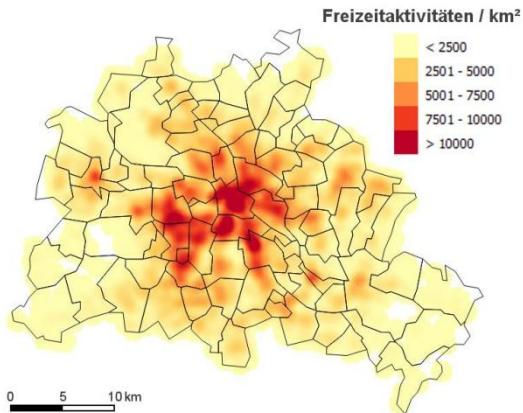


Abbildung 39: Dichte Freizeitaktivitäten

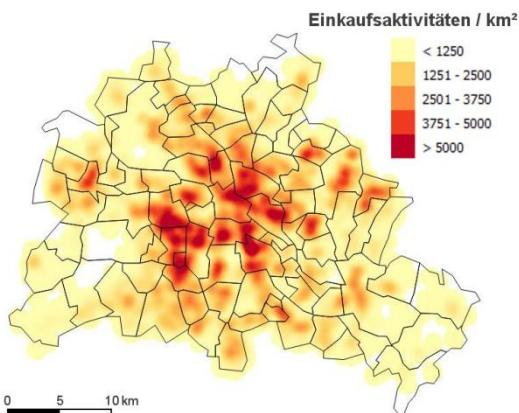


Abbildung 40: Dichte Einkaufsaktivitäten

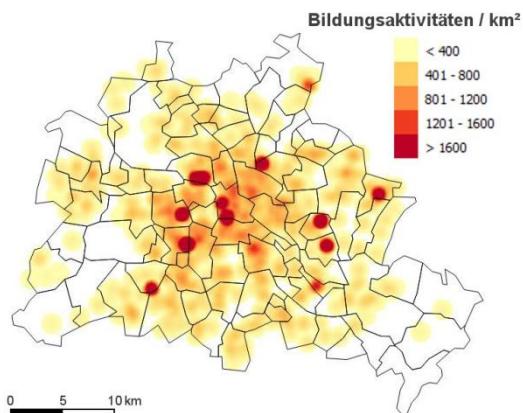


Abbildung 41: Dichte Bildungsaktivitäten

Ein ganz anderes Bild ergibt sich durch die Verteilung der Bildungsaktivitäten. Die Heatmap in Abbildung 41 zeigt deutlich zehn punktuelle Hotspots, die durch die Standorte der sechs großen Berliner Universitäten und Hochschulen entstehen (Freie Universität - FU, Technische Universität - TU, Humboldt Universität - HU, Hochschule für Wirtschaft und Recht - HWR und Hochschule für Technik und Wirtschaft – HTW, Beuth Hochschule für Technik). Schulen und Oberstufenzentren sind weitaus weniger frequentiert, so dass diese von den Standorten der Universitäten und Hochschulen überlagert werden.

Hiermit soll die explorative Datenanalyse der Ausgangsdaten abgeschlossen werden. In den durchgeführten Analysen wurden einige wichtige sachliche, räumliche und zeitliche Komponenten der Ergebnisdaten vorgestellt. Im letzten Teil, der Untersuchung der Aktivitäten, wurde erkannt, dass zwischen Wegezweck und Standort streng differenziert werden muss, da es keinen Wegezweck „Wohnort“ gibt.

Es soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es sich um eine simulierte, synthetische Bevölkerung handelt, die durch die in Abschnitt 2.2 beschriebene Arbeitsweise von Verkehrsmodellen hervorgerufen wurde. Die EDA der Ergebnisdaten könnte weiter vertieft werden, etwa durch die Betrachtung von definierten Untermengen wie Arbeitern, Studenten, Rentnern, Autofahrern, alleinerziehenden Müttern oder anderen Gruppen. Dies würde jedoch den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Bereits jetzt wurden zahlreiche Erkenntnisse über die Simulationsergebnisdaten aus dem Verkehrsmodell TAPAS gewonnen, die in die Erstellung der interaktiven Geovisualisierung einfließen sollen.

In der Einleitung dieses Abschnitts wurde erwähnt, dass die EDA idealerweise Phänomene oder Anomalien innerhalb der Daten aufdeckt und weiterführende Fragen erzeugt. Das ist auch bei den vorgestellten Ergebnisdaten der Fall, zumal sich ein Vergleich mit den realen Daten geradezu aufdrängt. An dieser Stelle sollen nur einzelne Punkte vorgestellt werden wie bspw. die Alterspyramide, die in ihrer grundlegenden Struktur mit der Realität durchaus übereinstimmt (statistik-bbb 2012, p.6). Sie unterliegt jedoch einem unnatürlichen blockartigen Aufbau nach Altersgruppen. Der hohe Anteil von Frauen über 75 Jahren ist in der Realität nicht weniger stark ausgeprägt. Allerdings vollzieht sich der reale Bevölkerungsrückgang weniger abrupt, sondern vielmehr geradlinig ab einem Alter von 45 bis 90 Jahren. Bei dem Abgleich von Führerscheinen und Autos stellte sich heraus, dass ein geringer Anteil von 626 Haushalten ein Auto besitzen, obwohl keine Person des Haushaltes im Besitz eines Führerscheines ist. Das Modell bleibt dennoch logisch konsistent, da keine dieser Personen während der Simulation mit einem MIV unterwegs ist.

Bei der Betrachtung der Nutzungsdichten von Bildungseinrichtungen bilden die Universitäts- und Hochschulstandorte viele punktuelle Hotspots. Beim Vergleich mit den realen Gegebenheiten fällt auf, dass größer angelegte Campusbereiche nicht abgebildet sind und einige bekannte Sekundärstandorte wie bspw. der Campus- Adlershof (HU Berlin) oder der Campus Wedding der TU Berlin-gänzlich fehlen. Grund dafür ist, dass die veröffentlichten Studentenzahlen der Universitäten und Hochschulen nur auf deren Hauptstandorte übertragen werden und keine Untergliederung der einzelnen Fakultäten erfolgt.

3.2 Gewählte Implementierungstechnik

Aufbauend auf die zuvor erfolgte Herleitung der zu visualisierenden Kartentypen und der Beschreibung der Ausgangsdaten, soll nun auf die zu wählende Implementierungstechnik eingegangen werden. Die Visualisierungspipeline in Abschnitt 2.3.2 gliedert die bevorstehenden Arbeiten in die drei Stufen Filtering, Mapping und Rendering. Bezüglich der Renderingstufe wurde bereits im Zwischenfazit in Abschnitt 0 der Einsatz von Web-Visualisierungstechniken empfohlen. Dies bietet sich auch in

diesem Fall an, da keine zusätzliche Software bereitgestellt werden muss und der öffentliche Zugriff auf die Geovisualisierungen nur mit wenig Aufwand verbunden ist.

Ein(ziges) Problem stellt jedoch die Notwendigkeit einer relativ komplexen Netzwerkinfrastruktur dar. Die ausfallsichere Verbindung zwischen WebClient-Webserver und Webserver-DBMS muss mittel- bis langfristig sichergestellt werden können. Außerdem ziehen Anpassungen eines der Systeme (Serveradressen, Datenstruktur, Benutzerverwaltung) stets Änderungen der anderen Systeme nach sich. Eine Netzwerkinfrastruktur ist jedoch nicht notwendig, wenn WebClient, Webserver und DBMS auf dem gleichen Desktops vorliegen. Die vollständigen Rohdaten aus dem DBMS auf den Desktop zu kopieren wäre zu umfangreich, darum kann dieser Lösungsweg nur bei den aufbereiteten Daten der Filterstufe angewendet werden. Mobile Webserver und DBMS, die ohne Installation auf einem Desktop arbeiten können, gibt es als sogenannte portable Anwendungen (Portable Applications, PortableApps). Der Einsatz von portablen Webservern oder einem portablen DBMS widerspricht zwar den Vorzügen des Einsatzes von Web-Visualisierungstechniken, rechtfertigt sich aber angesichts des Wartungsaufwands und des mittelfristig steigenden Ausfallrisikos einer Netzwerkinfrastruktur.

Als Folge des empfohlenen Einsatzes von SVG im Zwischenfazit (Abschnitt 2.5) besteht ein großes Risiko im Hinblick auf die Laufzeitgeschwindigkeit. Darum werden ausschließlich die Rendering- und Teile der Mappingstufe auf den Webbrower delegiert. Durch eine separate Filteringstufe wird die Aufbereitung des knapp 300 MB umfassenden Tripfiles umgesetzt.

Hierzu bietet sich das TAPAS-eigene Auswertungsprogramm, der TAPAS-Analyzer, an, welcher an dieser Stelle kurz vorgestellt werden soll. Der TAPAS-Analyzer ermöglicht es, TAPAS-Simulationsergebnisse einzulesen und über verschiedene Auswertungsmodule zu analysieren. Dabei stellt der TAPAS-Analyzer lediglich den Programmrahmen (Framework) bereit, welcher für das Einlesen der Ergebnisdaten, das sequenzielle Abarbeiten des Tripfiles und das Ausgeben von Protokollinformationen (Logausgaben) zuständig ist. Die jeweiligen Auswertungsmodule stellen eigene GUI-Elemente bereit, zeichnen für die Datenanalyse selbst verantwortlich und schreiben die Analyseergebnisse auf eine Festplatte in ein spezifisches Verzeichnis. Die Arbeitsweise ist in Abbildung 42 schematisch dargestellt. Der TAPAS-Analyzer und dessen Module sind in der Programmiersprache Java implementiert. Auch wenn *Python* und *R* effizientere Implementierungsmöglichkeiten für die Filteringstufe als *Java* bereitstellen und auch Schnittstellen (Interface) zwischen *Java*, *Python* und *R* existieren, soll eine reine *Java*-Implementierung erfolgen. Grund hierfür ist, dass eine hohe Technologie spätere Entwicklungsarbeiten mittelfristig verlangsamen und langfristig unbeherrschbar machen könnte (Hruschka & Starke 2012). Darum ist eine homogene Systemlandschaft stets zu bevorzugen.

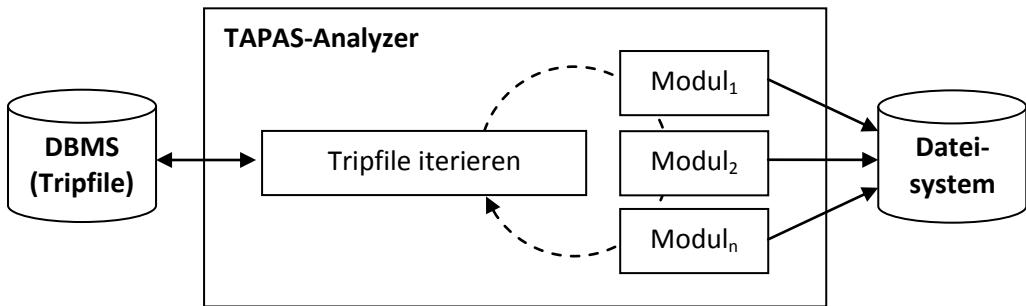


Abbildung 42: Schematische Arbeitsweise des TAPAS-Analyzers und dessen Auswertungsmodule

Der TAPAS-Analyzer stellt also ein Framework für die Auswertung der Ergebnisdaten bereit und ist für die Integration der Filteringstufe bestens geeignet. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, werden drei verschiedene Geovisualisierungen angestrebt, ihre Hintergrunddaten eingeschlossen. Statt diese separat als eigenständige Auswertungsmodule zu integrieren, bietet es sich an, sie in einem eigenständigen Geovisualisierungsmodul zusammenzufassen. Abbildung 43 zeigt die Integration des eigenständigen Geovisualisierungsmoduls unter dem Namen *GeoVis*.

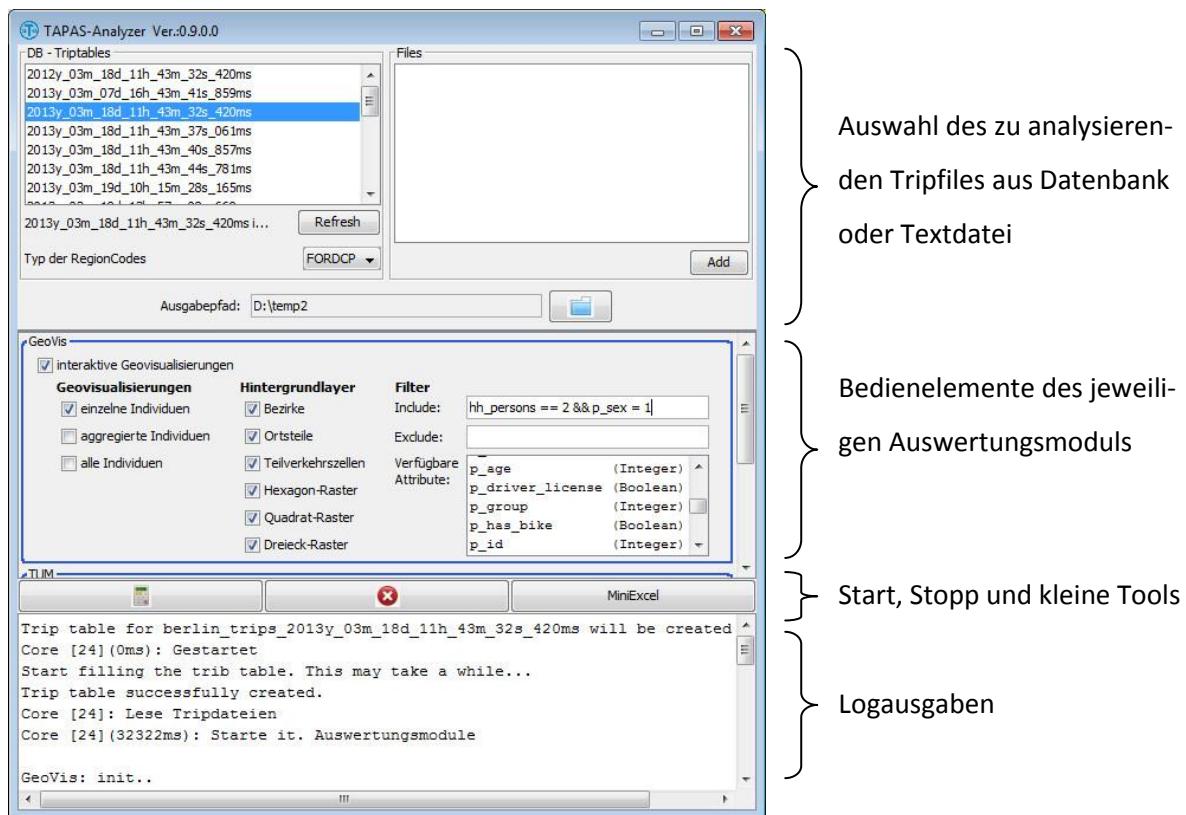


Abbildung 43: Integration des GeoVis-Moduls in den TAPAS-Analyzer

Die GUI des *GeoVis*-Moduls besteht aus drei größeren Bereichen: Geovisualisierungen, Hintergrundlayer und Filter. Im Bereich der Geovisualisierungen können die drei Untermodule für die verschiedenen Aggregationsstufen (einzelne, aggregierte und alle Individuen) aktiviert oder deakti-

viert werden. Im Bereich der *Hintergrundlayer* können verschiedene Unterteilungen der Hintergrunddaten aktiviert oder deaktiviert werden.

Darüber hinaus können einzelne Personen oder Trips gefiltert werden. Hierbei handelt es sich um eine Expertenfunktion, da nicht mit Klarnamen, sondern mit internen Bezeichnungen der Inhalte gearbeitet wird. Es stehen zwei Filtermethoden zur Auswahl: Die Prüfung hinsichtlich der Einbeziehung einzelner Haushalte, Personen oder Trips (include) und die Prüfung auf deren Ausschluss (exclude). Die Schreibweise der logischen Operatoren entspricht der Syntax der in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Programmiersprachen.

Im einfachsten Fall können durch das Filtermodul Personen bestimmten Alters durch `p_age >=18` oder Haushalte einer bestimmten Größe durch `hh_persons == 2` einbezogen oder ausgeschlossen werden. Einzelne Trips können ebenfalls gefiltert werden: `mode == 3` für MIV-Fahrer oder etwas spezieller `distance_real >= 5000 && start_time_min < 420` für Wege, die länger als fünf Kilometer sind und vor 7 Uhr morgens angetreten wurden.

Vereinfacht gesagt, handelt es sich bei der Nachprozessierung der Verkehrsmodell-Ergebnisdaten in der Filteringstufe gleichzeitig um die Vorprozessierung der Geovisualisierungsdaten. Um die angestrebte maximale Entlastung für den Webbrowser zu erlangen, muss jedes Untermodul des GeoVis-Moduls optimale, auf die jeweilige Geovisualisierung zugeschnittene Ausgangsdaten produzieren. Mathematische Operationen wie Transformationen, Zeitumrechnungen oder Offset-Berechnungen sowie umfangreiche logische Tests für das Mapping sollten bereits während der Vorprozessierung durchgeführt werden. Außerdem wird angestrebt, dass die aufbereiteten Daten in dem am besten vom Webbrowser zu verarbeitenden Dateiformat gespeichert werden. Da übliche Formate wie XML und kommagetrennte Werte (Comma Separated Values, CSV) intern vom Webbrowser in die JavaScript Object Notation (JSON) überführt werden, erscheint es sinnvoll, dass die aufbereiteten Daten direkt als JSON-Dateien exportiert werden (Kamat 2011). Speziell für Geodaten bietet sich das GeoJSON-Format an. Dieses ist aufgrund der Metadatenbeschreibungen je Geometrie jedoch sehr voluminös, so dass sich für eine eigene Datenstruktur im JSON-Format entschieden wurde, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden soll.

3.3 Hintergrundinformationen durch interaktive Thematische Karten

Als primäres Visualisierungsziel gilt es, Außenstehenden und Experten einen Überblick über die Verteilung der synthetischen Bevölkerung und die von ihr genutzten Standorttypen bereitzustellen. Für die Umsetzung dieses Ziels eignen sich am besten Thematische Karten und Heatmaps, wie sie bereits in Abschnitt 3.1 genutzt wurden. Da die zu bedienende Zielgruppe in diesem Zusammenhang jedoch

nicht klar definiert ist, stellt es eine notwendige Herausforderung dar, die Größe und Art der Gebietsaufteilung flexibel zu gestalten.

Üblicherweise wird Berlin durch eine administrative Einteilung in *Bezirke* oder *Ortsteile* beschrieben, was für Außenstehende auch eine gut nachvollziehbare Struktur darstellt. Verkehrsexperten bevorzugen hingegen die Aufteilung in *Verkehrszellen* (*VZs*) und *Teilverkehrszellen* (*TVZs*). Administrative Grenzen stellen jedoch eine politische und mehr oder weniger willkürliche Aufteilung der Fläche dar. Darum ist es für eine objektive Betrachtung notwendig, auch *Rasterzellen* (*Grids*) anzubieten (DeMers 2002). Durch Grids kann die Fläche in einer wesentlich natürlicheren Unterteilung betrachtet werden, ähnlich wie in den Heatmaps. Dabei sind verschiedene Rasterierungen möglich: Dreiecke, Quadrate und Sechsecke treten als übliche Formen auf. In hypothetischen ausgeführten Folgeschritten ließen sich auf diese Grids verschiedenste Raster-Berechnungsmethoden anwenden. Einen weiteren Vorteil stellt die leichtere und genauere Übertragung von Informationen aus Rasterzellen auf zahlreiche andere administrative Einteilungen, wie bspw. Wahlkreise oder Postleitzahlengebiete, dar.

3.3.1 Umsetzung

Da die Gebietsaufteilung flexibel gestaltet werden soll, werden alle oben genannten Gebietsaufteilungen angeboten: Bezirke, Ortsteile und TVZs als administrative Unterteilungen sowie Dreiecke, Sechsecke und Rechtecke als Grids. Die Grids werden in verschiedenen Größen präsentiert, denn auch in diesem Fall ist die ideale Größe von der konkreten Nutzergruppe und Fragestellung abhängig. Die Abstufungen der verschiedenen Zellgrößen wurde gemeinsam mit den Verkehrsexperten am DLR empirisch festgelegt: Ein kleines Quadrat hat eine Fläche von 1km^2 , diese Fläche vervierfacht sich in der mittleren Größe (4km^2) und 2,5facht sich nur noch bei der großen Größe (10km^2), da eine weitere Vervierfachung zu großflächig geraten würde (16km^2). Die Dreiecke und Sechsecke sind in etwa an der Flächengröße der Quadrate orientiert, besitzen in ihren verschiedenen Größen aber dieselbe Skalierung.

Innerhalb der thematischen Gliederung wird neben der Bevölkerungsdichte auch die Nutzungsdichte der sechs verschiedenen Standorte dargeboten: Nutzungen der Wohnorte, Arbeitsstandorte, Bildungsstandorte, Freizeitstandorte sowie Nutzungen der Standorte privater Erledigungen und anderer Standorte. Darüber hinaus wird auch die räumliche Nutzungsverteilung aller Außer-Haus-Standorte zusammengefasst präsentiert.

Die Signaturierung der Nutzungsverteilung nach Standorten orientiert sich an den verwendeten Farben Hellblau, Blau, Gelb, Bordeaux, Rot und Braun der deskriptiven Statistiken der MiD-Berichte von 2008 (Infas & DLR-IVF 2010), da diese als etabliert unter Verkehrsexperten gelten und auch von Außenstehenden leicht nachvollziehbar sind. Für die Wohnortnutzungen gibt es keine vorgegebene

Signatur, da diesen in den MiD-Berichten kein Wegezweck zugeordnet ist. Schwarz bietet sich hierfür an, da es neutral ist und einen guten Kontrast zu den anderen Farben darstellt. Bei den Nutzungen der Außer-Haus-Standorte handelt es sich um das thematische Gegenteil der Wohnort-Nutzungsdichte, dargestellt wird dieses Thema ebenfalls schwarz. Abschließend gilt es noch, sich auf eine Kontursignatur festzulegen. Diese soll Weiß gehalten werden, um die Karte visuell zu entlasten.

Zur Demonstration der Umsetzung ist in Abbildung 44 die Bevölkerungsdichte auf Basis der Ortsteile (oben links) sowie die Nutzungsverteilung der Einkaufsstandorte auf Basis der Bezirke (oben rechts), des großen Sechseck-Rasters (unten links) und des kleinen Rechteck-Rasters (unten rechts) dargestellt. Beim Vergleich der verschiedenen großen Gebietsaufteilungen mit der gleichen Signatur fällt auf, dass schon kleine Hotspots einen sehr großen Einfluss auf größere Einzelflächen, in denen sie enthalten sind, ausüben.

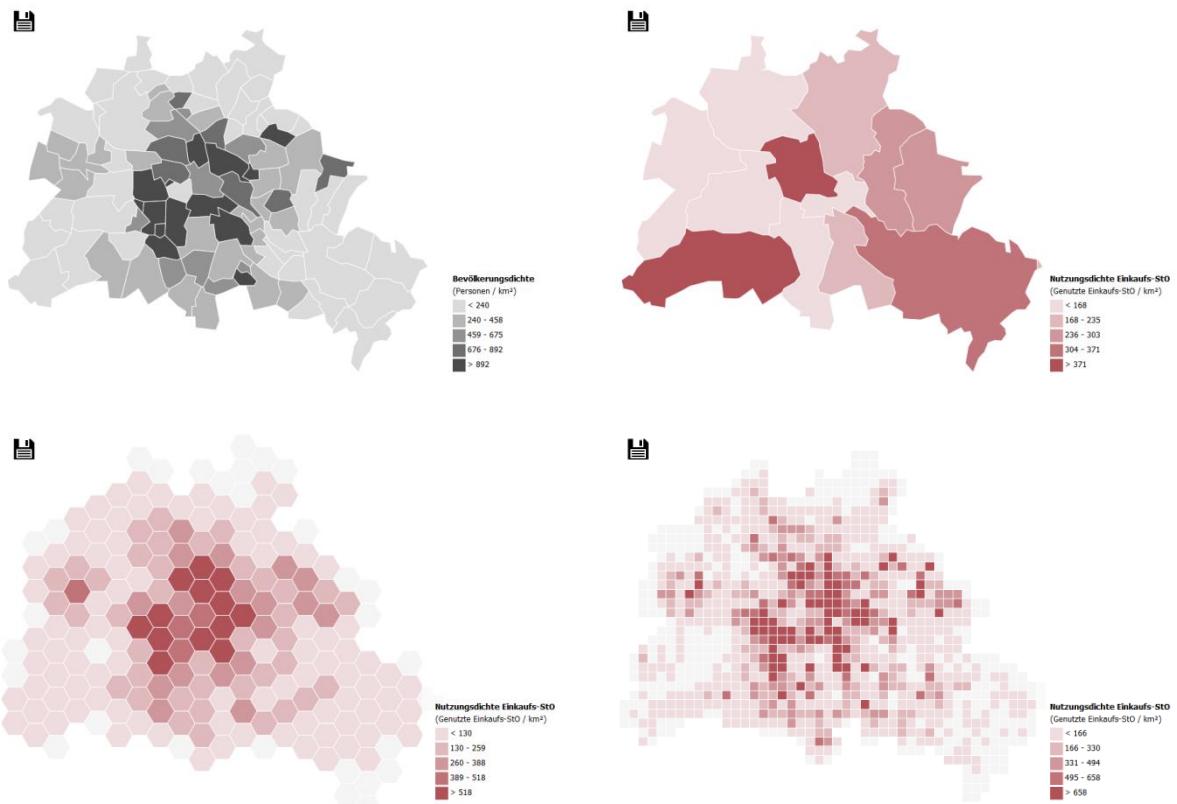
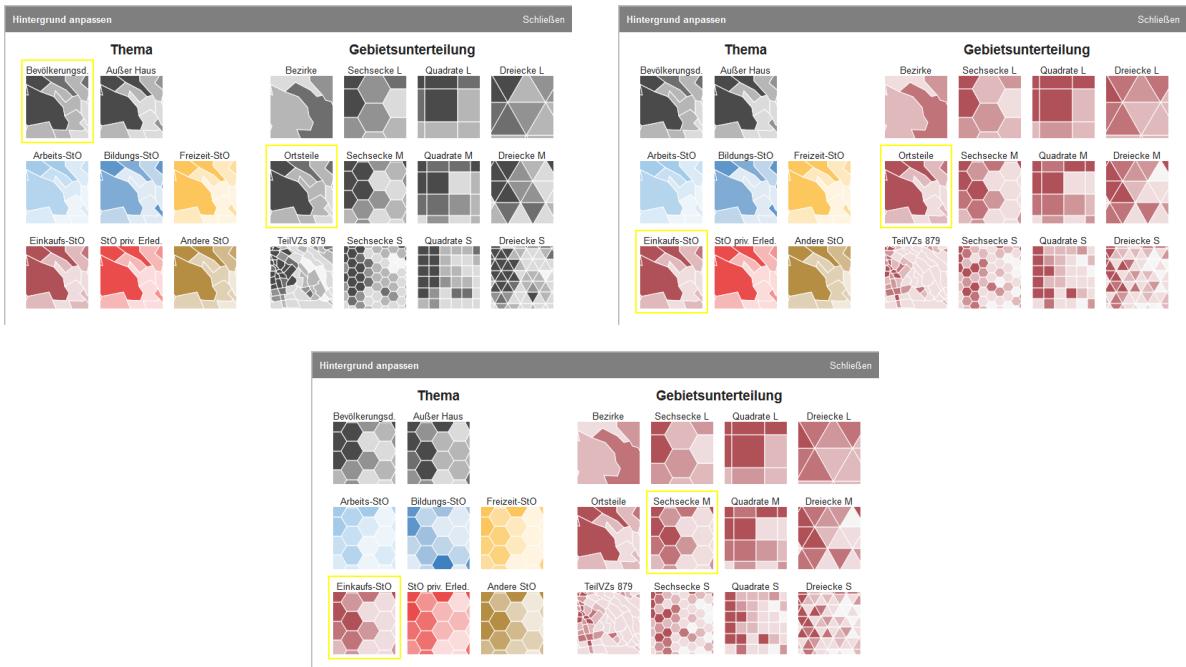


Abbildung 44: Beispiele für Thematische Karten: Bevölkerungsdichte auf Basis der Ortsteile (oben links) und die Nutzungsfläche von Einkaufsgelegenheiten auf Basis von Bezirken (oben rechts), des großen Sechseck-Rasters (unten links) und des kleinen Rechteck-Rasters

Bei der Betrachtung der Skalierungsänderungen der Legende zeigt sich, dass die Nutzungsichten mit kleiner werdender Unterteilungsgröße stetig zunehmen. Insgesamt stellt der Übergang von der Bezirksebene zum kleinsten Sechseck-Raster eine Verdreifachung der Maximaldichte dar. Diese Anpassung der Skalen ist legitim, da der Hauptzweck dieser Thematiken Karten nicht der Vergleich zwis-

schen den verschiedenen Raumunterteilungen oder Themen ist, sondern die Übersicht über die Nutzungsverteilungen. Somit können die Skalierungen je Aufteilung und Thema neu angepasst werden, um das Kontrastpotential voll auszunutzen.

Das Umschalten des Themas und der Gebietsunterteilung erfolgt in einem eigenen modalen Dialog, der durch Klicken auf den entsprechenden Bereich in der Legende unten rechts neben der Hauptkarte geöffnet wird. Der Dialog ist in Abbildung 45 dargestellt. Der Dialog ist in lediglich zwei Bereiche aufgeteilt: Links die Anpassung des Themas und rechts die Anpassung der Gebietsunterteilung. Die verschiedenen Themen und Gebietsunterteilungen sind durch Kacheln dargestellt, in denen das Berliner Zentrum abgebildet ist. Die aktuelle Auswahl ist durch einen gelben Rahmen hervorgehoben (Highlighting).



**Abbildung 45: Dialog zum Anpassen des Themas und der Gebietsunterteilung.
Bevölkerungsdichte auf Ortsteile (oben links); Einkaufs-StO auf Ortsteile (oben rechts);
Einkaufs-StO auf mittlerem Sechseck-Grid (unten)**

Um in dem Dialog Auswahl- und Vorschaufunktion zu kombinieren, sind beide Bereiche bidirektional miteinander verknüpft, können aber dennoch unabhängig voneinander angepasst werden. So wird eine Änderung des Themas sowohl in der Hauptkarte als auch in allen Kacheln der Gebietsunterteilungen durchgeführt. Im Gegenzug wird eine Anpassung der Gebietsaufteilung auch in der Hauptkarte und in den Kacheln der Themen vorgenommen.

3.3.2 Implementierung

Für die Umsetzung der Thematischen Karten sind zahlreiche Vorbereitungen zu treffen: Zunächst müssen entsprechende verschiedenartige Geometrien recherchiert oder erstellt und überdies als

Kartenebene zusammengefasst werden, da diese nicht zum Bestandteil der Ergebnisdaten des TAPAS-Verkehrsmodells gehören. Die Flächengeometrien werden aus verschiedenen Quellen generiert: Die der Ortsteile können aus dem *Berliner OpenData Portal* bezogen werden, jene der VZs werden durch das DLR bereitgestellt. Die Flächengeometrien der Bezirke werden aus denen der Ortsteile zusammengefasst. Nach einer topologischen Überprüfung aller Layer auf Lücken oder Überschneidungen innerhalb der Geometrien erfolgt eine Generalisierung um 90-95% durch das Onlinetool *Mapshaper*. Dies geschieht zum einen, um die Konturen visuell zu entlasten, zum anderen, um Datenvolumen zu reduzieren (Joao 1998) und damit Webbrowsersn eine einfache Visualisierung zu ermöglichen. Die sechs Grids werden mit Hilfe des *Repeating Shapes*-Plugin für ArcMap in den oben beschriebenen Konfigurationen erstellt. Eine Generalisierung dieser ist nicht notwendig. Alle Kartenebenen sind als ESRI-Shapefile innerhalb des TAPAS-Analyzer-Projektes gespeichert.

Die originalen und vereinfachten Shapefiles können nun vom GeoVis-Untermodul durch die Java-Bibliothek *Geotools* eingelesen und verarbeitet werden. Bei der Iteration des Tripfiles durch den TAPAS-Analyzer wird geprüft, in welcher Fläche der jeweiligen originalen Shapefile sich der Zielort befindet (Fläche *CONTAINS* Zielpunkt). Durch die Auswertung des Wegezweckes und der Information, ob sich das Ziel im Wohnort befindet, kann der Standorttyp festgestellt und ein interner Zähler inkrementiert werden. Etwas aufwändiger ist hingegen das einmalige Zählen des Wohnortes einer Person, um die Bevölkerungsdichte zu berechnen. Vorteilhaft ist dabei der Aufbau des Tripfiles: Die Trips sind zunächst nach Haushalt und Person gruppiert und innerhalb dieser Gruppierung zusätzlich nach Abfahrtzeit sortiert. Somit kann der Quellort des ersten Trips einer Person klar dem Wohnort zugewiesen und der interne Zähler einmalig inkrementiert werden. Wurde der letzte Trip verarbeitet, werden die gezählten Standortnutzungen abschließend im Verhältnis zur originalen Flächengröße relativiert.

Der Export der Daten erfolgt wie bereits beschrieben im JSON-Format. Im Zuge weiterer Arbeiten an den 3D-Visualisierungen wird deutlich, dass Geometrie- und Attribut-Daten in getrennten Dateien abgelegt werden sollten. Verknüpft sind diese Daten durch ihre Sortierung innerhalb der JSON-Datei, siehe Listing 1.

```

{
  [
    [
      [
        [-54, -57],
        [-45, -60],
        [-50, -66],
        ...
      ],
      [
        [-59, -61],
        [-54, -57],
        [-58, -52],
        ...
      ],
      ...
    ]
  ]
}
  [
    {
      "HOME_ps": 2268.1,
      "EDUCATION_ps": 297.9,
      "SHOPPING_ps": 744.2,
      ...
    },
    {
      "HOME_ps": 1629.6,
      "EDUCATION_ps": 114.1,
      "SHOPPING_ps": 453.3,
      ...
    },
    ...
  ]
}

```

Listing 1: Inhalt der JSON-Dateien für Geometrien (links) und Attribute (rechts) am Beispiel der Ortsteile

Um die CONTAINS-Operationen zu optimieren, wurde durch das *shptree*-Programm vom UMN-Mapserver für jedes Shapefile ein räumlicher Index erstellt. Dadurch werden die Flächen der Shapefiles nicht mehr sequenziell geprüft, sondern auf Basis ihrer räumlichen Verteilung untersucht. Der daraus resultierende Effekt wird besonders im Hinblick auf die TVZs und Grid-Shapefiles deutlich, da diese aus bis zu 1.731 Flächen bestehen. Durch die Pendelbewegung zu den Wohnorten, die in Abbildung 35 ablesbar sind, ist eine weitere Optimierung der CONTAINS-Operation möglich. Statt den Wohnort stets aufs Neue zu prüfen, werden für die fünf zuletzt untersuchten Wohnorte die gefundenen Flächen im Hauptspeicher zwischengespeichert (Caching).

Die unterschiedlichen Standortnutzungsdichten der Flächen werden abgestuft in fünf Klassen dargestellt. Die Unterteilung erfolgt in Form von *gleichen Intervallen*. Dabei ist zu empfehlen, nur Werte innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95% einzubeziehen. Das bedeutet, die 2,5% höchsten und niedrigsten Nutzungsdichten für die Untergliederung nicht zu berücksichtigen, damit eine Verzerrung der gesamten Klassifizierung durch mögliche „Ausreißer“ vermieden wird. Für die Signaturierung eignet sich im Falle von regelmäßigen Intervallen eine gleichmäßige Abstufung der Sättigung, die auf Basis der im Vorfeld hergeleiteten Ausgangsfarben zu realisieren ist (Brewer 2006). Da der originale Farbton noch für spätere Zwecke genutzt werden soll, wird der Ausgangsfarbtönen in sechs Sättigungsstufen untergliedert (100%; 83,3%; 66,6%; 50%; 33,3% und 16,6%) und der Farbton mit einem vollen Sättigungsgrad zunächst nicht verwendet.

Die Darstellung im Browser erfolgt durch SVG, welches über die JavaScript-Bibliothek D3 erzeugt wird. In Listing 2 ist der wichtigste Teil des Programmcodes in vereinfachter Form aufgeführt. Im ersten Teil (Zeilen 1 bis 6) wird der Kontext definiert: Die gewählte Signatur ist die Nutzungsdichte der Einkaufsstandorte, für diese wird die Farbe Bordeaux gewählt. Dass die Geometrien und Attribute bereits geladen sind, wird in Zeile 5 und 6 angedeutet.

```

1  /* Variablen initialisieren */
2  var signatur    = "SHOPPING_psk"; //Nutzungsdichte der Einkaufsstandorte
3  var fillColor   = "#A02E37";      //Bordeaux
4  var strokeColor = "#FFFFFF";     //Weiß
5  var layerGeoms  = [geoms];       //Geometrien
6  var layerAtts   = [atts];        //Attribute
7
8  /* Erzeugen des SVG-Dokuments durch D3*/
9  d3.select("svg")
10 .selectAll("path")
11 .data(layerGeoms)
12 .enter()
13 .append("path")
14 .attr("d", function(d){
15   //Pfad als Fläche (Verkettung der Koordinatenpaare)
16   return geoVisBgDrawFunction(d.vertices);
17 })
18 .style("fill", fillColor) //Flächenfüllung
19 .style("fill-opacity", function(d, i){
20   //Flächenfüllung (Sättigung abhängig von Relation zum Maximalwert)
21   //Berechnung erzeugt Werte zwischen 0.166, 0.333, 0.5, 0.666, 0.833
22   return geoVisCalcBgOpacity(layerAtts[i]);
23 })
24 .style("stroke", strokeColor) // Flächenkontur (Farbe)
25 .style("stroke-width", 2)     // Flächenkontur (2px Strichbreite)
26 .style("stroke-opacity", 1);  // Flächenkontur (100% Sättigung)

```

Listing 2: Programmcode zum Darstellen der Choroplethen-Karte (vereinfacht)

Es folgt D3-spezifische Syntax: In Zeile 9 wird das SVG-Element aus dem HTML-Dokument fokussiert. In den Zeilen 10 bis 12 erfolgt die Erzeugung virtueller path-Elemente und deren Verknüpfung mit den Layer-Geometrien. In den darauffolgenden Zeilen wird die Darstellung jedes path-Elementes auf Basis der Werte konfiguriert. Die Festlegung der Sättigung wird in Zeile 22 durchgeführt.

3.3.3 Ergebnisse

Im Ergebnis liegt eine relativ einfache, interaktive Thematische Karte vor, welche die räumliche Standortnutzungsverteilung in übersichtlicher Form präsentiert. Die notwendigen Daten haben eine sehr geringe Ladezeit von unter einer Sekunde. Auch für das Rendering bedarf es weniger als eine Sekunde je Kartenebene. Ebenfalls gelungen wirkt die harmonisch abgestufte Farbgestaltung, welche auf den originalen Farben aus den MiD-Berichten basiert.

Ein mögliches Problem könnte bei der Kartennutzung auftreten, wenn das zu analysierende Tripfile aus zu wenigen Personen besteht und Standortnutzungsdichten von unter 8 Nutzungen pro km² vorliegen, da in der Legendenbezeichnung nur Ganzzahlen eingesetzt werden können.

3.4 Einzelne Individuen: Raum-Zeit-Pfade

In einem zweiten Visualisierungsziel sollen nun die raumzeitlichen Bewegungen einzelner synthetischer Individuen dargestellt werden. Dies ist für die Gruppe der Verkehrsexperten und Modellierer notwendig, da diese Simulationsergebnisse verifizieren und plausibilisieren müssen. Der sich für die-

sen Zweck am besten eignende Kartentyp ist der aus der Zeitkartographie stammende Raum-Zeit-Pfad, da er in der Lage ist, räumliche und zeitliche Veränderungen über verschiedene Dimensionen getrennt dazustellen.

Von besonderem Interesse für Verkehrsrecher und Modellierer sind dabei Informationen über den Modus und den Standorttyp, in speziellen Fällen auch über den Wegezweck und die konkrete ausgeführte Aktivität an einem Standort. Informationen zu Reisezeit, zurückgelegter Distanz oder Aufenthaltsdauer sind eher sekundär zu betrachten.

3.4.1 Umsetzung

Die oben genannten primären Informationen lassen sich direkt auf die Segmente der Raum-Zeit-Pfade übertragen, da es sich dabei entweder um die Bewegung oder um den Aufenthalt handelt und sie sich somit nicht überlagern. Zudem können die Signaturen wie schon bei den Thematischen Karten aus den MiD-Berichten übernommen werden. An die vertikal verlaufenden Segmente der Aufenthalte wird die Signatur abhängig vom genutzten Standorttyp vergeben. Die schräg verlaufenden Segmente der Bewegungen erhalten ihre Signatur abhängig vom Modus. Da die Signaturen der Standorttypen und Modi teilweise aus gleichen Farbtönen bestehen, werden die Segmente der Bewegungen in Anlehnung an Fahrstreifen um eine Strichierung ergänzt. Die Umsetzung ist in Abbildung 46 dargestellt, darin wird der Tagesplan von Person 1000147 aus Haushalt 1000029 abgebildet.

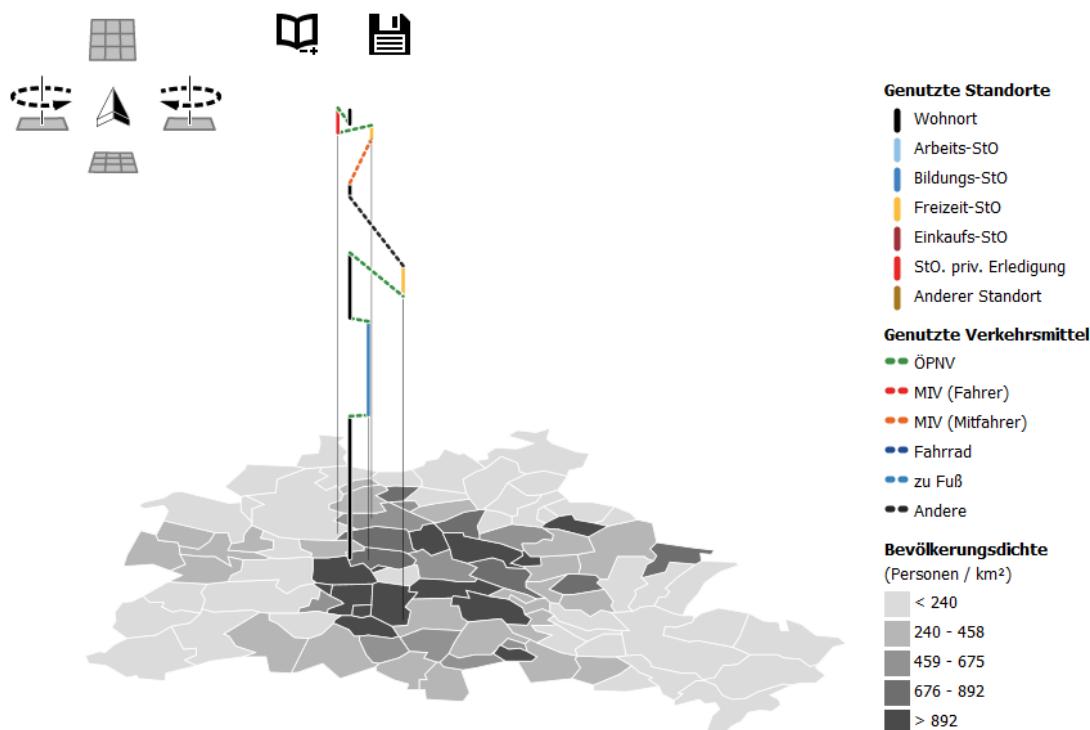


Abbildung 46: Umsetzung der Raum-Zeit-Pfade

Um die im Theorieteil beschriebenen Probleme der Verdeckung zu lösen, wurde sich für eine 3D-Navigation entschieden, da diese eine plastische Vorstellung des dargestellten Raumes bewirkt und sie die bereits vorhandenen Zoom- und Pan-Funktionen ergänzt. Bereitgestellt wird die Navigation durch einen eigenen Navigationsbereich in der oberen linken Ecke. Vier Symbole zeigen die verschiedenen Navigationsmöglichkeiten: Das Kippen nach oben oder unten sowie das Drehen im oder gegen den Uhrzeigersinn. Dabei werden alle Haupt- und Nebenhimmelsrichtungen angeboten (Nord, Nordost, Ost, usw.) sowie vier verschiedene Kippwinkel angezeigt (0° , 30° , 60° und 90°). Um die Orientierung zu erleichtern, ist zwischen den 3D-Navigations-Elementen ein plastischer 3D-Nordpfeil dargestellt, der sich entsprechend der aktuellen Ansicht positioniert. Für eine räumliche Verstärkung der dargestellten Szene wurden die Übergänge zwischen den einzelnen Perspektiven als flüssiger Übergang (*Transition*) gestaltet.

Aus der Kombination aller möglichen acht Dreh- und der vier Kippwinkel lassen sich insgesamt 32 verschiedene Blickwinkel variieren. Dient die Variation des Drehwinkels dem plastischen Verständnis und der Auflösung von Verdeckungen, entscheidet die Wahl des Kippwinkels über die Gewichtung der räumlichen und zeitlichen Komponenten. So geht bei der Darstellung einer auf 0° gekippten Szene eine ganze Dimension des Raumes verloren, da diese durch die zeitliche Komponente ersetzt wird. Anders verhält es sich beim Kippen auf 90° , hier liegt der Fokus ganz auf dem zweidimensionalen Raum, die zeitliche Komponente kann hingegen nicht abgebildet werden. Das Kippen auf 30° oder 60° jedoch entspricht einer Vogel- bzw. Kavaliersperspektive. Nur in diesen Perspektiven können die räumlichen und zeitlichen Komponenten gemeinsam abgebildet werden.

Bereits im Theorieteil wurde erläutert, wie die genaue Zuordnung einzelner Punkte auf die Zeit- und Raum-Achsen realisiert werden kann. Dies wurde mittels Verbindungslien zwischen den besuchten Standorten im Raum-Zeit-Pfad zu den Thematischen Karten gelöst. Bei der Wahl der Projektion erfolgte eine bewusste Entscheidung für eine parallele und gegen eine perspektivische Form, da die Aufenthalte ansonsten nicht vertikal, sondern leicht nach außen gekrümmmt dargestellt würden. Bei einer perspektivischen Projektion wäre neben den 32 verschiedenen Blickwinkel zusätzlich auch eine Navigation in die Tiefe notwendig, was für die visuelle Analyse jedoch kaum Vorteile brächte.

Die eingangs erwähnten sekundären Informationen können mittels einer Kurzinfo-Lösung (Tooltip-Lösung) in einem kleinen Informationsdialog (Infobox) angezeigt werden. Wird der Mauszeiger über ein Segment der Bewegung bewegt, so werden die Abfahrt-, Reise- und Ankunftszeiten sowie die zurückgelegte Distanz und der Modus in einer kompakten Infobox aufgelistet. Bei Aufenthalten erscheinen hingegen Informationen zum Wegezweck und der ausgeführten Aktivität als auch Beginn- und Endzeiten. Die weiße Kontur des betreffenden Segments wechselt dabei von weiß auf gelb. In

Abbildung 47 sind alle 15 Segmente des Raum-Zeit-Pfades abgebildet, sodass sich der Tagesplan lückenlos nachvollziehen lässt.

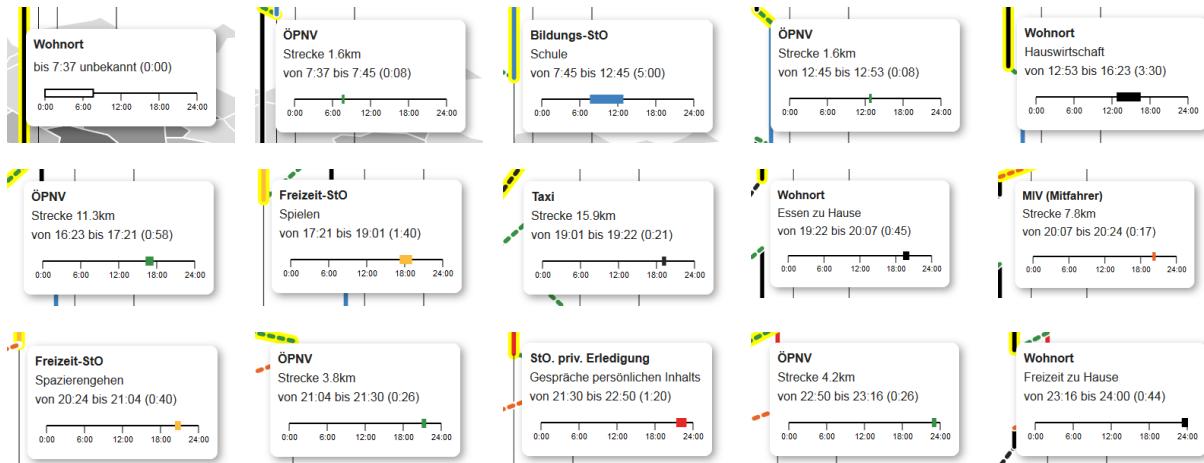


Abbildung 47: Tooltip-Infoboxen zu den einzelnen Segmenten des Raum-Zeit-Pfades

Besonders wichtig ist die Funktion, die darzustellenden Personen bzw. deren Tagesplan zu ändern. Dazu gibt es wie auch bei den Thematischen Karten einen modalen Dialog, der durch ein Klicken auf das Buch-Symbol neben dem Navigationsbereich geöffnet wird. In diesem können alle zur Verfügung stehenden Tagespläne von Personen separat aktiviert oder deaktiviert werden, bereits aktivierte Tagespläne sind durch einen gelben Rahmen hervorgehoben. Die Tagespläne der Personen sind in Haushalte zusammengefasst. Kleine Kacheln bieten zusätzlich eine Vorschau auf die räumliche Ausdehnung des Tagesplanes der Person, indem der Wohnort durch einen orangen Kreis hervorgehoben wird. Der Dialog ist in Abbildung 48 dargestellt.

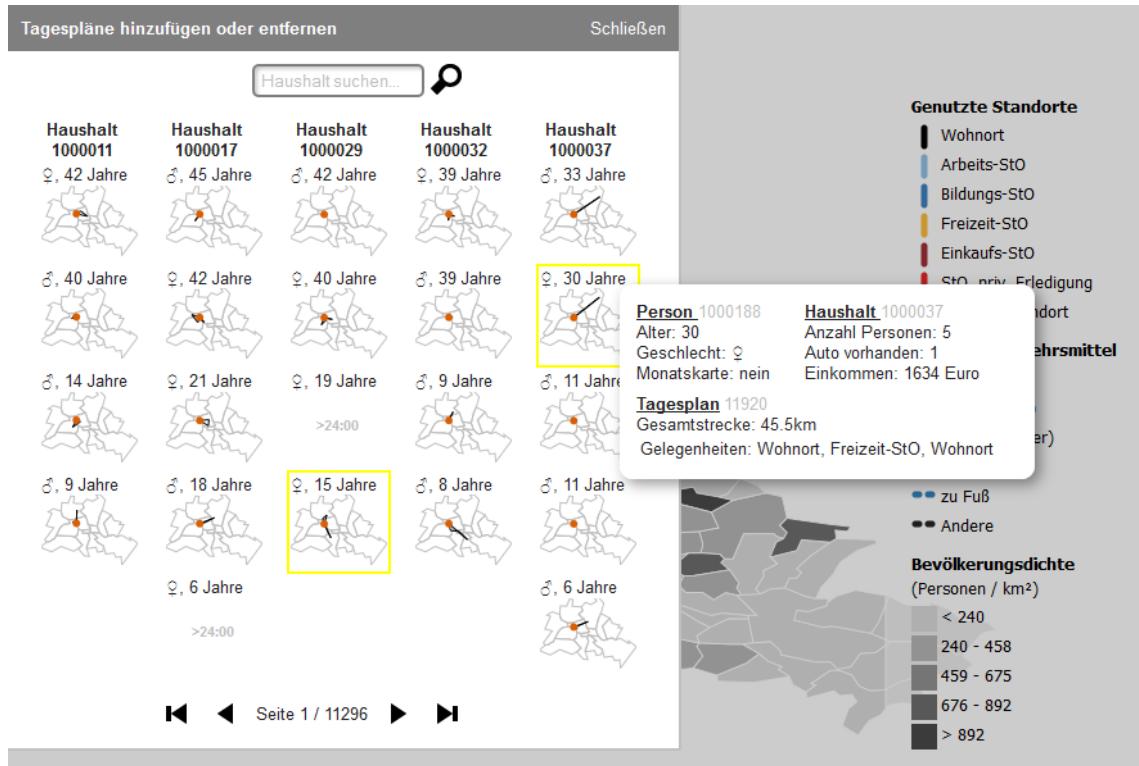


Abbildung 48: modaler Dialog zum hinzufügen oder entfernen von Tagesplänen

Haushalte und Personen werden durch ihre Identifikationsnummern (IDs) beschrieben. Aus Platzgründen werden lediglich sechs Haushalte gleichzeitig abgebildet. Alle anderen Haushalte und deren Personen können durch Blättern (Pageing) oder durch eine gezielte Suche nach Haushalts-IDs erreicht werden. Zu guter Letzt können durch eine Tooltip-Lösung detaillierte Informationen von Personen, dem dazugehörigen Haushalt und deren Tagesplan angezeigt werden, indem der Mauszeiger über die jeweilige Kachel einer Person bewegt wird.

Durch die Möglichkeit, die darzustellenden Tagespläne frei zu kombinieren, ist es möglich, ganze Haushalte gemeinsam darzustellen. Bei der Darstellung bspw. von fünf Tagesplänen würde die dargestellte Szene jedoch aus sehr vielen Bewegungs- und Standort-Segmenten bestehen, so dass eine effiziente Erfassung der Informationen fast nicht mehr gegeben wäre. Hilfreich ist in solchen Fällen die Reduzierung einer Dimension durch das Kippen auf 0° oder 90°. Durch die orthogonale Perspektive können dann sogar die Bewegungsprofile mehrerer Haushalte miteinander verglichen werden.

Siehe Abbildung 49

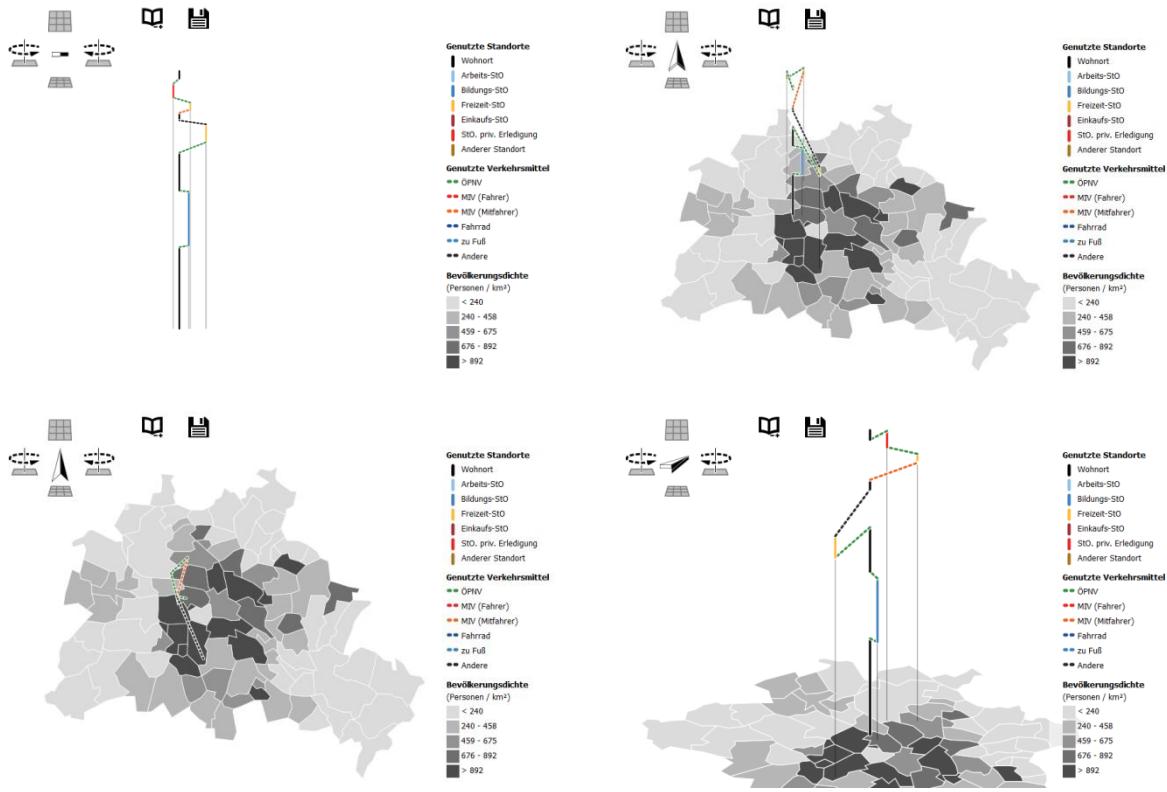


Abbildung 49: mögliche Perspektiven auf einen Raum-Zeit-Pfad: Startansicht mit
0° Altitude (oben links); 60° Altitude (oben rechts);
90° Altitude (unten links); optimale Sicht 30° Altitude, 45° Azimuth (unten rechts)

3.4.2 Implementierung

Bei der Umsetzung der Raum-Zeit-Pfade gibt es viele nennenswerte Implementierungsdetails, die leider nicht in ihrer Gänze erläutert werden können, da es den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würde. Darum wird in der Folge nur auf die Berechnung der 32 verschiedenen Visualisierungsgeometrien im GeoVis-Untermodul eingegangen. Die Implementierung der weißen Segmentkonturen, der 3D-Navigation, der Tooltips und der Sortierung sich überlagernder Raum-Zeit-Pfad-Segmente werden hingegen nicht erläutert.

Im Rahmen der Realisierung musste zunächst die Zeit auf eine künstlich erzeugte z-Achse übertragen werden, um 3D-Koordinaten zu erhalten. Damit diese in einem harmonischen Verhältnis mit der geographischen Grundfläche (x- und y-Achsen) stehen, wurde der maximale z-Wert mit der maximalen räumlichen Ausdehnung gleichgesetzt - den zuvor bereits erwähnten 47 km. Jene in Abschnitt 3.1 erwähnten Personen, die sich auch nach Mitternacht bewegen, sollen für diese Geovisualisierung ausgeschlossen werden, womit der maximal vorhandene Zeit-Wert 1.440 Minuten beträgt. Somit können alle Zeitangaben mit dem Maßstabsfaktor von 47.000m / 1.440min (32,6m/min) multipliziert werden, um künstliche Höhenangaben zu gewinnen. In einem späteren Schritt wird die gesamte z-Achse gemeinsam mit den x- und y-Achsen auf 1.000 Pixel normiert.

Somit existieren Punkte von Tagesplänen im Raum, die durch ihre zeitliche Sortierung zu einem Raum-Zeit-Pfad verbunden werden können. Um sie darstellen zu können, müssen sie auf eine im Raum definierte Perspektive projiziert werden. Bei perspektivischen Projektionen geschieht das i.d.R. über die Platzierung einer virtuellen Kamera mit eigenem kartesischen Koordinatensystem und einer Definition der Brennweite durch Near- und Far-Plane. In der angestrebten parallelen Projektion lässt sich dies wesentlich einfacher durch ein polares, genauer durch ein horizontales polares Koordinatensystem beschreiben. Dabei wird die Lage von Objekten im Raum durch Rotationswinkel (*Azimuth*, A), Höhenwinkel (*Altitude* oder *Elevation*, a) und Abstand zum Koordinatenzentrum beschrieben (de Lange 2013). Durch die angestrebte parallele Projektion ist die Angabe des Abstandes irrelevant. In Abbildung 50 ist ein schematischer Raum-Zeit-Pfad dargestellt. Links davon ist in Blau dessen kartesisches 3D-Koordinatensystem abgebildet. Rechts neben dem Raum-Zeit-Pfad sind in Rot die Rotationswinkel Azimuth und Altitude des horizontalen Koordinatensystems eingezeichnet, durch welche die Kamerakoordinaten beschrieben werden. Der Blick der Kamera ist dabei immer auf das Zentrum, bspw. das Zentrum Berlins, gerichtet.

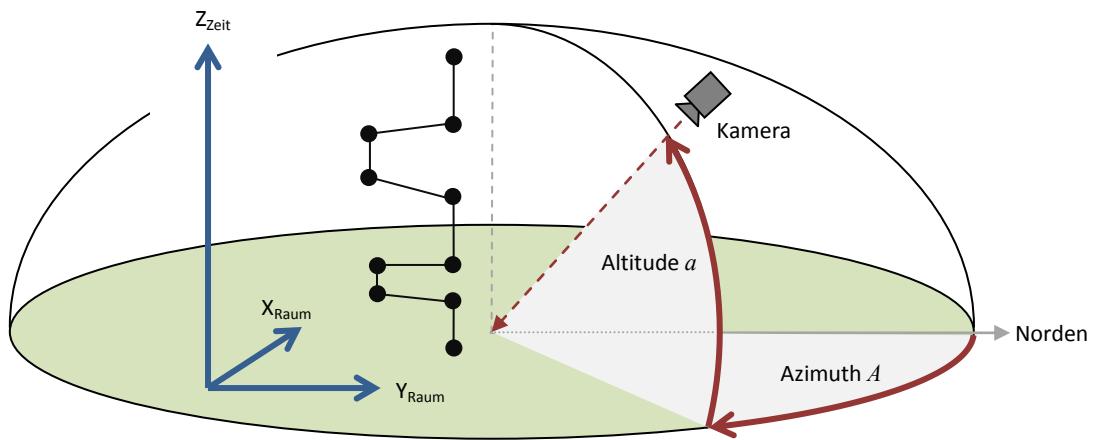


Abbildung 50: 3D-Koordinatensystem durch x-, y- und z-Achsen (links in blau) und astronomisches Koordinatensystem durch Azimut und Altitude (rechts in rot) gemeinsam dargestellt. Ein fiktiver Raum-Zeit-Pfad befindet sich in der Mitte.

Für die Berechnung der Darstellungsgeometrien wird die Java 3D API nicht benötigt, diese lassen sich mittels affiner Koordinatentransformationen implementieren. Konkret genügen zwei Rotationsmatrizen, um die kartesischen Koordinaten zur Kamera zu drehen: Um die z-Achse (Azimut) und die x-Achse (Altitude). Nach den Rotationen ist die gewünschte Perspektive gen Norden gerichtet und kann kurzerhand abgelesen werden, siehe Abbildung 51. Es muss jedoch beachtet werden, dass die y-Achse der Bildkoordinaten durch die z-Achse der 3D-Koordinaten abgebildet werden. So müssen in einem letzten Schritt lediglich die x- und z-Koordinaten der 3D-Szene abgelesen werden, um x- und y-Koordinaten des Bildes zu gewinnen. Aus im Folgenden noch ausgeführten Gründen wird aber auch die Tiefe des Punktes gespeichert. Die Eigenschaft Tiefe beschreibt in diesem Zusam-

menhang, wie weit eine Koordinate aus dem jeweiligen Blickwinkel in das Bild hineinreicht, was dem Wert der y-Achse entspricht.

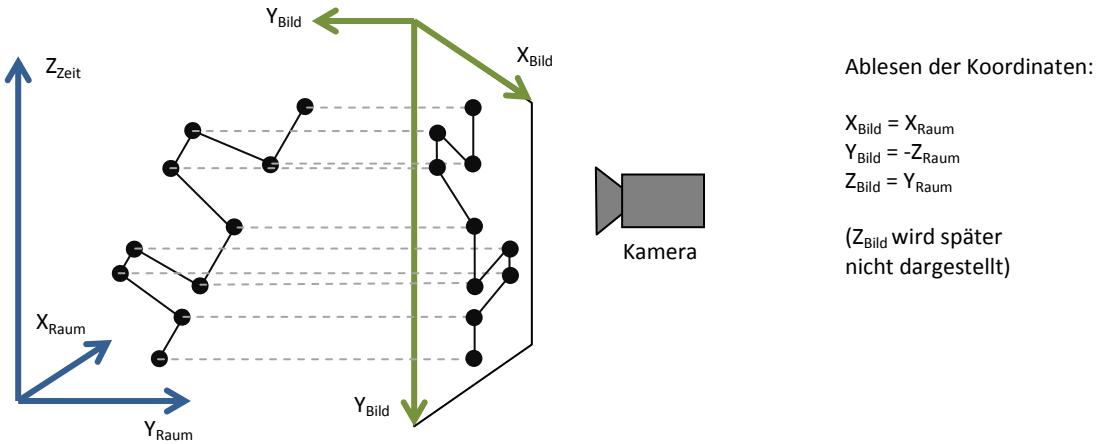


Abbildung 51: Ablesen der 2D-Koordinaten aus den rotierten 3D-Koordinaten

Nachdem das Verfahren zur Ablage der JSON-Visualisierungsdaten erläutert wurde, kann nun auf den Prozess des Renderings im Webbrowser eingegangen werden. Dafür werden stets beide JSON-Dateien eines Tagesplanes geladen, wobei allein die Geometrien des aktuellen Blickwinkels genutzt werden. Das Erstellen des SVG-Elemente geschieht analog zu den Flächen der Thematischen Karten, statt um Pfade handelt es sich hier aber lediglich um Linie je Segment. Zu beachten ist jedoch die Zeichenreihenfolge, welche bei SVG durch die Reihenfolge der SVG-Elemente innerhalb des Dokuments beschrieben wird. Bei der Vielzahl an Blickwinkeln und dem flexiblen Einbinden mehrerer Tagespläne sind Überschneidungen unvermeidlich und es kommt rasch zu fehlerhaften und irritierenden Darstellungen, die an Illustrationen von M. C. Escher erinnern (Locher 2013).

3.4.3 Ergebnisse

Durch die 3D-Geovisualisierung der Tagespläne mittels Raum-Zeit-Pfaden können die Tagesabläufe im räumlichen, zeitlichen und fachlichen Kontext konzentriert betrachtet und visuell analysiert werden. Dabei fällt bspw. auf, dass Hin- und Rückwege teilweise in verschiedenen Modi stattfinden, was in der ursprünglichen Planung nicht vorgesehen war. Gleichsam überraschend erscheint auch der Vorgang, dass Eltern ein Kind zur Schule bringen (Aktivität „Lernen mit Kindern“) während das gleiche Kind eigenständig zur Schule geht. Grund für dieses irritierende Ergebnis ist der Datenschutz, der die MiD-Daten umfasst und die Kopplung zweier Personen verbietet.

Das Aktivieren / Deaktivieren einzelner Tagespläne gestaltet sich über den modalen Dialog sehr komfortabel. Die Suche auf Basis der Haushalts-ID ist jedoch etwas umständlich und wird voraussichtlich ausschließlich von Verkehrsexperten und Modellierern genutzt, da diese wesentlich mehr Erfahrung

mit den Rohdaten, den Tripfiles, besitzen. Die Tooltip-Infobox ist im modalen Dialog, aber auch bei den Raum-Zeit-Pfaden selbst ein geeigneter Weg, um Fachinformationen aufzulisten.

Die 32 angebotenen Blickwinkel scheinen insgesamt ausreichend zu sein. Es treten nur wenige Situationen mit eng aneinander laufenden Raum-Zeit-Pfaden auf, in denen weitere Zwischenstufen im Azimuth oder der Altitude sinnvoll erscheinen. Darüber hinaus erweist sich in der orthogonalen Perspektive ausschließlich die 0° Drehung (Norden oben) als sinnvoll, womit auf die sieben weiteren Drehwinkel praktisch verzichtet werden könnte.

Durch die genutzte weiße Kontur um jedes Segment heben sich die Raum-Zeit-Pfade gut von den Hintergrunddaten ab. Auch die Darstellung der Überschneidungen können dadurch optimal dargestellt werden. Eine präzise Abbildung der Überschneidungen zwischen den einzelnen Segmenten ist von großer Wichtigkeit, da eine fehlerhafte Darstellung die korrekte Interpretation der Tiefenverhältnisse seitens des Nutzers stark beeinträchtigen würde.

Durch die Raum-Zeit-Pfade ist es möglich die in Abschnitt 2.4.4 angesprochenen Prüfung der zeitlichen und finanziellen Durchführbarkeiten der generierten Aktivitätenpläne zu testen. So kommen beim Betrachten mehrerer Tagespläne durch die Raum-Zeit-Pfade einige Tagespläne zum Vorschein, die auf dem ersten Blick unplausibel erscheinen. Bei den zwei Abbildung 52 gezeigten Beispiele, handelt es sich um die Tagespläne von einem siebenjähriges Mädchen und einer 67 Jahre alten Frau. Das Mädchen auf der linken Seite besucht an einem Tag drei Standorte privater Erledigungen, drei Freizeitstandorte und einen Einkaufsstandort. Dabei fährt sie sechsmal mit dem ÖPNV, legt drei Wege zu Fuß zurück und ist einmal als Mitfahrerin unterwegs. Am Ende betritt das Mädchen um 22:32 Uhr das letzte mal den Wohnort.

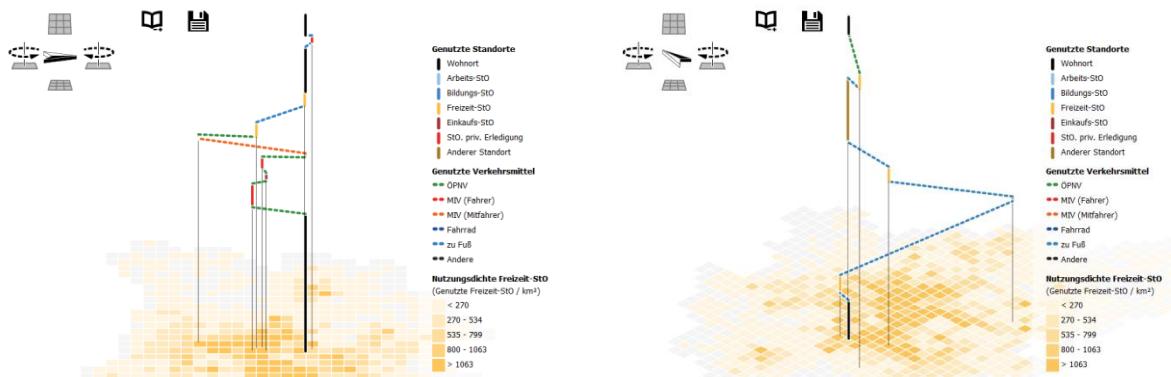


Abbildung 52: unplausible Tagespläne, deren genauer Generierung genau geprüft werden könnte:
ein 7 jähriges Mädchen (link) und eine 67 jährige Frau (rechts)

Die 67 Jahre alte Dame auf der rechten Seite von Abbildung 52 beginnt ihren Tag bereits um 2:64 Uhr morgens, um von 3:14 Uhr bis 4:34 Uhr Auszugehen, bzw. Essen zu gehen. Anschließend läuft sie 20,8km in vier Stunden und 28 Minuten. Nach einem kurzen Aufenthalt läuft sie weitere 15,4km um zur Mittagszeit eine Stunde Sport zu treiben. Um 20:48 Uhr beginnt sie eine weitere Sportstunde an einem anderen Standort. Am Tagesende fährt sie dann doch einmal mit dem ÖPNV und trifft um 22:42 Uhr ihrem Wohnort ein.

3.5 Aggregierte Individuen: Verkehrsströme zwischen Raumeinheiten

Das dritte Visualisierungsziel hebt auf aggregierte Individuen ab. Anvisiert wird mittels der angestrebten Geovisualisierung primär die Validierung und Plausibilisierung der simulierten Ortsveränderungen durch Verkehrsexperten und Modellierer. Denkbar ist allerdings auch das Aufdecken von homogenen oder heterogenen Raumstrukturen sowie die Wirkung von Dabe. Soll die Geovisualisierung so aufgebaut sein, dass auch Außenstehende daraus Informationen entnehmen können und sich einen Eindruck von den Ergebnisdaten verschaffen können.

Durch die Aggregation von Ortsveränderungen ist es möglich, Verkehrsströme abzulesen. Wie im Theorieteil in Abschnitt 2.3.1 erläutert, wird dabei die Anzahl von auftretenden Bewegungen zwischen Verkehrszellen untersucht. Betrachtet werden können der auftretende Quell-, Ziel-, Binnen- und Durchgangsverkehr einer Verkehrszelle. Durch die Thematischen Karten stehen bereits neun verschiedene Raumaufteilungen zur Verfügung, die alle als räumliche Aggregationsebene fungieren können.

Weil bei TAPAS der Modellierungsfokus auf den durchgeführten Aktivitäten, Wegezwecken und genutzten Standorttypen liegt, sollten auch diese Informationen in die Geovisualisierung eingehen. Dabei ist es notwendig, die Standorttypen des Zielortes in die Berechnung der Verkehrsströme einzubeziehen.

3.5.1 Umsetzung

Als Hintergrunddaten dienen auch hier die Thematischen Karten. In der Startansicht werden die Ortsteile unter dem Aspekt der Bevölkerungsdichte dargestellt, siehe Abbildung 53. Aufgrund der im Theorieteil erläuterten Effizienzregeln können nicht alle Verkehrsströme gleichzeitig abbgebildet werden, weswegen die Startansicht lediglich die zehn größten globalen Verkehrsströme durch Linien zeigt. Bei diesen handelt es sich stets um Binnenverkehre, die durch einen zirkulierenden Pfeil innerhalb des jeweiligen Ortsteils dargestellt werden. Wären es keine Binnenverkehre, verbände ein gerichteter Pfeil die beiden Quell- und Ziel-Ortsteile.

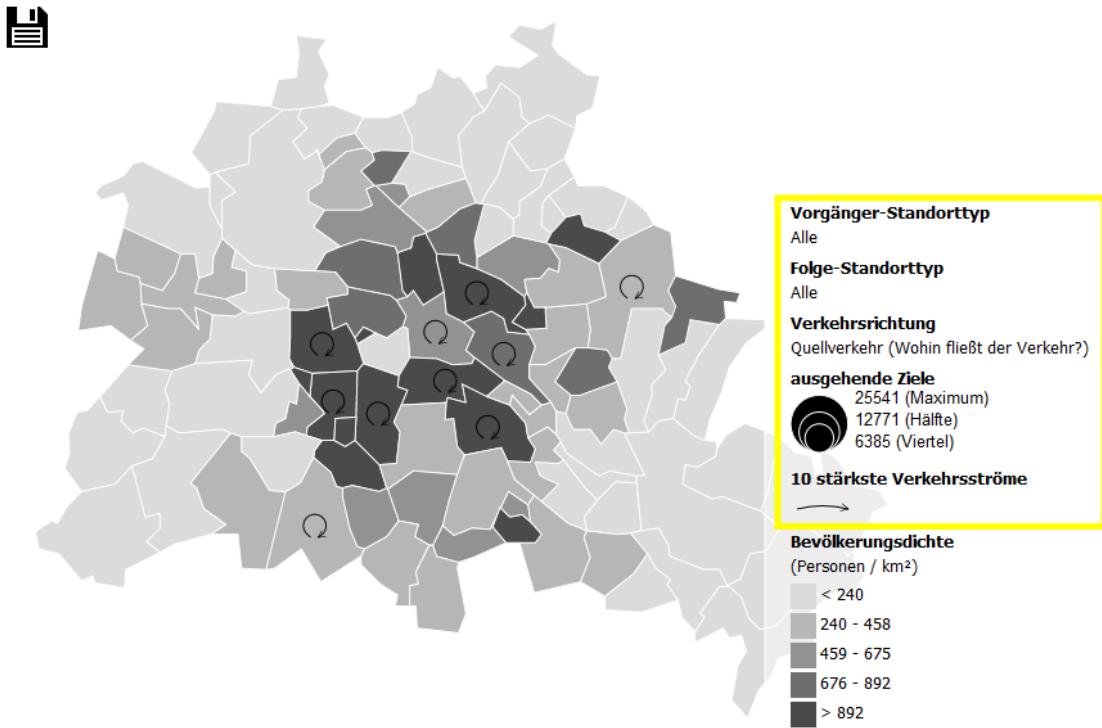


Abbildung 53: Startansicht der Verkehrsströme

Wie im vorherigen Abschnitt angedeutet, sollen die Verkehrsströme im Zusammenhang mit den Standorttypen betrachtet werden. Der aktuelle Kontext wird in der Legende detailliert beschrieben. In der Startansicht werden vorerst alle Vorgänger- und Folge-Standorttypen berücksichtigt. Außerdem liegt der Fokus auf dem Zielverkehr, worauf an späterer Stelle noch genauer eingegangen wird.

Um Verkehrsströme einzelner Ortsteile genauer zu betrachten, muss der Mauszeiger über den gewünschten Ortsteil bewegt werden. In Abbildung 54 ist dies am Beispiel des Ortsteils Friedrichshain demonstriert. Dabei werden die zehn größten globalen Verkehrsströme aus der Startansicht durch die zehn größten Quellverkehrsströme, ausgehend von Friedrichshain, ersetzt. Zusätzlich wird die absolute Anzahl der besuchten Ziele in allen anderen Ortsteilen mittels Kreisdiagrammen abgebildet. Die Größe des Kreisdiagramms ist dabei abhängig von der Größe des Verkehrsstromes und kann mit der Legende abgeglichen werden. Bei der Betrachtung des abgebildeten Beispiels ist zu sehen, dass die zehn größten Ziele der Friedrichshainer Quellverkehrsströme in das Stadtzentrum führen.

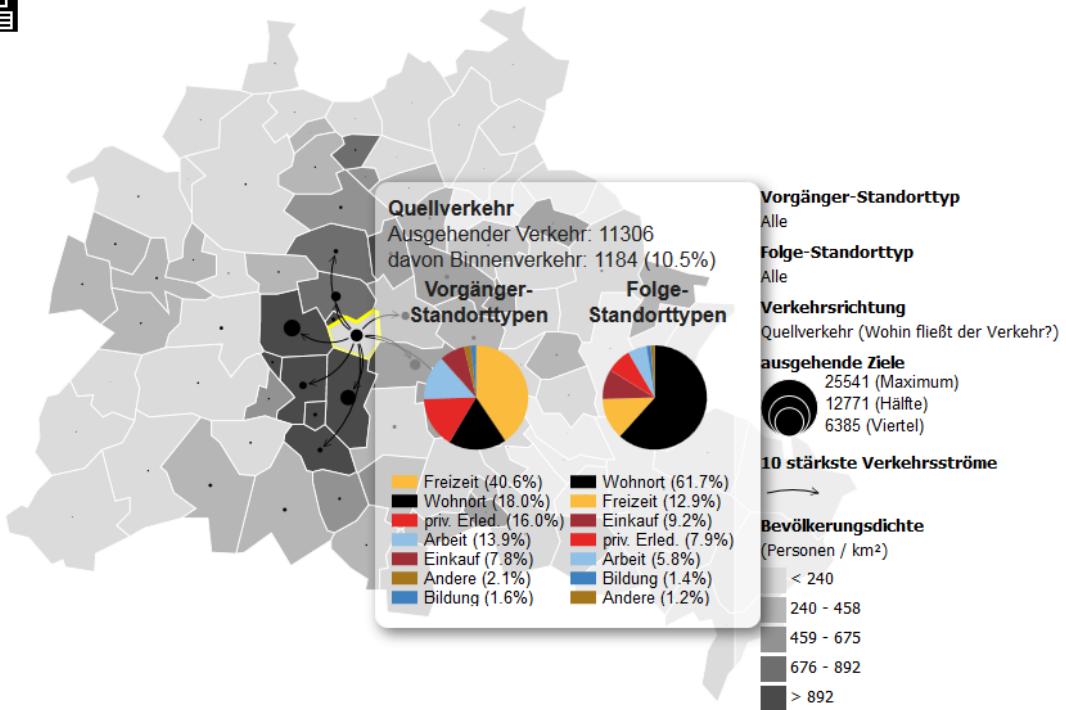


Abbildung 54: Quellverkehr des Ortsteils Tiergarten

Darüber hinaus werden weitere Informationen zu den Quellverkehrsströmen von Tiergarten in einer Tooltip-Infobox aufgelistet. Dabei handelt es sich um die Nennung der Summe aller ausgehenden Verkehre (11.306) und des Binnenverkehrsanteils (1.184 bzw. 10,5%). Es folgt eine genaue Aufschlüsselung der Vorgänger- und Folge-Standorttypen aller Quellverkehrsströme von Tiergarten.

Die Darstellung der Vorgänger-Standorttypen erfolgt durch ein Kreissegmentdiagramm (Tortendiagramm, Pie Chart). Aus den Diagrammen geht hervor, an welchen Standorttypen in Tiergarten sich die Personen aufgehalten haben, bevor sie sich bewegt haben. Dabei handelt es sich mit 40,6% zum Großteil um Freizeit-Standorte, nur 18% der Verkehrsströme entstammen dem Wohnort. Die Folge-Standorte, zu denen sich die Personen bewegt haben, sind ebenfalls aufgeschlüsselt. Dabei handelt es sich zu mit über 60% um die eigenen Wohnorte und 12,9% um einen weiteen Freizeitstandort. Die Folge-Standorte entsprechen den Zielen und befinden sich entweder in anderen Ortsteilen oder – im Falle eines Binnenverkehrs – in Tiergarten selbst.

Um zu ermitteln, welche Verkehrsströme sich auf Tiergarten zu bewegen, muss die Verkehrsrichtung von Quellverkehr auf Zielverkehr geändert werden. Die Umschaltung erfolgt analog zu den Hintergrunddaten in einem eigenen modalen Dialog, der durch Klicken auf den entsprechenden Legenden-eintrag geöffnet werden kann. Dieser Dialog wird auf den folgenden Seiten genauer erklärt. Da die Anpassung der Verkehrsrichtung nur die Fokussierung eines Ortsteils betrifft, treten bei den zehn stärksten globalen Verkehrsströmen des Systems keine Veränderungen auf.

Abbildung 55 zeigt den Friedrichshainer Zielverkehr. Wieder zeigen gerichtete Pfeile die zehn größten Verkehrsströme an, in diesem Fall Zielverkehrsströme. Die zehn größten Quellen der Friedrichshainer Zielverkehrsströme sind jedoch nicht so stark zentriert wie die zuvor untersuchten zehn größten Ziele der Quellverkehrsströme.

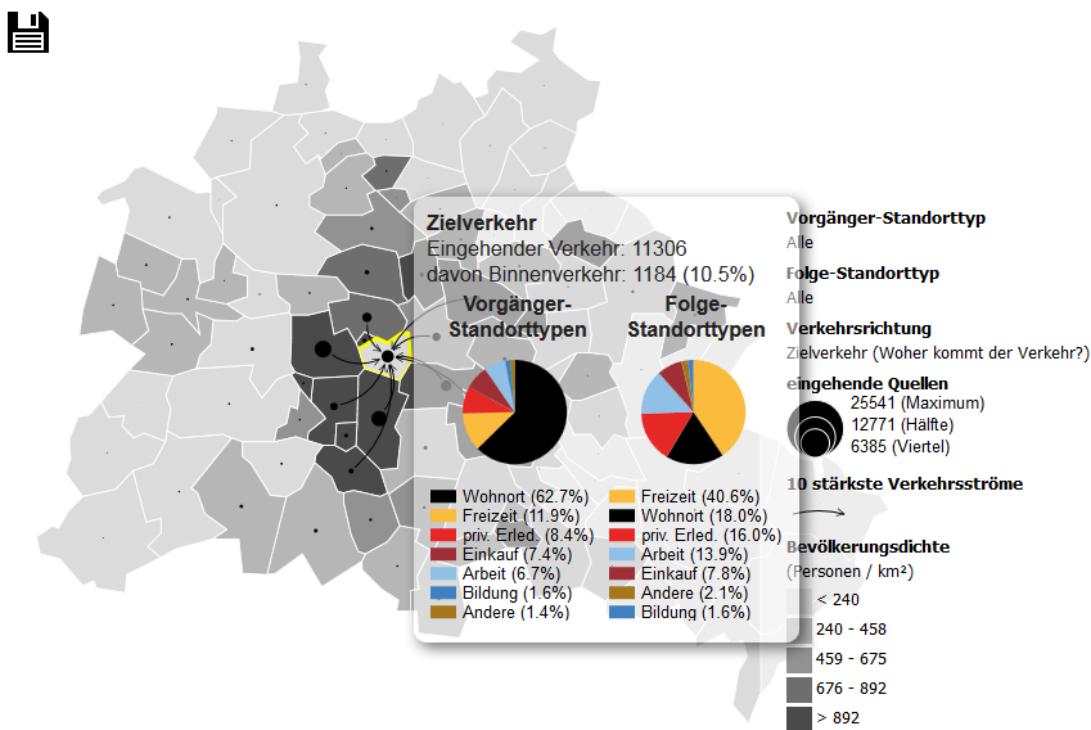


Abbildung 55: Zielverkehre des Ortsteils Tiergarten

Die Tooltip-Infobox enthält die gleiche Liste an Zusatzinformationen wie sie bereits im Hinblick auf den Quellverkehr in Abbildung 54 dargestellt und erläutert wurde. Die aufgeschlüsselten Vorgänger-Standorte befinden sich jetzt außerhalb oder – im Falle des Binnenverkehrs – wieder innerhalb von Tiergarten. Hingegen sind alle Folge-Standorte in Tiergarten lokalisiert. Hier zeigt sich eine in etwa vergleichbare Streuung der Vorgänger- und Folge-Standorttypen wie beim zuvor betrachteten Quellverkehr.

Die Anteile der Vorgänger- und Folge-Standorttypen des Quell- und Zielverkehrs sind nicht nur in Friedrichshain, sondern in auch in den anderen Ortsteilen ungefähr gleich. Lediglich in jenen Ortsteilen die Einkaufs- und Bildungshotspots aufweisen (wie sie in Abschnitt 3.1 identifiziert wurden), treten Varianzen auf. Grund dafür ist die Größe der Gebietsaufteilung, welche durchschnittliche Bewegungsmuster repräsentiert. Eine Untersuchung der Quell- und Zielverkehre durch kleinere Gebietsaufteilungen mittels TVZs und Grids zeigt dabei wesentlich differenziertere Verkehrsströme, siehe Abbildung 56.

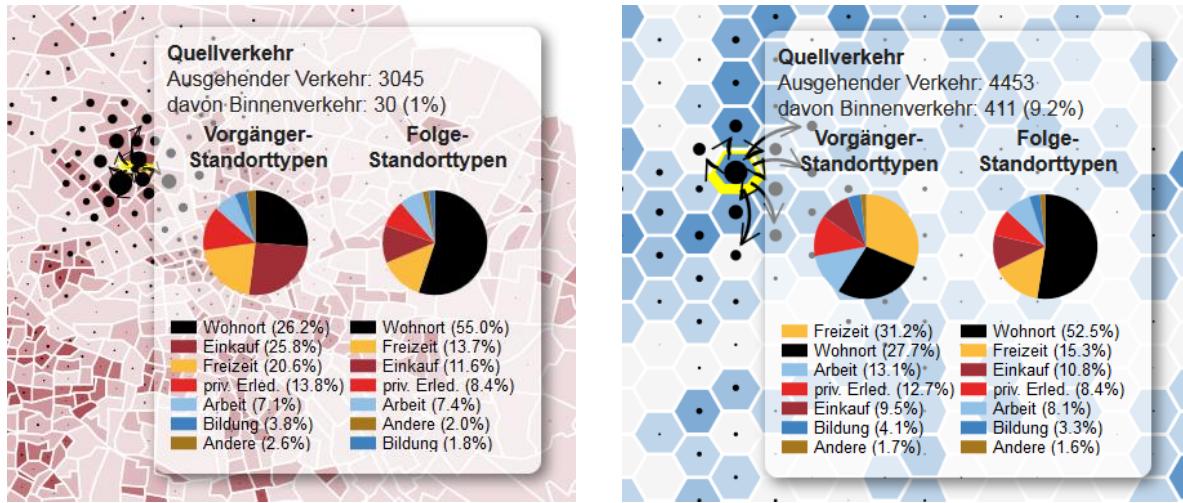


Abbildung 56: Quellverkehr einer TVZ im Ortsteil Gesundbrunnen (links) mit viel Einkauf durch das Gesundbrunnen-Center; Quellverkehr einer kleinen Sechseck-Zelle im Ortsteil Mitte (rechts)

Der modale Dialog zur Anpassung des Verkehrsstrom-Kontextes ermöglicht auch ein Festlegen auf Vorgänger- und Folge-Standorttyp, wie in Abbildung 57 dargestellt. Durch die Auswahl eines bestimmten Vorgänger-Standorttyps lassen sich so bspw. Verkehrsströme untersuchen, die im Wohnort oder Einkaufsstandort ihren Ausgang nehmen. Im Gegenzug können durch die Festlegung eines Folge-Standorttyps Verkehrsströme untersucht werden, die zu einem bestimmten Folge-Standort führen, etwa zum Arbeits- oder Bildungsstandort. Werden sowohl Vorgänger- als auch Folge-Standorttyp gleichzeitig definiert, so können sehr spezielle Verkehrsströme untersucht werden, wie etwa der vom Einkaufsstandort zum Wohnort fließende Verkehr. Dabei ist die Definition des Vorgänger- und Folge-Standorttyps unabhängig von der Verkehrsrichtung. Die drei Anwendungsbeispiele sollen im Folgenden unter dem Fokus des Quellverkehrs in kurzer Form demonstriert werden.



Abbildung 57: Modaler Dialog zur Anpassung der Verkehrsströme

Eine Anpassung der Vorgänger- oder Folge-Standorttypen führt auch zu Änderungen in der Startansicht, weil dadurch völlig unterschiedliche Verkehrsströme betrachtet werden. Der zuerst genannte Fall, die Anpassung des Vorgänger-Standorttyps, ist in Abbildung 58 dargestellt. Darin wurde der Quellverkehr von Tiergarten auf den Vorgänger-Standorttyp Wohnort festgelegt. Im Ergebnis werden 2.035 Quellverkehre betrachtet, was den 18,0% aller 11.306 in Abbildung 54 betrachteten Quellverkehre dargestellt. Die Folge-Standorttypen dieser Quellverkehre werden ebenfalls aufgeschlüsselt.

In Abbildung 59 wurde die Festlegung auf einen Vorgänger-Standorttyp verworfen und stattdessen der Folge-Standorttyp als Arbeitsstandort definiert. Hierbei werden 658 Ortsänderungen betrachtet, was analog zum vorherigen Beispiel 5,8% aller 11.306 Quellverkehre aus Abbildung 54 entspricht. Auch in diesem Fall erfolgt eine Aufschlüsselung der Vorgänger-Standorte.

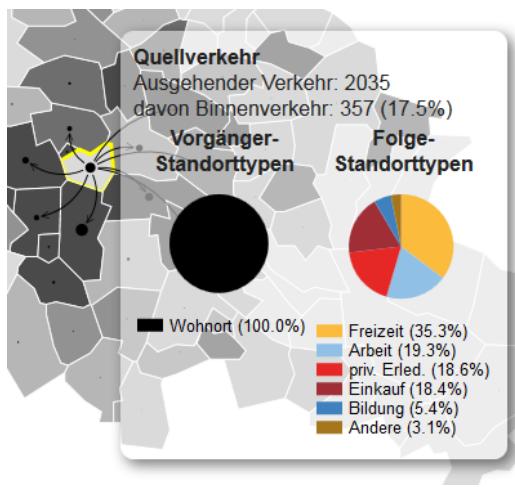


Abbildung 58: Quellverkehr von Tiergarten, gefiltert auf Vorgänger-Standorttyp Wohnort

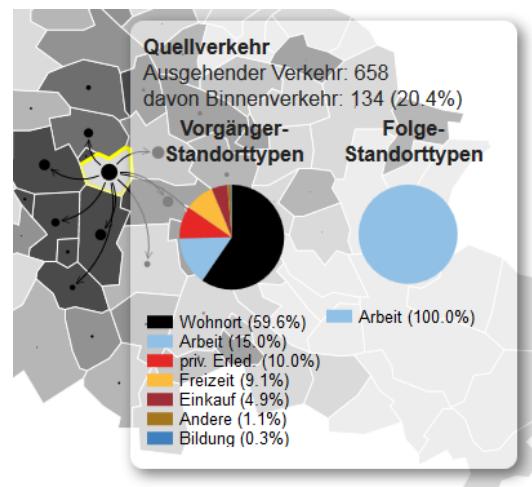
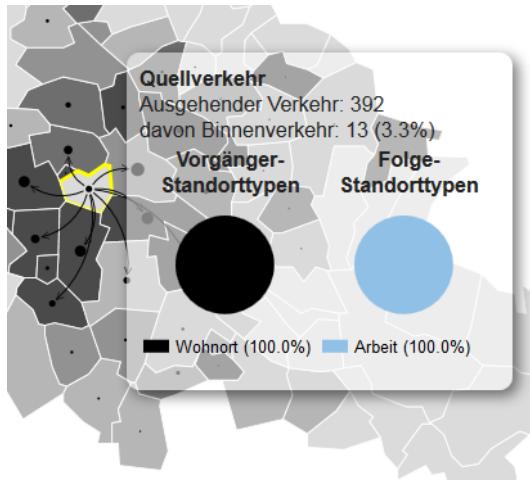


Abbildung 59: Quellverkehre von Tiergarten, gefiltert auf Folge-Standorttyp Arbeitsstandort

In den beiden vorangegangenen Beispielen blieb entweder der Vorgänger- oder der Folge-Standorttyp undefiniert, das letzte Beispiel in Abbildung 60 weist nun jedoch Verkehrsströmungen auf, die durch den Standortwechsel von Wohnort zu Arbeitsstandort entstehen. Dies betrifft insgesamt 392 Arbeitswege, die aus den 19,3% der 2.035 Quellverkehre aus Abbildung 58, wie auch aus den 59,6% der 659 Quellverkehre aus Abbildung 59, resultieren. Durch diese Ansicht lässt sich nun konkret darstellen, zu welchen Arbeits-, Einkaufs- oder Bildungsstandorten sich Personen eines Ortsteils bewegen. Durch die Betrachtung des Zielverkehrs könnte im Gegenzug auch geprüft werden, aus welchen Ortsteilen Personen kommen, die sich zu einem bestimmten Standorttyp eines Ortsteils bewegen.



**Abbildung 60: Quellverkehre von Tiergarten,
gefiltert auf Vorgänger-Standorttyp Wohnort und Folge-Standorttyp Arbeitsstandort**

Abschließend noch einige Anmerkungen zur gewählten Signaturierung: Die Farbgestaltung der Tortendiagramme orientiert sich, wie auch jene der Standortsegmente der Raum-Zeit-Pfade, streng an der Vorlage der MiD-Berichte. Auf den Verbindungslienien der zehn stärksten Verkehrsströme wurde bewusst kein Verkehrsvolumen durch eine Liniensignatur wie Linienfarbe oder Linienbreite abgebildet, da dies redundant zu den Kreissignaturen wäre. Außerdem würde die Effizienz der Karteninterpretation durch die zusätzliche Liniensignatur neben den bereits vorhandenen Flächensignaturen der Thematischen Karten und Punktsignaturen zum Verkehrsvolumen stark eingeschränkt werden.

3.5.2 Implementierung

Grundlegend für die Darstellung von Verkehrsströmen ist die Berechnung der Fahrten- oder Verflechtungsmatrizen. Diese sind in ähnlicher Form bereits im Rahmen des Verkehrsverteilungsmodell des VSA in Abschnitt 2.2 beschrieben worden. Typischerweise werden in einer Fahrtenmatrix die Quelle als Zeile, das Ziel als Spalte und das Volumen als Zelle abgebildet, was mathematisch gesehen einer einfachen Adjazenzmatrix gleich kommt. Bei Quelle und Ziel handelt es sich um die Nummern der jeweiligen Flächen. Der VSA legt für jeden Modus eine eigene Fahrtenmatrix an, wodurch mehrere Fahrtenmatrizen entstehen.

Eine Fahrtenmatrix zu erzeugen, ist vergleichsweise einfach. Für jede Bewegung wird geprüft in welcher Fläche sie beginnt und in welcher sie endet. Der Wert in der jeweiligen Zelle, die durch Quelle und Ziel beschrieben ist, wird anschließend inkrementiert. Schwieriger gestaltet sich hingegen die Verwaltung der Fahrtenmatrizen für die spätere optimale Verarbeitung im Webbrowser.

Da in der umgesetzten Geovisualisierung die Informationen über Vorgänger- und Folge-Standorttypen eingehen, müssen auch hier mehrere Matrizen erzeugt werden. Erste Lösungsansätze bestehen darin, für jede Vorgänger-Nachfolge-Kombination eine Fahrtenmatrix zu erzeugen. Außer-

dem gilt zu beachten, dass durch die Thematischen Karten 12 verschiedene Gebietsaufteilungen vorliegen, die ebenfalls einbezogen werden müssen. Da keine Fahrtenmatrix für die Vorgänger-Nachfolger-Kombination Wohnort-zu-Wohnort existiert, führt das zu insgesamt 504 Fahrtenmatrizen ($12 * 7 * 6$).

Hinzu kommt, dass alle Verkehrsströme standorttypunabhängig angezeigt werden sollen, was jedoch in dieser Strukturierung nicht möglich ist, ohne alle Fahrtenmatrizen einer Gebietsaufteilung gleichzeitig im Webbrowser einzulesen und zu verarbeiten. Darum wird ein weiterer künstlicher Standorttyp „Alle“ erzeugt, der parallel zu jedem Inkrementieren eines Wertes ebenfalls behandelt wird. So mit steigt die Anzahl der benötigten Fahrtenmatrizen auf 672 ($12 * 8 * 7$).

56 Matrizen für Bezirke

Wohnort → Arbeits-StO

1	2	Wohnort → Bildungs-StO
1	6	9
2	9	4
3	1	8
4	10	2
5	0	9
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8	0
5	5	4
...
1	9	8
2	9	4
3	1	9
4	8	0
5	5	4
...
8	5	4
2	2	2
3	9	2
4	1	6
5	5	6
...
3	8	3
2	2	2
1	9	1
4	8</	

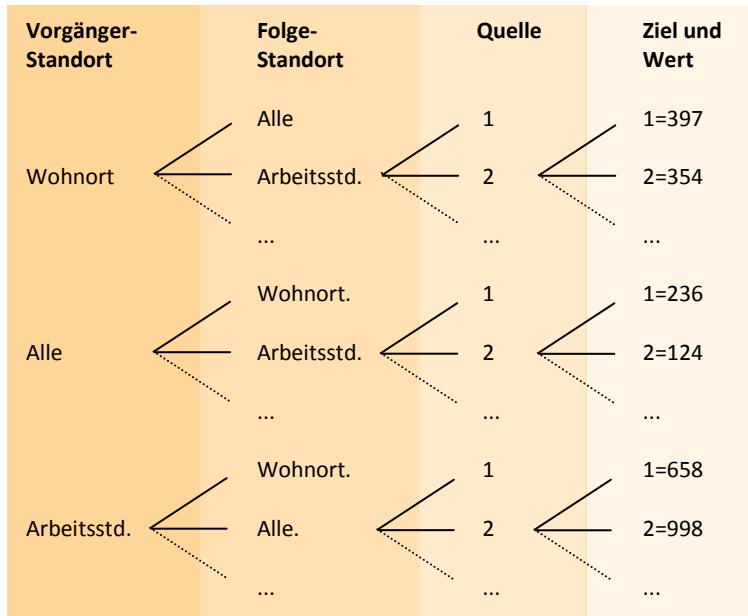


Abbildung 62: Fahrtenmatrix mit Vorgänger- und Folge-Standorttyp als Baumstruktur

```

1 //Quellv. von Wohnort zu Arbeitsstd zwischen 2 und 1
2 var destT = traffic["Wohnort"]["Arbeitsstd"]["2"]["1"];
3
4 //Zielv. von Wohnort zu Arbeitsstd, zwischen 2 und 1
5 var sourceT = traffic["Wohnort"]["Arbeitsstd"]["1"]["2"];
6
7 //Gesamter Quellverkehr, zwischen 2 und 1
8 var sourceSumT = traffic["Alle"]["Alle"]["2"]["1"];
9
10 //relativer Anteil des Folge-Standorttyps Wohnort
11 var sourceHomeT = traffic["Alle"]["Wohnort"]["2"]["1"];
12 var relHome = sourceHomeT / sourceSumT;

```

Listing 3: Zugriff auf Verkehrsströmungen über den „Fahrtenbaum“ mittels JavaScript

```
{
  "Wohnort": {
    "Alle": {
      ...
    },
    "Arbeitsstd": {
      "1": {
        ...
      },
      "2": {
        "1": 397,
        "2": 354,
        ...
      },
      ...
    },
    ...
  },
  "Alle": {
    "Wohnort": {
      ...
    },
    "Arbeitsstd": {
      "1": {
        ...
      },
      "2": {
        "1": 236,
        "2": 124,
        ...
      },
      ...
    },
    ...
  }
}
```

Listing 4: Abbildung der Baumstruktur in das JSON-Format

Durch die Zusammenfassung der Matrizen reduziert sich ihre Anzahl auf die der Gebietsaufteilungen, also 12. Andererseits steigt deren Datenvolumen erheblich an. Über die Baumstruktur können die jeweiligen Verkehrsströme unkompliziert und performant extrahiert werden. Listing 3 verdeutlicht, wie mittels JavaScript auf die einzelnen Verkehrsströme zugegriffen wird. Beim Wechsel der Verkehrsrichtung hin zum Zielverkehr müssen Quelle und Ziel lediglich vertauscht werden. Relative Anteile von bestimmten Vorgänger- oder Folge-Standorttypen eines ungefilterten Verkehrsstromes lassen sich ebenfalls auf einfache Art berechnen.

Für die Abbildung der Quell- und Zielverkehre werden Kreisdiagramme verwendet. Im vorherigen Abschnitt wurde bereits erwähnt, dass die Kreisgröße die Anzahl der Quellen oder Ziele repräsentiert. Dabei wird der absolute Wert nicht auf den Kreisradius übertragen, sondern auf dessen Flächeninhalt (Slocum et al. 2009).

Bei Kreisdiagrammen handelt es sich um Punktsignaturen. Für eine automatisierte Darstellung dieser, stellen Platzierung und Bestimmung der Maximalgröße entscheidende Kriterien dar. Eine einfache Platzierungsmethode für Punktsignaturen auf Einzelflächen ist die Nutzung der Einzelflächen-Zentroiden (Centroids). Für die Bestimmung der maximalen Signaturgröße erfolgt eine Orientierung an der durchschnittlichen Größe aller Einzelflächen, so dass die maximale Flächengröße des Kreisdiagramms der durchschnittlichen Flächengröße aller Einzelflächen entspricht. Die Zentroiden und durchschnittlichen Flächengrößen der Einzelflächen werden bereits in der Filteringstufe im TAPAS-Analyzer berechnet und als zusätzliche Datei im JSON-Format gespeichert.

Ein weiterer, relativ aufwändiger Vorgang ist die Platzierung der gerichteten Pfeile für die zehn stärksten Verkehrsströme. Kreisbögen können in SVG in Form von Bézier-Kurven oder elliptischen Bogenkurven (elliptical arc curve) realisiert werden. Da die Zentroiden der Quell- und Zielflächen bekannt sind, ist die Erzeugung von Bogenkurven der empfehlenswertere Weg. Bei Bogenkurven werden zwei virtuelle Ellipsen links und rechts zwischen den Punkten erzeugt. Aus diesen Ellipsen kann zwischen vier verschiedenen Segmenten als Bogen ausgewählt werden, siehe Abbildung 63. In SVG werden diese Bogenkurven als *path*-Element abgebildet, darin enthalten sind neben den Quell- und Zielpunkten auch der Mittelpunkt einer Ellipse und die Festlegung auf das gewünschte Segment, siehe Listing 5.

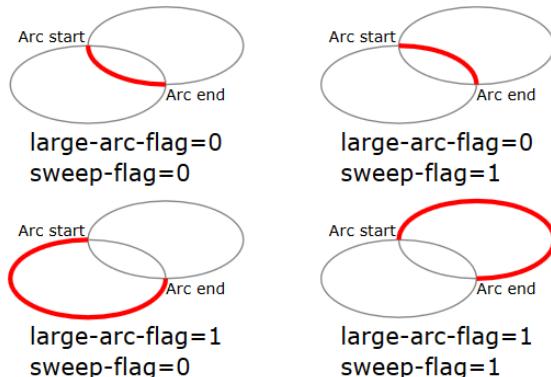


Abbildung 63: Möglichkeiten zur Erstellung von Bogenkurven (W3C 2011b)

```
<path marker-end="url(#arrowEnd)" style="stroke:black; stroke-width:1; stroke-linecap:butt; fill:none;" d="M 3.29, -54.10 A 118.47, 118.47 0 0,1 -110.19, -20.09">
```

Listing 5: SVG-Element zur Darstellung eines rechtskurvigen Bogens zwischen Start- und Endbogen

Die Bogenkurven beginnen und enden direkt auf den Zentroiden der jeweiligen Einzelflächen, auf denen allerdings bereits die Kreisdiagramme für den Quell- oder Zielverkehr platziert sind. Somit ist es notwendig, die Quell- und Zielpunkte der Bogenkurven zu verschieben. Glücklicherweise gehen die Funktionen von SVG über die bloße Darstellung von Vektordaten im Webbrowser hinaus. So stellt SVG auch Berechnungs- und Manipulationsmethoden für die darzustellenden Vektoren bereit. Die Länge von Pfaden kann beispielsweise über die Methode *getTotalLength()* gemessen werden. Außerdem lassen sich Koordinaten auf Pfaden mit der Methode *getPointAtLength()* interpolieren. Mit Hilfe

dieser beiden Handhabungen können neue Quell- und Zielpunkte der Bogenkurven neben den Kreisdiagrammen platziert werden. Listing 6 demonstriert die Erzeugung des path-Elements für Bogenkurven mittels D3 sowie den Algorithmus zur Neuplatzierung von Quell- und Zielpunkten.

```

1 //Quell- und Zielpunkt der Bogenkurve (Zentroiden der Einzelfläche)
2 var sourcePoint = [-110.19, -20.09];
3 var destPoint = [3.29, -54.10];
4
5 //Bogenkurve berechnen
6 var arc = d3.select("svg").append("path")
7     .style("stroke", "black")
8     .style("stroke-width", 1)
9     .style("stroke-linecap", "butt")
10    .style("fill", "none")
11    .attr("d", function(d) {
12        var dx = destPoint[0] - sourcePoint[0];
13        var dy = destPoint[1] - sourcePoint[1];
14        var dr = Math.sqrt(dx * dx + dy * dy);
15        return "M" + sourcePoint[0] + "," + sourcePoint[1] +
16            "A" + dr + "," + dr +
17            " 0 0,1 " +
18            destPoint[0] + "," + destPoint[1];
19    })
20
21 //Radien der des Quell- und Ziel-Kreise berechnen
22 var rSource = calcRadiusSource(sourcePoint, destPoint);
23 var rDest = calcRadiusDest(sourcePoint, destPoint);
24
25 //neue Ziel- und Quellpunkte mit 2px Abstand zu den Kreisen berechnen
26 var gap = 2;
27 var arcLength = bogen.node().getTotalLength();
28 var gapSource = radiusSource + gap;
29 var gapDest = radiusDest + gap;
30 var newSourcePoint = arrow.node().getPointAtLength(arcLength - gapSource);
31 var newDestPoint = arrow.node().getPointAtLength(gapDest);
32
33 //Bogenkurve erneut durch neue Punkte berechnen!

```

Listing 6: Algorithmus zur Platzierung der Quell- und Zielpunkte neben den Kreisdiagrammen

Der in Listing 6 abgebildete Algorithmus erzeugt zunächst die Bogenkurve zwischen den Zentroiden der Einzelflächen. In einem zweiten Schritt werden die Radien der betreffenden Kreisdiagramme berechnet. Dies ist in Untermethoden gekapselt, die an dieser Stelle nicht näher erläutert werden sollen. Beginnend mit der Berechnung des notwendigen Abstands zu den originalen Quell- und Zielpunkten schließt sich eine Ermittlung der neuen Quell- und Zielpunkte der Bogenkurve (im jeweiligen Abstand zum Kreisdiagrammen) mittels getTotalLength() und getPointAtLength() an. Abschließend muss die Bogenkurve auf Basis der angepassten Punkte erneut berechnet werden.

3.5.3 Ergebnisse

Durch die Umsetzung der interaktiven Geovisualisierung von Verkehrsströmen können aggregierte Verkehrsströme aus vielen unterschiedlichen Gesichtspunkten betrachtet werden. Die Benutzerführung ist durch die erste Gesamtübersicht und die freie Betrachtung einzelner Zellen sehr übersichtlich gehalten. Erst durch das Anpassen der Verkehrsströme über den modalen Dialog wird die Geovisualisierung zu einem Werkzeug für Experten. Dass sich die Vorgänger- und Folge-Standorttypen unabhängig von der Verkehrsrichtung betrachten lassen, macht die umgesetzte Geovisualisierung zu einem potentiellen explorativen Analysewerkzeug.

Ein hohes Maß an Flexibilität resultiert außerdem aus den verschiedenen bereitgestellten Gebietsaufteilungen: Bezirke, Ortsteile, TVZs und Rasterzellen. Bei zu großen Einzelflächen nähern sich die Verkehrsströme immer mehr dem Durchschnitt an. Erst durch die Betrachtung von kleinen Aggregationsgruppen können heterogene und homogene Regionen aufgedeckt werden.

Die Aufschlüsselung der Vorgänger- und Folge-Standorttypen ist auf die Ansprüche der Verkehrsforcher und Modellierer zugeschnitten, die mit TAPAS-Ergebnisdaten arbeiten. Diese liefern über die reinen Fakten zum Verkehrsvolumen hinaus sehr genaue Informationen über die Standorttypen. Durch kombiniertes Filtern nach Standorttypen und Wechsel der Verkehrsrichtungen, können teilweise sogar aggregierte Wegeketten nachvollzogen werden. Abbildung 64 veranschaulicht dies anhand der einer Dreieckszelle innerhalb des Ortsteils Charlottenburg: Für den Zielverkehr wurden Einkaufsstandorte als Folge-Standorte festgelegt. Verfährt man bezüglich des Quellverkehrs genauso, kann analysiert werden, wo (räumlich und sachlich) sich Personen vor und nach dem Besuch eines Einkaufsstandortes in der Rasterzelle befinden.

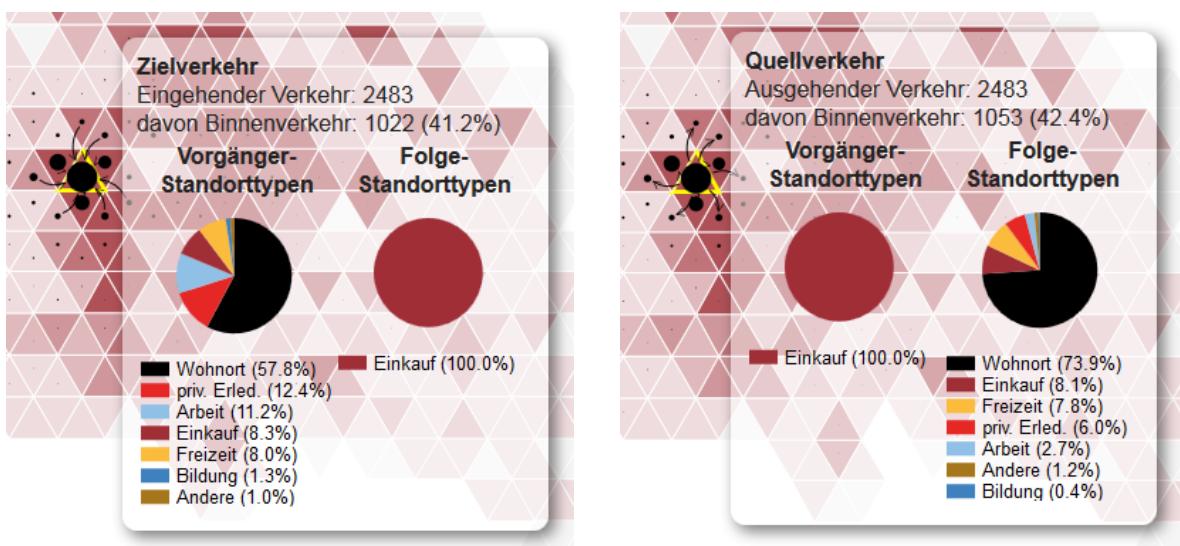


Abbildung 64: Nachvollziehen des Verlaufs aggregierter Wegeketten

Die Gestaltung beschränkt sich auf wenige, ausgewählte Mittel, so dass die Geovisualisierung stets übersichtlich bleibt. Durch den Einsatz von Kreisdiagrammen statt Bänderdiagrammen handelt es sich - streng genommen - nicht um eine Verkehrsstromkarte und die Abbildung von Verkehrsströmen. Stattdessen wird lediglich die Anzahl der Quellen oder Ziele einzelner Verkehrsströme dargestellt. Durch die Abbildung der zehn stärksten Verkehrsströme durch gerichtete Linien, assoziiert der Nutzer die Thematik jedoch sofort. Außerdem werden die gerichteten Linien auch auf die anderen Kreisdiagramme interpoliert, wodurch mental durchaus eine Verkehrsstromkarte entsteht.

Problematisch ist die notwendige Größe der Tooltip-Infobox. Diese benötigt aufgrund ihres Inhaltes so viel Platz, dass sie teilweise große Bereiche der Karte verdeckt. Zwar ermöglicht der halbtransparente Hintergrund der Infobox das Erkennen von dahinterliegenden Strukturen, konkrete Inhalte können jedoch nicht dargestellt werden. Eine Lösung des Problems bietet möglicherweise das verzögerte Öffnen der Infobox auf Basis eines Intervalls von bspw. fünf Sekunden oder eines Klicks. Um bei der Bedienung jedoch keine künstlichen Wartezeiten zu erzeugen und diese nicht zu aufwändig zu gestalten, wird das Problem vorerst toleriert.

Seitens der Implementierung bilden die enormen Speicheransprüche eine große Herausforderung. Diese ließen sich durch eine serverseitige ad-hoc-Berechnung lösen, was jedoch wiederum die Realisierung einer „flüssigen“ Bedienung erschwert. Als Erkenntnis ist also festzuhalten, dass ab einer Raumaufteilung von über 1.000 Einzelflächen der Einsatz von vorprozessierten Daten im JSON-Format sehr kritisch zu bewerten ist. In solchen Fällen empfiehlt es sich, besser auf eine komplexere Webclient-Webserver-Geodatenbank-Infrastruktur hinzuarbeiten.

3.6 Alle Individuen als animierte Punktkarte mit Dashboard

Die letzte Geovisualisierung soll die gesamte synthetische Bevölkerung während der gleichzeitigen Ausführung ihrer Aktivitäten abbilden. Diese Darstellung lehnt sich an den Thematischen Karten an, stellt aber die zeitliche Komponente stärker in den Vordergrund. Die Hauptzielgruppe der angestrebten Geovisualisierung bildet hierbei der fachfremde Nutzer, da diesem bislang noch keine Gesamtübersicht über globale Aktivitätenmuster (*Activity Patterns*) der synthetischen Bevölkerung bereitgestellt wurde.

Da sich Aktivitätenmuster innerhalb der Simulationsergebnisse nur ausgesprochen schwer identifizieren lassen, sollen zusätzlich auch Verkehrswissenschaftler und -modellierer von der Geovisualisierung profitieren können. Für diesen Nutzerkreis stellt sie ein Werkzeug zur visuellen Analyse der Aktivitätenmuster bereit, mit dem diese in einem konkreten raum-zeitlichen Kontext bestimmt werden können.

3.6.1 Umsetzung

Die Geovisualisierung der gesamten synthetischen Bevölkerung wurde als Animation umgesetzt, da durch diesen Kartentyp Zeitschnitte einer beliebigen Auflösung hintereinandergeschaltet werden können. Die recherchierten Beispiele haben auch erwiesen, dass sich Animationen für die Darstellung von Aktivitätenmustern eignen. Die realisierte Animation zeigt nun die genutzten Standorte, in denen sich die Personen zu einer bestimmten Uhrzeit befinden. Abgebildet wird der zeitliche Rahmen zwischen 0:00 Uhr und 24:00 Uhr, innerhalb von einer Minute. Die Standorte werden minutengenau wiedergegeben und nicht in einzelne Frames untergliedert - somit werden vier Zeitstunden innerhalb von zehn Animationssekunden dargestellt. Dabei bildet die Karte nicht alle 300.000 Personen gleichzeitig ab, sondern lediglich eine Stichprobe von 3.000, also einem Prozent der Gesamtpersonenanzahl. Durch zusätzliche Diagramme wird die Animation um eine Instrumententafel (*Dashboard*) erweitert. Abbildung 65 zeigt die Startansicht des animierten Dashboards.

Betrachtet man die Startansicht der umgesetzten Geovisualisierung, so befindet sich die Karte im zentralen Bereich des Webbrowsers, siehe Abbildung 65. Bei der Thematischen Karte im Hintergrund handelt es sich auch hier um die Bevölkerungsdichte auf Basis der Ortsteile. Auf der Karte sind außerdem die Standorte aller Personen zur Uhrzeit von 0 Uhr Mitternacht lokalisiert und nach ihrem Standorttyp eingefärbt. Zu erkennen ist hierbei, dass sich alle Personen an ihrem jeweiligen Wohnort befinden und diese sich erwartungsgemäß innerhalb der Ortsteile mit der höchsten Bevölkerungsdichte häufen.

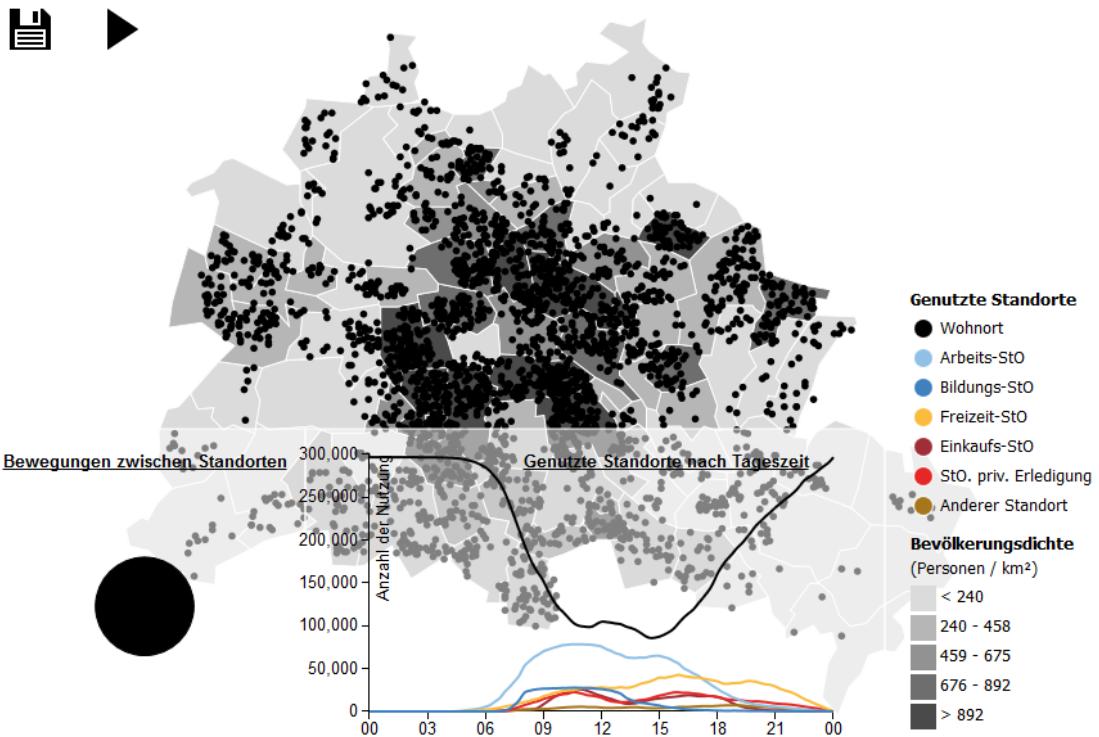


Abbildung 65: Startansicht des animierten Dashboards für eine Gesamtübersicht.
Um 0:00 Uhr Mitternacht befinden sich alle Personen am jeweiligen Wohnort.

Die erwähnten Diagramme sind im unteren Kartenbereich zwischen der linken Bildkante und der Legende platziert. Gezeigt werden zwei Diagramme: Die Bewegungen zwischen den Standorten als Netzdiagramm und die genutzten Standorte als Zeitreihe. Die Diagramme stellen immer die Informationen zur dargestellten Uhrzeit dar. Anhand dieser ist also ablesbar, dass sich alle Personen um 0 Uhr an ihren Wohnorten befinden. Die Zeitreihe kann als Darstellung der im Theorienteil in Abschnitt 2.3.1 erwähnten *Keyframes* angesehen werden. So lässt sich bereits dort erkennen, dass bspw. gegen 5:00 Uhr die ersten Personen ihren Wohnort verlassen, um 10:00 Uhr die meisten Arbeitsplatzstandorte besucht werden oder um 15:00 Uhr eine Vielzahl von Personen beginnt, ihren Wohnort aufzusuchen. Während die Karte nur eine Auswahl von Personen der synthetischen Bevölkerung beinhaltet, gehen in den Diagrammen die Statistiken der gesamten Bevölkerung ein.

Die Steuerelemente für die Animation sind im oberen linken Bereich positioniert. Durch Klicken auf das große *Abspiel*-Symbol, bestehend aus einem nach rechts gerichteten Dreieck, wird die Animation gestartet. Nachdem die Animation abzulaufen begonnen hat, ändert sich das *Abspiel*-Symbol in ein *Pause*-Symbol, bestehend aus zwei vertikalen Linien (siehe die folgenden Abbildungen). Die aktuelle Uhrzeit wird innerhalb der Zeitreihe als schwarzer „wandernder“ Strich dargestellt, womit die Uhrzeit mit der dargestellten Abbildung abgeglichen werden kann. Hat eine Punktsignatur zu Beginn der Animation noch die volle Deckkraft, wird diese im Verlauf der Zeit transparenter. Dies geschieht syn-

chron zur Aufenthaltszeit der Person am jeweiligen Standort, so dass diese schließlich unsichtbar ist, sobald sie sich nicht mehr am Standort aufhält. Verlässt eine Person also um 10:00 Uhr den Wohnort, hat die Punktsignatur um 5:00 Uhr nur noch die halbe Deckkraft und ist um 10:00 Uhr gänzlich transparent.

Sobald die Person einen neuen Standort erreicht, erscheint diese als neue Punktsignatur auf der Karte in Farbe des jeweiligen Standorttyps mit voller Deckkraft. Befindet sich die Person bspw. um 10:30 Uhr bis 15:00 Uhr an einem Arbeitsort, erscheint in den 26,25 Abspielsekunden der Animation ein hellblauer Punkt mit voller Deckkraft, der in Abspielsekunde 37,5 der Animation wieder verschwindet. Während die Person unterwegs ist (zwischen 10:00 Uhr und 10:30 Uhr bzw. zwischen den Abspielsekunden 25 und 26,25) wird die Person durch keine durch eine Punktsignatur repräsentiert.

Abbildung 66 zeigt die Gesamtsituation zum Zeitpunkt 6:00 Uhr morgens. Im Vergleich zu 0:00 Uhr in Abbildung 65 haben bereits einige Personen ihre Wohnorte verlassen. Andere weisen bereits eine sehr transparente Punktsignatur auf, werden also in Kürze ebenfalls von ihrem Wohnort aufbrechen. Eine weitere Gruppe hat schon ihre jeweiligen Arbeits- und Freizeitstandorte erreicht, ein Umstand, der in der Karte mittels voller Deckkraft dargestellt ist. Diese Informationen lassen sich ebenfalls an der Zeitreihe ablesen. Im Netzdigramm werden die Bewegungen zwischen den Standorten abgebildet. Die breite Verbindungsline zwischen dem großen schwarzen Kreis (viele Wohnorte) und dem kleinen hellblauen Kreis (wenige Arbeitsstandorte) zeigt, dass sich weitere Personen auf den Weg zu Arbeitsstandorten begeben haben. Ebenso befinden sich einige Personen auf dem Weg zu Freizeitstandorten (gelber Kreis) und anderen Standorten (brauner Kreis).

Die Gesamtsituation um 12:00 Uhr mittags ist in Abbildung 67 dargestellt. Hier halten sich zwei Drittel aller Personen außerhalb ihres Wohnortes auf. In der Karte überwiegen die Punktsignaturen der Einkaufsstandorte (rot), Standorte privater Erledigung (braun) und Arbeitsstandorte (hellblau). Dass die Arbeitsstandorte nicht überwiegen, obwohl sie zahlenmäßig überlegen sind, liegt in dem kurz bevorstehenden Ortswechsel begründet. Das Netzdigramm unten links offenbart außerdem, dass zur Mittagszeit kaum Bewegungen zu Arbeits- oder Bildungsstandorten hinführen oder von diesen ausgehen.

Die Situation am Abend um 18:00 Uhr zeigt Abbildung 68. Zu dieser Zeit befindet sich bereits über die Hälfte aller Personen am eigenen Wohnort, was in der Karte durch eine Dominanz der schwarzen Punktsignaturen sichtbar ist. Die Zeitreihe deutet an, dass dieser Anteil bis Mitternacht nahezu konstant anwachsen wird. Das Netzdigramm zeigt auch, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt die meisten Bewegungen nicht zu den Wohnorten, sondern zu den Freizeitstandorten führen.

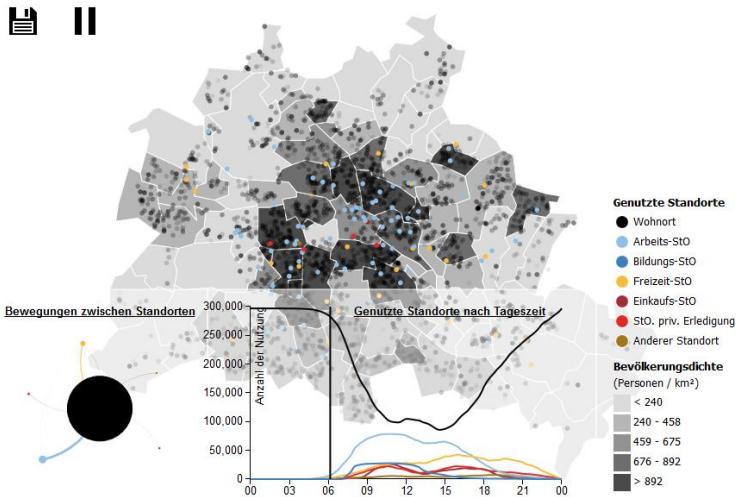


Abbildung 66: Gesamtsituation um 6:00 Uhr

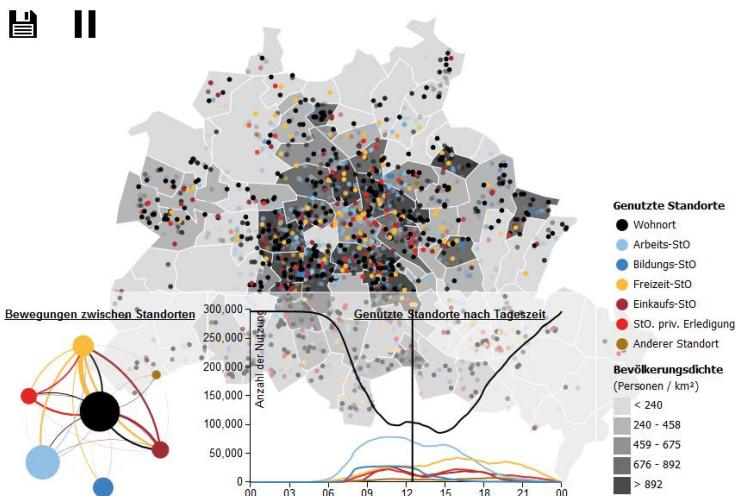


Abbildung 67: Gesamtsituation um 12:00 Uhr

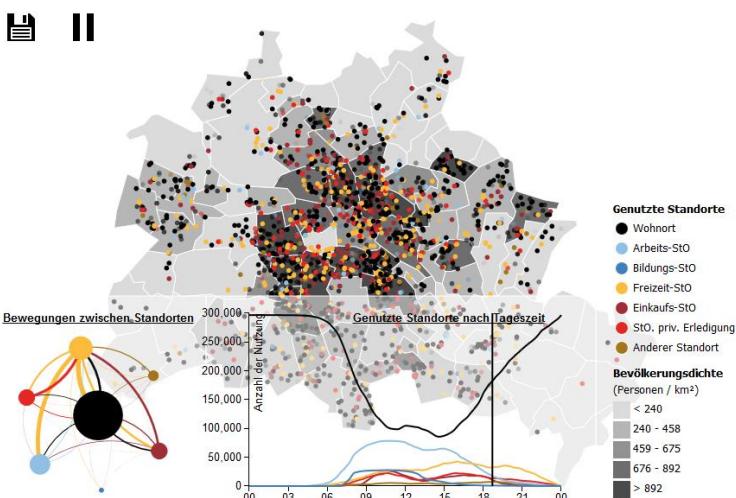


Abbildung 68: Gesamtsituation um 18:00 Uhr

Wurde die Animation durch Klick auf das Pause-Symbol angehalten, wird dieses durch ein Stopp-Symbol (Rechteck) ersetzt. Im pausierenden Zustand bewegt sich die Animation nicht mehr, so dass der gegenwärtig dargestellte Zeitpunkt in Ruhe vom Nutzer betrachtet werden kann. Durch erneutes Klicken auf das Stopp-Symbol wird der Anfangszustand wiederhergestellt, mittels des nun erscheinenden Abspiel-Symbols kann die Animation von neuem begonnen werden.

Die Karten-Navigationsfunktionen können auch hier stets genutzt werden, so dass bestimmte Kartebereiche durch den Nutzer fokussiert werden können. Zur Unterstützung der visuellen Analyse kann vor dem Starten der Animation, währenddessen oder im angehaltenen Zustand die ThematISCHE Karte im Hintergrund durch deren modalen Dialog angepasst werden. Beispielsweise ist es sinnvoll, die Nutzungsdichte der Freizeit- oder Einkaufsstandorte einzublenden, wenn der Untersuchungsfokus des Nutzers auf einem dieser Standorte liegt. Die Anzeige der TVZs oder eines hochauflösten Grids ist ebenfalls vorteilhaft, um bereits im Vorfeld zu prüfen, an welchen Regionen etwaige Punktsignaturen zu erwarten sind. In Abbildung 69 ist dies exemplarisch für den Freizeithotspot in Mitte dargestellt. Dabei erscheinen die meisten Punktsignaturen (fünf) um 9:00 Uhr morgens. Das Beispiel zeigt auch, dass sich die Punktsignaturen auch mit verringriger Deckkraft gut von den gleichfarbigen Flächensignaturen im Hintergrund abheben, so dass bspw. keine Kontur notwendig ist.

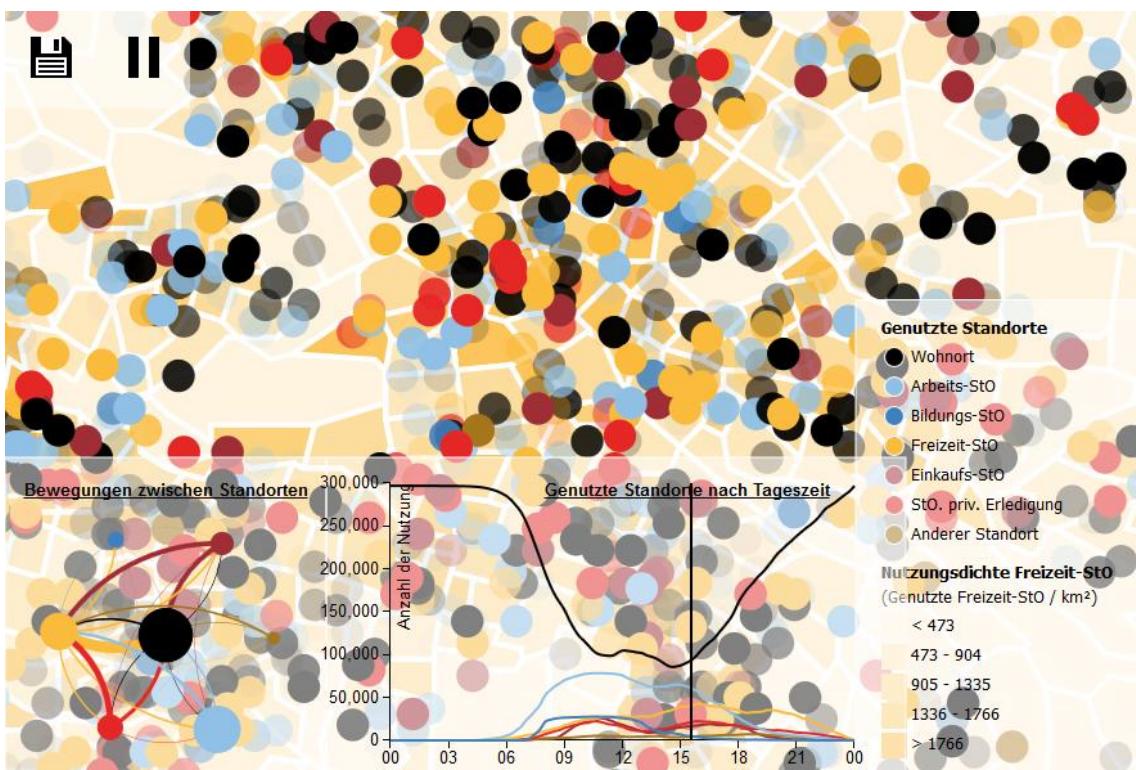


Abbildung 69: Gesamtsituation im Bereich Mitte um 15:30 Uhr morgens;
Im Hintergrund ist die Nutzungsdichte der Freizeit-Standorte auf Basis der TVZs eingestellt

3.6.2 Implementierung

Die vorliegende Kartenanimation ist kein klassisches Video, das aus mehreren hintereinander geschalteten Einzelbildern besteht. Diese Geovisualisierung wurde stattdessen durch die Animation der einzelnen Vektoren realisiert. Die größte Herausforderung stellte dabei die Optimierung der Laufzeitgeschwindigkeit sowie die Synchronisation aller einzelnen Vektoren dar.

Die Einbindung aller zur Verfügung stehenden 300.000 Tagespläne wurde bereits aus gestaltungstechnischen Gründen verworfen, da jeder einzelne Punkt im „Rauschen der Masse“ zwangsläufig untergehen würde. Im Zuge der Implementierungen wurde die Darstellung von 3.000 Tagesplänen empirisch als optimal ermittelt. Dabei musste die Auswahl dieser Untermenge durch echte Zufallsproben durchgeführt werden, da eine genaue Analyse der TAPAS-Ergebnisdaten ergab, dass Häufungen von Haushaltsgrößen und Personengruppen besonders am Anfang des listenartigen Tripfiles auftauchen. Die zufällige Selektion der Personen findet in der Filteringstufe innerhalb des GeoVis-Moduls im TAPAS-Analyzer statt.

Da hier nicht der Verkehr, sondern die Aufenthalte an Standorten betrachtet werden, können die Wegeketten in *Standortketten* überführt werden. Kernbestandteil der zu erzeugenden Darstellungsgeometrien sind lediglich die Koordinate, der Typ sowie Aufenthaltsbeginn, -dauer und -ende aller Standorte einer Standortkette. Dabei werden die Koordinaten analog zu den vorherigen Geovisualisierungen transformiert. Die Zeitangaben sind von vornherein in Minuten angegeben und können so beibehalten werden. Listing 7 zeigt wie Standortketten im JSON-Format abgespeichert werden können.

```
1  [
2    [
3      {"coordinate": [10,32], "type": "Wohnort", "startTime": 0, "endTime": 480},
4      {"coordinate": [8,40], "type": "Arbeits-St0", "startTime": 490, "endTime": 730},
5      {"coordinate": [9,32], "type": "Wohnort", "startTime": 745, "endTime": 1440}
6    ],
7    [
8      {"coordinate": [26,98], "type": "Wohnort", "startTime": 0, "endTime": 525},
9      {"coordinate": [45,64], "type": "Bildungs-St0", "startTime": 0, "endTime": 525},
9      ...
10   ],
11   ...
12 ]
```

Listing 7: Standortkette im JSON-Format

Zu der in Listing 7 abgebildeten Standortkette ist anzumerken, dass sich die Wohnort-Koordinaten in den Zeilen 3 und 5 bewusst unterscheiden. Grund dafür ist deren Manipulation aller Koordinaten um eine kleine zufällige Verschiebung (Jittering). Diese ist notwendig, da es Überlagerungen gibt, die bereits durch die EDA in Abschnitt 3.1 aufgedeckt wurden. Neben den Bildungs-Standorten sind auch

die Koordinaten der Wohnorte betroffen, da sich mehrere Personen eines Haushalts gleichzeitig auf einer Koordinate befinden können. Diese werden durch Punktsignaturen dargestellt und könnten im Falle einer Überlagerung vom Betrachter nicht quantitativ erfasst werden. Außerdem würden die Transparenzen sich summieren und falsche Sachverhalte darstellen. Durch ein Jittering innerhalb eines Durchmessers von 235m bzw. fünf Pixeln, können alle gleichzeitigen Nutzungen eines Standortes zuverlässig dargestellt werden. Das Jittering erfolgt in der Filteringstufe im Rahmen der Vorprozessierung der Geometriedaten.

Animationen lassen sich durch eigene Elemente direkt in ein SVG-Dokument einbetten. Dabei stehen die Elemente *animateColor* für dynamische Farbverläufe, *animateTransform* für Rotations- und Skalierungsanimationen und *animateMotion* für Bewegungsanimationen entlang eines Pfades zur Verfügung (W3C 2011a). Durch die JavaScript-Bibliothek D3 werden diese Elemente jedoch nicht dynamisch erzeugt oder manipuliert. D3 bearbeitet die Koordinaten der Vektor-Elemente durch konfigurierte Übergänge (*Transitions*) direkt (Bostock 2014). Mittels Transitions wurden bereits die Geometrieänderungen bei der 3D-Navigation der Raum-Zeit-Pfade in Abschnitt 3.4 implementiert, ebenso die Größenänderungen der Kreisdiagramme zu den Verkehrsströmen in Abschnitt 3.5.

Im Falle der Animation müssen die jeweiligen Punktsignaturen zu einem definierten Zeitpunkt erscheinen, innerhalb einer definierten Zeitspanne transparent werden und sich schließlich zu einem definierten Zeitpunkt auflösen. Der einfachste Implementierungsweg ist hierbei die Erzeugung aller Punktsignaturen beim initialen Start der Geovisualisierung. Diese können dann durch ihre definierten Zeiten eingeblendet und ausgeblendet werden. In Listing 8 ist dies exemplarisch dargestellt.

In Zeile 2 wird die Maßstabszahl berechnet, um 1440min auf 60s bzw. 60.000ms, abzubilden. Die einzelnen Standortketten werden durch die Zeilen 5, 6 und 7 zu SVG-Gruppen-Elementen zusammengefasst. Innerhalb der Gruppen werden die einzelnen Punktsignaturen erzeugt, was in den Zeilen 10 bis 17 geschieht. Die Bestimmung der Farbe geschieht in Zeile 17 durch die Methode *getLocationColor()*, die an dieser Stelle nicht weiter beschrieben werden soll. In der darauffolgenden Zeile wird die Deckkraft (*Opacity*) definiert. Handelt es sich dabei um den Aufenthaltsort um 0:00 Uhr, besitzt dieser die volle Farbintensität, andernfalls nicht.

Das zeitverzögerte Einblenden beginnt in Zeile 25, in welcher durch *transition()* ein fließender Übergang registriert wird. Durch *delay()* in der darauffolgenden Zeile wird die Verzögerung des Einblendens definiert. Die Definition von *duration(0)* in Zeile 27 deaktiviert eine Übergangsduer und bewirkt das sofortige Umschalten auf die volle Deckkraft nach Ablauf der Einblendeverzögerung.

Da ein Vektor nur mit einer einzigen Transition belegt sein kann, muss das langsame Ausblenden der Punktsignatur nach dessen Einblendung ausgelöst werden. Dies geschieht in Zeile 29, wo durch

`each("end")` das Verhalten nach Ablauf einer Transition, also nach Ablauf von `delay` und `duration` beschrieben werden kann. Das langsame Ausblenden wird dann in den Zeilen 33 bis 36 durch `delay(0)` sofort ausgelöst und über `duration()` auf die Dauer des Aufenthaltes ausgedehnt. Zu beachten ist die Festlegung auf eine *lineare Beschleunigungsfunktion* (easing function), die in Zeile 37 definiert ist. Grund dafür ist, dass in D3 eine quadratische Beschleunigungsfunktion voreingestellt ist.

```

1 //Zeit-Massstab berechnen
2 var timeScale = (60 / 1440) * 1000;
3 //Erstellen der einzelnen Standortketten als Gruppen-Element
4 d3.select("svg").selectAll("g")
5   .data([locationChain])
6   .enter()
7   .append("g");
8   .each(function(g){
9     //Erstellen der einzelnen Standorte als Kreis-Element
10    d3.select(this).selectAll("circle")
11      .data(g.data)
12      .enter()
13      .append("circle")
14      .attr("cx", function(d){return d.coordinate[0]})
15      .attr("cy", function(d){return d.coordinate[0]})
16      .attr("r", 5);
17      .style("fill", function(d){return getLocationColor(d.type)})
18      .style("fill-opacity", function(d){
19        //Bestimmen der initialen Sichtbarkeit
20        if(d.startTime == 0){
21          return 1;
22        }
23        return 0;
24      })
25      .transition()//Zeitverzögertes Erscheinen
26      .delay(function(d){return d.von * timeScale;})
27      .duration(0)
28      .style("fill-opacity", 1)
29      .each("end", function(){
30        //Nach dem Erscheinen langsam unsichtbar werden
31        d3.select(this)
32          .transition()
33          .delay(0)
34          .duration(function(d){
35            return (d.endTime-d.startTime) * timeScale;
36          })
37          .ease("linear")
38          .style("fill-opacity",0);
39      });
40 });

```

Listing 8: Erzeugen aller Punktsignaturen mit verzögerter Ein- und Ausblendung

Das große Problem ist hierbei, dass zu viele Punktsignaturen entstehen, die überdies mit Transitionen belegt sind. Aus einer durchschnittlichen Anzahl von 4,7 Trips (vergleiche Abschnitt 3.1) und der Einbeziehung des Wohnortes zu Tagesbeginn, resultiert eine durchschnittliche Anzahl von 5,7 Standorten. Das führt zu 17.100 Punktsignaturen im SVG-Dokument mit jeweils einer Transition, bewirkt aufgrund der vielen Berechnungsschritte allerdings eine eher holprige Animationsdarstellung. Darum

wurde die obige Implementierung so angepasst, dass nur die Punktsignaturen im SVG-Dokument eingebunden sind, die durch ihre zeitlichen Grenzen zur dargestellten Szene gehören.

In der finalen Implementierung existiert nur eine Punktsignatur je Standortkette, die zu Beginn selbstverständlich am Wohnort lokalisiert ist. Nach dem diese Punktsignatur ausgeblendet wurde, wird sie auf die Position des nächsten Standorts verschoben, nach Standorttyp eingefärbt und mit der entsprechenden Verzögerung von $\text{startTime}_{\text{Folge-Standort}} - \text{endTime}_{\text{Vorgänger-Standort}}$ eingeblendet. Dieses Verfahren wird immer weiter fortgeführt, so dass sich eine konstante Anzahl von 3.000 Punktsignaturen im SVG-Dokument befindet.

3.6.3 Ergebnisse

Die Gesamtsituation der räumlichen, zeitlichen sowie sachlichen Inhalte kann bereits beim ersten Betrachten der Animation grundlegend erfasst werden. Für detailliertere Erkenntnisse ist eine mehrmalige Betrachtung der Animation notwendig. Für den Betrachter beginnt ein Tag in der Regel um 6:00 Uhr, geht in Arbeits-, Bildungs- und Einkaufsaktivitäten auf deren Standorte über und endet ab 15:00 Uhr in Übergängen zu Freizeitaktivitäten.

Die Anreicherung der Animation durch die Zeitreihe ist besonders wichtig, weil dadurch die Häufungen nicht mehr zwingend über die Karte abgebildet werden müssen. Außerdem ist sie ideal zum Ablesen von Key Frames geeignet. Erst dadurch können die Punktsignaturen mit einer dynamischen Deckkraft belegt werden, wodurch sich bald Aufenthalte an Standorten ablesen lassen.

Das Netzdigramm ist dagegen fast ausschließlich für Verkehrswissenschaftler interessant. Die darin enthaltenen Informationen über die Bewegungen zwischen den Standorttypen bieten sehr interessante Aufschlüsse.

Die verkettete Start-Pause-Stopp-Funktion ist für den Nutzer wenig intuitiv und in der Bedienung nicht optimal gelöst. Die Animationssteuerung von Vektordaten gestaltet sich ausgesprochen kompliziert - so müssen die vielen parallel verlaufenden Animationen jeweils einzeln gestoppt werden. Dazu gehören alle einzelnen 3.000 Punktsignaturen, alle 49 Elemente des Netzdigramms (sieben Kreise und 42 Verbindungslien) und der Zeiger auf der Zeitreihe. Zu Standardfunktionen von Kartenanimationen gehört außerdem eine flexible Geschwindigkeitsregelung, durch welche die Animation verlangsamt oder beschleunigt werden kann und das Definieren einer bestimmten Abspielsequenz auf der Zeitskala. Diese konnten leider nicht implementiert werden, da die notwendigen Aufwände die angestrebte, lediglich prototypisch angelegte Implementierung wesentlich überschreitet.

3.7 Betrachtung von Laufzeiten und Geschwindigkeiten

Bei der Implementierung der Umsetzungen ist stets darauf zu achten, dass es nicht zu Speicherüberläufen kommt. In einem solchen Fall würde das laufende Programm zwangsweise beendet und die Datenaufbereitung unterbrochen werden. Zwar ist es möglich, den Anspruch an Speicherplatz für Java-Programme festzulegen, doch auch dieser kann physisch aufgebraucht werden. Speicherüberläufe entstehen, wenn zu viele Objekte in gleichzeitig verarbeitet oder zu große Dateien eingeladen werden. Um dem entgegenzuwirken, wird jeder Trip der Eingangsdaten durch den TAPAS-Analyzer zeilenweise eingelesen und in dieser Form an alle Module weitergeleitet.

Besonders relevant wurde dies bei der Erstellung der Fahrtenmatrizen in Abschnitt 3.5.2. Dafür musste eine Persistenzschicht implementiert werden, welche Zwischenergebnisse vom Hauptspeicher auf den Festplattenspeicher überführt, damit der Hauptspeicher freigegeben werden kann. Ist der Hauptspeicher erneut auf ein kritisches Volumen gestiegen, wird die Fahrtenmatrix selektiv mit der auf der Festplatte abgelegten synchronisiert. Die Fahrtenmatrizen der 12 verschiedenen Gebietsunterteilungen nehmen zusammen ein Speichervolumen von knapp 100 MB in Anspruch. Im Hauptspeicher wären es jedoch mehrere Gigabyte, weil jeder einzelne Schlüssel und Wert intern in Datentypen überführt würde, von denen jeder mindestens 16 Bytes im Hauptspeicher beansprucht (Vorontsov 2014).

Die Geometriedaten, die in der Filteringstufe erzeugt werden, haben ein Gesamtvolumen von 9,8 GB. Die Raum-Zeit-Pfade nehmen davon bereits ganze 9,7 GB ein und stellen ebenfalls besondere Ansprüche an die Datenprozessierung. So ist im Falle der Raum-Zeit-Pfade eine Trennung von Attribut- und Geometriedaten in verschiedene Dateien, wie sie bei den Hintergrunddaten in Abschnitt 3.3.2 durchgeführt wurde, nicht empfehlenswert. Ausschlaggebender Grund dafür ist, dass ein durchschnittlicher Tagesplan aus lediglich neun Segmenten besteht (drei Hausaufenthalte, vier Bewegungen und zwei Außerhausaufenthalte) und somit nur 18 3D-Koordinatenpaare aufweist. Die 32 Dateien würden dadurch ein jeweiliges Datenvolumen von ca. 300 Bytes besitzen. Heutige Festplatten sind jedoch auf große Dateien optimiert und daher in 4 Kilobyte (1kB = 1024Byte) große Speicherblöcke unterteilt, was als Mindestspeichergröße anzusehen ist (Microsoft 2013). Darin passen rechnerisch ca. 55 Geometriedateien, welche architekturbedingt aber einen 128kB großen physischen Speicherplatz auf der Festplatte beanspruchen. Aus diesem Grund wurden die Attributdaten mit allen 32 Geometrien in eine einzelne JSON-Datei zusammengeführt, was zu einer durchschnittlichen Dateigröße von 34kB führt.

Beim Schreiben der Raum-Zeit-Pfade muss eine weitere Besonderheit der Festplattenarchitektur beachtet werden. Intern verwaltet eine Festplatte die Speicheradressen (den ersten genutzten Speicherblock) von Dateien und Unterordnern eines bestimmten Ordners in einer Liste. Diese ist eindimensional und wächst mit der Anzahl von Dateien und Unterordnern mit. Sobald sich zu viele Dateien und Unterordner in einem Ordner befinden, beginnt diese Liste zu fragmentieren, was enorme Zugriffsverzögerungen nach sich zieht (Microsoft 2003). Um dies zu vermeiden, ist es nötig, die Dateien der Raum-Zeit-Pfade in eine künstliche Baumstruktur zu unterteilen. Dies wurde durch eine Unterteilung der siebenstelligen Haushalts-ID implementiert

Die vielen tausend Schreibzugriffe auf die Festplatte konnten durch gezielte Pufferungen (Buffering) erheblich beschleunigt werden. Es gelang, Lesezugriffe auf die Shapefiles durch interne Proxys zu optimieren. Viele Optimierungsmöglichkeiten wurden bei der Implementierung der CONTAINS-Anweisungen durchgeführt, bei denen geprüft wird, in welchen Ortsteilen oder Zellen sich ein Standort befindet. Zum einen wurde für jedes Shapefile ein Quadtree erzeugt, durch den ein räumlicher Index bereit steht, über den CONTAINS-Anweisungen wesentlich schneller bearbeitet werden können. Außerdem ist es möglich, Mehrfachprüfungen zu vermeiden, die durch das in Abschnitt 3.1 beschriebene zyklische Mobilitätsverhalten entstehen, indem die letzten zehn geprüften Standortkoordinaten zusammen mit dem Resultat der CONTAINS-Ergebnisse in einen Zwischenspeicher (Cache) abgelegt werden. Die Prozessierung der Verkehrsströme konnte somit um ein Vierfaches beschleunigt werden.

Die folgenden Diagramme in Abbildung 70 zeigen die Laufzeiten und Geschwindigkeiten der einzelnen Module in Abhängigkeit zur Größe des zu bearbeitenden Datensatzes. Bei Betrachtung der Laufzeit zeigt sich, dass die grundlegende Datenprozessierung den geringsten Anteil beansprucht. Darin enthalten ist das Lesen der einzelnen Trips aus der Datenbank und deren Zusammenfügen zu Personen und Haushalten. Die Laufzeit der grundlegenden Datenprozessierung wurde bei den Zeitmessungen der anderen Module nicht erneut einbezogen. Die Prozessierung der 300.000 Raum-Zeit-Pfade erfolgt innerhalb von 40 Minuten und ist maßgeblich von der Geschwindigkeit der Festplatte abhängig. Das wird vor allem dadurch verdeutlicht, dass das Löschen der 300.000 Dateien etwa genauso viel Zeit in Anspruch nimmt. Die Berechnung der Hintergrunddaten benötigt etwas über einer dreiviertel Stunde. Am zeitaufwändigsten ist die Prozessierung der Verkehrsströme. Hierbei ist ein beschränkt wachsender Zeitbedarf abzulesen. Wenig bedeutsam hingegen ist die Laufzeit des Kartenanimationsmoduls, da, unabhängig von der Anzahl der zu verarbeitenden Personen, immer 3.000 per Zufall ausgewählte Individuen bearbeitet werden müssen.

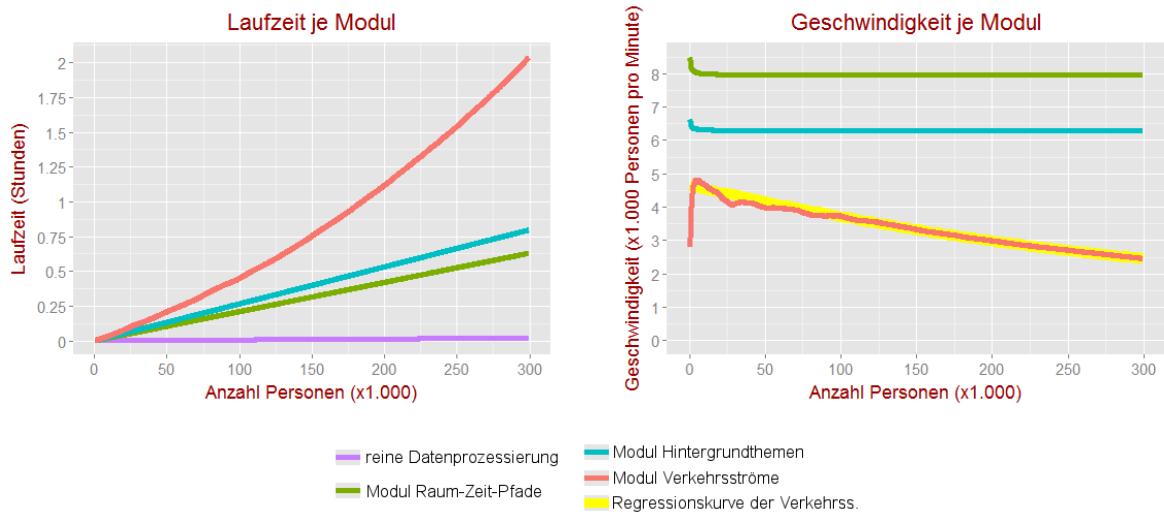


Abbildung 70: Laufzeit und Geschwindigkeit der einzelnen Module in Abhängigkeit des Datenvolumens (Anzahl von Personen)

Aussagekräftiger ist die Betrachtung der Geschwindigkeitsveränderungen im rechten Diagramm von Abbildung 70. Es lässt erkennen, dass die Verarbeitung der Raum-Zeit-Pfade und Hintergrunddaten unabhängig von der Anzahl der zu verarbeitenden Personen konstant bleibt – also skalierbar ist. Weniger gut skaliert die Prozessierung der Verkehrsflüsse, da sie sich mit steigender Zahl von Personen verlangsamt. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Matrizen als Bäume umgesetzt werden, in denen nur die Quellstandorttyp-Zielstandorttyp-Quellzelle-Zielzelle-Einträge registriert werden, die auch wirklich vorhanden sind. Deren Anzahl steigt zu Beginn der Prozessierung rasant an, nimmt im späteren Verlauf aber nur noch langsam zu. Somit wachsen die oben beschriebenen persistent abgelegten Verkehrsmatrizen mit zunehmend sinkender Geschwindigkeit an und benötigen mehr Zeit für die Synchronisation. Sobald alle Standorttypen und Zonen einmalig miteinander verbunden sind, wäre die Geschwindigkeit konstant.

Für die genauere Untersuchung wurde hierzu eine Regressionsanalyse des Geschwindigkeitsverlaufs im Statistikprogramm R vorgenommen. Identifiziert wurde die quadratische Funktion $4,665382 - 0,01045248x + 0,00001040174x^2$ deren Verlauf im rechten Diagramm gelb dargestellt ist. Sollten die oben beschriebenen Zusammenhänge mit der Regressionsfunktion übereinstimmen, würde die langsamste Geschwindigkeit mit 2.039 Personen pro Minute bei 502.492 Personen erreicht werden.

4 Ergebnisse

Grund für die durchgeführte theoretische Aufarbeitung und praktische Umsetzung der interaktiven Geovisualisierungen waren Forschungsfragen, die in der Einleitung in Abschnitt 1 gestellt wurden. Diese waren theoretischer und praktischer Natur und können nun beantwortet werden.

Die wichtigsten Ansprüche an Geovisualisierungen sind die Validierung und Plausibilisierung der Ergebnisdaten seitens der Verkehrsforcher und eine Ergebniskommunikation an externe Fachleute und außenstehende Nicht-Fachleute. Außerdem rückt durch die entstehenden Möglichkeiten der visuellen Analyse immer mehr der Anspruch der Erkenntnisgewinnung in den Vordergrund. Da es für diese vielseitigen Ansprüche kein „one fits all“-VIS gibt und das TAPAS-Verkehrsmodell spezielle Aspekte der Verkehrsmodellierung betont, wurde sich für die Eigenentwicklung von individuell zugeschnittenen interaktiven Geovisualisierungen entschieden. Durch die automatisierte Erzeugung der Geovisualisierungen innerhalb des TAPAS-Analyzers wurde die Hürde der notwendigen Fachkenntnis genommen – die fertigen Karten werden automatisch generiert, auf der Festplatte abgelegt und können genutzt werden.

Umgesetzt wurde dabei ein Kartentyp je Aggregationsstufe. Im Ergebnis sind drei interaktive Geovisualisierungen entstanden, die vollkommen unterschiedliche Sachverhalte darstellen und sich in einem hohen Maß ergänzen: 3D Raum-Zeit-Pfade für einzelne Individuen, Verkehrsströme für aggregierte Individuen und eine Kartenanimation als Dashboard für alle Individuen. Durch die bewusste Reduzierung der gestalterischen Ausdrucksmittel bestechen diese Geovisualisierungen durch eine hohe Leseeffizienz. Sie können von Außenstehenden und Fachleuten gleichermaßen genutzt werden und bedienen die Ansprüche beider Zielgruppen. Gleichzeitig werden innerhalb der Geovisualisierungen viele Möglichkeiten für die interaktive Manipulation der Kartenausschnitte und dargestellten Informationen angeboten, durch die visuelle Analysen durchgeführt werden können.

Bei der Festlegung auf eine Visualisierungstechnik wurde sich für die Web-Visualisierungstechnik SVG entschieden, da eine mögliche Weiterverarbeitung durch ein Standard-VIS als wesentlicher Vorteil angesehen wurde. Dennoch wird großer Wert darauf gelegt, die Web-Visualisierungen auch offline darstellen zu können, um unabhängig von aufwändig zu wartenden Serverkomponenten zu sein. Dabei ist es ohne nennenswerte Umstände möglich, die Geovisualisierungen auf einen öffentlichen Webserver zu verschieben und somit einem breiteren Publikum zur Verfügung zu stehen.

Die eigentliche Stärke der umgesetzten Geovisualisierungen ist jedoch die Exportfunktion, welche die gegenwärtige Sicht im SVG-Format auf der Festplatte speichert. Die gespeicherten Vektordaten werden dadurch zu einer Kartenvorstufe, die durch ein beliebiges Standard-VIS veredelt werden können. Dadurch ist es den Verkehrsforchern möglich, die Karte für einzelne Publikationen, Poster oder Prä-

sentationen nochmals zu Individualisieren und bspw. besondere Aspekte stärker hervorzuheben oder zu reduzieren, Legendenanpassungen vorzunehmen, Strichstärken oder Signaturen anzupassen etc.

Als besondere Herausforderung bei der Umsetzung muss die Einarbeitung in die Ergebnisdaten genannt werden, welche die umfangreiche EDA in Abschnitt 3.1 begründet. Der intensive Austausch mit den Verkehrsforschern war notwendig, um Phänomene wie bspw. fünfminütige Aufenthalte, teilweise sehr hohe Durchschnittsgeschwindigkeiten sowie zeitliche Lücken zwischen dem Ende einer Aktivität und dem Start einer neuen Bewegung zu erklären. Technisch aufwändig gestaltete sich vor allem die Gewährleistung eines skalierbaren Systems, in dem auch große Datensätze verarbeitet werden können. Dafür musste das klassische Einlesen-Verarbeiten-Ausgeben-Prinzip (EVA) um eine Persistenzschicht erweitert werden, um Speicherüberläufe zu vermeiden (Starke 2014).

Die umgesetzten Geovisualisierungen werden bereits angewendet. So sind sie Teil eines Posters, das innerhalb des Instituts aushängt und das TAPAS-Verkehrsmodell vorstellt. Es ist in Anhang E abgebildet. Die darin eingebetteten Geovisualisierungen stammen noch aus einem frühen Arbeitsstand, was die Unterschiede zu den gegenwärtigen Umsetzungen erklärt. Durch die Exportfunktion war es möglich, die Beschriftung und Anordnung der Legende und Diagramme durch das VIS Inkscape anzupassen. Darüber hinaus werden die interaktiven Geovisualisierungen eingesetzt, um im Rahmen von Lehrveranstaltungen und Workshops am Institut für Geographie der HU-Berlin die Ergebnisdaten des TAPAS-Verkehrsmodells zu veranschaulichen. Insofern wurde den Ansprüchen der Ergebniskommunikation bereits Genüge getan.

5 Diskussion und Ausblick

Da das TAPAS-Verkehrsmodell bisweilen über keine ausgereiften geographischen Visualisierungssätze verfügte, war die grundlegende Recherche der möglichen Kartentypen und vorhandenen Nutzergruppen notwendig. Die Identifikation der drei Perspektiven auf die Verkehrsdaten, die sich durch die drei Aggregationsstufen der Individuen ergaben, führte dazu, dass die Umsetzung aller drei ausgewählten Kartentypen sinnvoll ist.

Bei der Umsetzung der Geovisualisierung trat die methodische Besonderheit auf, dass zwar geeignete Kartentypen gefunden werden konnten, jedoch deren konkrete Ausarbeitung weiterhin ergebnisoffen waren. Dadurch war ein agiles Projektmanagement notwendig, um auf Änderungen flexibel reagieren zu können (Pichler 2008). Darüber hinaus mussten generische Implementierungsverfahren eingesetzt werden, damit auch Detailänderungen ohne größere Mehraufwände eingearbeitet werden konnten. Nur so konnte die technische Durchführbarkeit geprüft und an der Konkretisierung der Kartentypen parallel ausgearbeitet werden. Durch eine genaue Vorgabe der Visualisierungsziele im Stile eines klassischen Pflichtenheftes hätte sich die Umsetzung wesentlich schneller gestaltet.

Bereits bei der Präsentation von Zwischenergebnissen im Kolloquium der Universität und am DLR ergaben sich viele Ideen zum Ausbau der vorlegenden Umsetzungen, wie bspw. Mehrsprachigkeit, Export der Geometriedaten im KML-Format und die Integration weiterer Filter- bzw. Highlightfunktionen. Thematisch gibt es auch Interesse für einen Ausbau auf Schwerpunkte des Wirtschaftsverkehrs.

Außerdem könnte die Laufzeitgeschwindigkeit innerhalb der Filteringstufe und der Renderingstufe optimiert werden. Wie die Untersuchung in Abschnitt 3.7 zeigt, sollte damit bei der Prozessierung der CONTAINS-Anweisungen angesetzt werden. Denkbar wäre dabei die Arbeit mit räumlichen DBMS wie PostGIS, in denen räumliche Abfragen sehr viel schneller abgearbeitet werden können als durch ein iteriertes Prüfen einzelner Shapefiles durch die Geotools. Außerdem ist die Ermöglichung einer Offline-Darstellung zu überdenken. Die Bereitstellung eines Webservers mit Anbindung zur Datenbank würde eine Vorprozessierung der Geometriedaten erübrigen. Dadurch müssten jedoch höhere Latenzen bei der Darstellung in Kauf genommen werden.

Seitens der Laufzeitgeschwindigkeit in der Renderingstufe könnte die Festlegung auf SVG nocheinmal überdacht werden. Gerade in der Kartenanimation stößt diese Visualisierungstechnik an ihre Grenzen. Dem Plus an Laufzeitgeschwindigkeit durch den Einsatz von WebGL und Canvas stehen allerdings aufwändigere Entwicklungsarbeiten und der Verzicht auf SVG gegenüber.

Weitere Ausbaumöglichkeiten bietet die Kopplung der derzeit alleinstehenden Geovisualisierungen. Denkbar ist dabei das Filtern aller Tagespläne, die Teil eines gerade betrachteten Verkehrsflusses sind, für die Betrachtung als Raum-Zeit-Pfad oder Kartenanimation. Genauso könnten mittels des Netzdiagramms der Kartenanimation gezielt Tagespläne gefiltert werden, die gerade auf dem Weg zu einem bestimmten Standort sind oder sich bereits an einem aufhalten. Genauso könnte ein Filtern über den Raumzeitpfad funktionieren: Filtere alle Tagespläne, die sich gleichzeitig an einem bestimmten Standort befinden und stelle sie in Verkehrsflüssen oder als Kartenanimation dar. Für diese Ausbauvarianten sollte jedoch auf eine professionelle Web-Architektur mit DBMS-Anbindung gesetzt werden.

Innerhalb der Verkehrsströmungs-Visualisierung zeigt die Tooltip-Infobox derzeit nur die Informationen einer bestimmten Verkehrszelle an. Interessant ist allerdings auch eine detailliertere Analyse der jeweiligen Ziele oder Quellen. Notwendig ist auch ein stärkeres Betonen der zeitlichen Komponente. Dies könnte im einfachsten Fall durch Zeitreihen in der Tooltip-Infobox realisiert werden, in der steht, wann die Personen einen den Ortsteil verlassen oder – im Falle des Zielverkehrs – wann sie diesen erreichen.

Innerhalb der Kartenanimation wurde derzeit bewusst auf Tooltip-Infoxboxen verzichtet, weil diese sehr viel Unruhe erzeugen und das Lesen der Karteninformationen stören. Es ist aber denkbar, auch diese in einer bestimmten Art und Weise noch zu integrieren. Sehr wichtig ist auch eine Highlight- bzw Filterfunktion, mit dessen Hilfe sich besser auf die Betrachtung einzelner Standorttypen konzentriert werden kann. Denkbar ist auch, das Dashboard zu erweitern. Auf diese Weise können neben der Standortauslastung bspw. auch die Nutzung einzelner Modi, deren Durchschnittsgeschwindigkeiten oder die durchschnittliche Aufenthaltsdauer an Standorten durch Diagramme abgebildet werden. Ein letzter Erweiterungsvorschlag betrifft das Netzdiagramm. Bei diesem wird das Volumen an sich bewegenden Personen nur durch die Strichstärke der Verbindungslien dargestellt, eine natürlichere Darstellungsart wäre ein gerichtetes Pulsieren von Ovalen zwischen den einzelnen Standorten. Die Größe und Form des Ovals entspräche dabei der zeitlichen Streuung, die Geschwindigkeit des Ovals richtet sich nach der Durchschnittsgeschwindigkeit.

Wie die Erweiterung der Exportfunktionen, könnten auch die Importfunktionen umgestaltet werden. Denkbar ist dabei ein eigener Importassistent, durch welchen Ergebnisdaten aus anderen Verkehrs-simulationen hochgeladen werden. Signaturen und Inhalte der Tooltip-Infoxboxen könnten durch einfach zu bedienende Schritt-für-Schritt-Assistenten personalisiert werden. Darauf aufbauend können weitere Eingabeformate ermöglicht werden, wie bspw. MATSim.

6 Referenzen

- AG, P.P.T.V., 2012. *VISSIM 5.40 Benutzerhandbuch*, Karlsruhe: epubli. Available at: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=DoyZb11AKjkC&oi=fnd&pg=PA17&dq=VISSIM+5.40+Benutzerhandbuch&ots=ep69MWq7DR&sig=Bavblb9B3ZgG8etLMqXM1CX3BNw> [Accessed July 10, 2014].
- Aistleitner, J., 2009. Der Tirol Atlas - Stand und Weiterentwicklung eines modernen, länderübergreifenden Regionalatlas. *Kartographische Nachrichten*, 1(2).
- Andrienko, N. et al., 2002. Testing the Usability of Interactive Maps in CommonGIS. *Cartography and Geographic Information Science*, 29(4).
- Angerer, F. & Hadler, G., 2005. Folgen und Wirkungen des Verkehrs. In G. Steierwald & H.-D. Künne, eds. *Stadtverkehrsplanung: Grundlagen, Methoden, Ziele*. Berlin: Springer.
- Apetri, M., 2010. *3D-Grafik mit OpenGL*, Heidelberg: mitp.
- Balmer, M., 2011. Learning MATSim in 8 Lessons - Looking at the Output. Available at: <http://www.matsim.org/docs/tutorials/8lessons/output>.
- Batty, M. et al., 2013. *Visualising Spatial and Social Media*,
- Bertin, J., 1974. *Graphische Semioleologie : Diagramme, Netze, Karten*, Berlin: de Gruyter.
- Bostock, M., 2014. Transitions. Available at: <https://github.com/mbostock/d3/wiki/Transitions> [Accessed June 28, 2014].
- Bourguignon, S., 2014. Do GIS Professionals Need a Developer Toolkit? Available at: <http://blogs.esri.com/esri/erstrainingmatters/2012/03/08/do-gis-professionals-need-a-developer-toolkit/> [Accessed July 10, 2014].
- Brewer, C.A., 2006. Basic Mapping Principles for Visualizing Cancer Data Using Geographic Information Systems (GIS). *American Journal of Preventive Medicine*, 30(2 Suppl).
- Caliper, 2008. *Caliper TransCAD Transportation Planning Software*, Newton.
- Carr, A., 2013a. Foursquare Data Viz Shows The Pulse Of New York, London, Tokyo. Available at: <http://www.fastcodesign.com/3018574/infographic-of-the-day/foursquare-data-viz-shows-the-pulse-of-london-chicago-tokyo> [Accessed June 29, 2014].
- Carr, A., 2013b. Foursquare Data Viz Shows The Pulse Of New York, London, Tokyo.
- Collin, H.-J., 2005. Erhebungen zur Verkehrsnachfrage. In G. Steierwald & H.-D. Künne, eds. *Stadtverkehrsplanung: Grundlagen, Methoden, Ziele*. Berlin: Springer.
- Cyganski, R. & Justen, A., 2007. Maßnahmensensitive Nachfragemodellierung in mikroskopischen Personenverkehrsmodellen. In *DVWG Jahresband 2007: Ausgewählte Beiträge der zentralen wissenschaftlichen Veranstaltungen (B 314)*. Karlsruhe: Deutsche Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft e.V. Available at:

http://www.dlr.de/Portaldata/12/Resources/dokumente/projekte/tapas/DVWG-Langfassung_Cyganski_Justen.pdf.

DeMers, M.N., 2002. *GIS modeling in Raster*, New York: John Wiley & Sons, Inc.

Dijkstra, E.W., 1959. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), pp.269–271.

Doina, K.S.Y. & Chor, C.H., 2009. Traffic Simulation Modeling: VISSIM. In C. E. S. Dean, ed. *National Undergraduate Research Opportunities Programme Congress*. National University of Singapore, Faculty of Engineering.

En-topia, 2014. London in time | A London's Evolution Animation. Available at: <http://en-topia.blogspot.co.uk/2014/05/london-in-time-londons-evolution.html> [Accessed June 29, 2014].

Fahrur, J., 2012. A100 - Richter bemängeln Lkw-Prognose des Senats. Available at: <http://www.morgenpost.de/berlin/article109507036/A100-Richter-bemaengeln-Lkw-Prognose-des-Senats.html>.

Farooq, B., Salvini, P.A. & Miller, E.J., 2008a. *Development of an operational integrated urban model system. Volume X: ILUTE Software Documentation*, Toronto.

Farooq, B., Salvini, P.A. & Miller, E.J., 2008b. *Development of an operational integrated urban model system. Volume X: ILUTE Software Documentation*, Toronto.

Ferzoco, J. et al., 2014. Citi Bike Rides: September 17th & 18th, 2013. Available at: <http://linepointpath.com/111242/2771111/work/citi-bike-visualization> [Accessed June 29, 2014].

FlightAware, 2013a. FlightAware: MiseryMap. Available at: <http://de.flightrightaware.com/miserymap/> [Accessed June 29, 2014].

FlightAware, 2013b. FlightAware: MiseryMap.

Friedrich, M., 2011. *Wie viele? Wohin? Womit? Was können uns Verkehrsnachfragermodelle wirklich sagen?*, Köln.

Fyfe, N.R., 1992. Space, time, and policing: towards a contextual understanding of police work. *Environment and Planning D*, 10(4).

Geroe, D., Navratil, G. & Fiby, H., 2011. Entwicklung eines Graphenmodells als Grundlage für eine Routingapplikation für den motorisierten Individualverkehr basierend auf der GIP. In J. Strobl, T. Blaschke, & G. Griesebner, eds. *Angewandte Geoinformatik 2011*. Salzburg: Wichmann.

Gortana, F., Kaim, S. & von Lupin, M., 2014. Isoscope: Exploring Mobility. Available at: <http://isoscope.martinvonlupin.de/> [Accessed June 29, 2014].

Griethe, H. & Schumann, H., 2006. The Visualization of Uncertain Data: Methods and Problems. In *Proceedings of SimVis '06*. Magdeburg: SCS Publishing House e.V.

Gust, H., 2013. PTV AG und Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft schließen umfangreiches Kooperationsabkommen. Available at: <http://www.hochschule-karlsruhe.de/hochschule/aktuelles/presse/ptv-ag-und-hochschule-karlsruhe-schliessen-umfangreiches-kooperationsabkommen.html> [Accessed July 8, 2014].

Hägerstrand, T., 1975. Space, Time, and Human Conditions. In A. Karlquist, L. Lundquist, & F. Snickars, eds. *Dynamic Allocation of Urban Space*. Lexington: Lexington Books.

Hake, G., Grünreich, D. & Meng, L., 2002. *Kartographie: Visualisierung raum-zeitlicher Informationen* 8th ed., Berlin: de Gruyter.

Halbritter, G. et al., 2002. *Verkehr in Ballungsräumen: Mögliche Beiträge von Telematiktechniken und -diensten für einen effizienteren und umweltverträglicheren Verkehr*, Berlin: Erich Schmidt.

Hardin, A., 2014. Public Transit Travel Time- New York City, NY. Available at: <http://geoss.colorado.edu/traveltime/map.php#city=New York City, NY&lat=40.657422&lon=-73.983779> [Accessed June 29, 2014].

Harmon, A., 2013. *A Microsimulated Industrial and Occupation - Based Labour Market Model for Use in the Integrated Land Use, Transportation, Environment (ILUTE) Modelling System*. University of Toronto.

Harrower, M. & Fabrikant, S., 2008. The Role of Map Animation for Geographic Visualization. In M. Dodge, M. McDerby, & M. Turner, eds. *Geographic Visualization: Concepts, Tools and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons, Inc.

Herter, M. & Koos, B., 2008. *Java und GIS*, Heidelberg: Wichmann.

Hilty, L.. et al., 1998. *Instrumente für die ökologische Bewertung und Gestaltung von Verkehrs- und Logistiksystemen - Abschlußbericht des Forschungsprojekts MOBILE.*, Hamburg. Available at: <http://mobile-www.informatik.uni-hamburg.de/MOBILE/Abschlussbericht/Aufbau.html>.

Hruschka, P. & Starke, G., 2012. *Knigge für Softwarearchitekten*, Frankfurt am Main: entwickler.press.

Hudson-Smith, A., 2008a. The Visual City. In M. Dodge, M. McDerby, & M. Turner, eds. *Geographic Visualization: Concepts, Tools and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons, Inc.

Hudson-Smith, A., 2008b. The Visual City. In M. Dodge, M. McDerby, & M. Turner, eds. *Geographic Visualization: Concepts, Tools and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons, Inc.

Infas & DLR-IVF, 2010. *Mobilität in Deutschland 2008 - Ergebnisbericht. Struktur - Aufkommen - Emissionen - Trends*, Berlin. Available at: http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/02_MiD2008/publikationen.htm.

Joao, E.M., 1998. *Causes and Consequences of Map Generalization*, London: Taylor & Francis Ltd.

Kagerbauer, M., 2010. Mikroskopische Modellierung des Außenverkehrs eines Planungsraums. In *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen Band 70*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

Kamat, N., 2011. CSV vs XML vs JSON – Best Response Knowledge Format? Available at: <http://www.javamazon.com/csv-vs-xml-vs-json/> [Accessed July 3, 2014].

- Kee, D.E., Salowitz, L. & Chang, R., 2012. *Comparing Interactive Web-Based Visualization Rendering Techniques*, Poster presented at the IEEE Conference on Information Visualization (InfoVis), Seattle.
- Klein, O., 2013. Visualizing Daily Mobility: Towards Other Modes of Representation. In A. Banos & T. Thévenin, eds. *Geographical Information and Urban Transport Systems*. London: Wiley.
- Kraak, M.-J. & Ormeling, F., 2010. *Cartography: Visualization of Spatial Data* 3rd ed., Edinburgh: Pearson.
- Kurpuweit, K., 2012. Senat kämpft mit 30 Juristen für die A 100. Available at: <http://www.tagesspiegel.de/berlin/landespolitik/geplante-autobahnverlaengerung-senat-kaempft-mit-30-juristen-fuer-die-a-100/7189248.html>.
- Kwan, M.-P., 2000. Interactive geovisualization of activity-travel patterns using three-dimensional geographic information systems: a methodologival exploration with a large data set. In J.-C. Thill, ed. *Geographic Information Systems in Transportation Research*. Kidlington: Pergamon.
- De Lange, N., 2013. *Geoinformatik in Theorie und Praxis* 3rd ed., Berlin: Springer.
- Lenntrop, B., 1976. Path in Space-Time Environments: A Time-Geographic Study of the Movement Possibilities of Individuals. In *Lund Studies in Geography*. Lund: Gleerup.
- Lischke, A., 2013. Persönliches Gespräch am 4. Juni 2013.
- Liu, W., Zong, G. & Wang, X., 2013. Integrated model of urban transportation and land use. In J. Guo & Q. Liu, eds. *Advances in Civil, Transportation and Environmental Engineering*. Southampton: WIT Press.
- Locher, J.L., 2013. *The Magic of M.C. Escher*, London: Thames & Hudson.
- MacEachren, A.M., 1995. *How Maps Work: Representation, Visualization and Design*, New York: The Guilford Press.
- Mäcke, P.A., 1964. *Das Prognoseverfahren in der Straßenverkehrsplanung*, Wiesbaden: Bauverlag.
- Masucci, A.P., Stanilov, K. & Batty, M., 2013. *The growth of London's street network in its dual representation*,
- MATSim, 2012a. MATSim Examples. Available at: <http://matsim.org/examples> [Accessed July 8, 2014].
- MATSim, 2012b. MATSim Examples.
- Microsoft, 2013. Default cluster size for NTFS, FAT, and exFAT. Available at: <http://support.microsoft.com/kb/140365/en> [Accessed July 9, 2014].
- Microsoft, 2003. How NTFS Works. Available at: <http://technet.microsoft.com/en-us/library/cc781134.aspx>.
- Miller, E.J., 2010a. *Agent-Based Microsimulation Models for Urban Policy Analysis*, Montreal.

- Miller, E.J., 2010b. *Agent-Based Microsimulation Models for Urban Policy Analysis*, Montreal.
- Mitchell, T., 2005. *Web Mapping Illustrated: Using Open Source GIS Toolkits* S. St. Laurent, ed., Sebastopol: O'Reilly Media.
- Morais, C.D., 2012. Python and GIS Resources. Available at: <http://www.gislounge.com/python-and-gis-resources/> [Accessed July 10, 2014].
- Murray, S., 2013. *Interactive Data Visualization for the Web* M. Blanchette, ed., Sebastopol: O'Reilly Media.
- Nagel, K., 2013. Using senozon via. Available at: <http://matsim.org/node/742>.
- Ostermann, F., Timpf, S. & Mielke, T., 2005. *Verzeitlichung des Raumes (VERA) - State of the Art (STOA) - Bericht zur Produktion von Chronomaps*, Available at: <http://www.wiso.uni-hamburg.de/fileadmin/sozialoekonomie/zeitpolitik/VERA/Downloads/stoa2005.pdf>.
- Pichler, R., 2008. *Scrum - Agiles Projektmanagement erfolgreich einsetzen*, Heidelberg: dpunkt Verlag.
- Pohl, T., 2010. Chronomaps als Repräsentations- und Kommunikationsmittel der raum-zeitlichen Strukturierung. In D. Läpple, U. Mückenberger, & J. Oßenbrügge, eds. *Zeiten und Räume der Stadt*. Warschau: Barbara Budrich.
- PTV, 2011. *VISSIM 5.40 Benutzerhandbuch*, Karlsruhe: epubli.
- PTV, 2014a. VISSIM Anwendungsfälle - Öffentlicher Verkehr. Available at: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/de/produkte/ptv-vissim/anwendungsfaelle/oefentlicher-verkehr/> [Accessed July 8, 2014].
- PTV, 2014b. Vissim Anwendungsfälle - Verkehrsmanagementmassnahmen. Available at: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/de/produkte/ptv-vissim/anwendungsfaelle/verkehrsmanagementmassnahmen/> [Accessed July 8, 2014].
- PTV, 2014c. VISSIM Anwendungsfälle- Multimodale Systeme. Available at: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/de/produkte/ptv-vissim/anwendungsfaelle/multimodale-systeme/> [Accessed July 8, 2014].
- Salvini, P., 2005. Kartenanimation von ILUTE Ergebnisdaten durch Houdini.
- Salvini, P. & Miller, E.J., 2005. ILUTE: An Operational Prototype of a Comprehensive Microsimulation Model of Urban Systems. *Networks and Spatial Economics*, 5(2).
- Sammer, G., 2012. Editorial. *Straßenverkehrstechnik*, 5.
- Schmitz, P., Riley, A.S. & Dryden, D.C.J., 2009. The use of mapping time and space as a forensic tool in a murder case in South Africa. In *24th International Cartographic Conference: The World's Geo-Spatial Solutions*.
- Schwanen, T. & Kwan, M.-P., 2008. The Internet, mobile phone and space-time constraints. *Geoforum*, 39(3).

- Selz, E., 2009. Wirkungen des Demographischen Wandels auf die Verkehrsnachfrage in Mitteldeutschland. In J. Ringel et al., eds. *Schriften des Forschungsverbundes KoReMi*. Leipzig: Forschungsverbund KoReMi.
- Senozon, 2014. Senozon References. Available at: <http://senozon.com/references> [Accessed July 8, 2014].
- Slocum, T.A. et al., 2001. Cognitive and Usability Issues in Geovisualization. *Cartography and Geographic Information Science*, 28(1).
- Slocum, T.A. et al., 2009. *Thematic Cartography and Geovisualization* 3rd ed., London: Pearson.
- Spiekermann, K. & Wegener, M., 1993. *Zeitkarten für die Raumplanung*, Dortmund.
- Starke, G., 2014. *Effektive Softwarearchitekturen: Ein praktischer Leitfaden*, München: Carl Hanser Verlag.
- statistik-bbb, 2012. *Statistischer Bericht A13-j/11: Bevölkerung im Land Berlin*, Berlin. Available at: https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/Publikationen/Stat_Berichte/2012/SB_A01-03-00_2011j01_BE.pdf.
- Tobón, C., 2002. *Usability Testing for improving interactive Geovisualization techniques*, London.
- Trommer, S., 2008. *Auswirkung einer City-Maut in Deutschland: Abschätzung von Parametern zur Übertragung in ein Verkehrsnachfragermodell*, Hamburg: IGEL.
- Vanhala, L., 2013. The Next Big Spill (The Baltic Sea Traffic Visualized. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=X9UtUzHDn4c> [Accessed June 29, 2014].
- Vasiliev, I., 1996. Design Issues to be Considered When Mapping Time. In C. H. Wood & C. P. Keller, eds. *Cartographic Design: Theoretical and Practical Perspectives*. New York: Wiley.
- Vorontsov, M., 2014. Java performance tuning tips or everything you want to know about Java performance in 15 minutes. Available at: <http://java-performance.com/> [Accessed July 9, 2014].
- W3C, 2011a. Animations: Animation elements. *SVG 1.1 (Second Edition)*. Available at: <http://www.w3.org/TR/SVG/animate.html#AnimationElements> [Accessed June 28, 2014].
- W3C, 2011b. Paths: The elliptical arc curve commands. *SVG 1.1 (Second Edition)*. Available at: <http://www.w3.org/TR/SVG/paths.html#PathDataEllipticalArcCommands> [Accessed June 27, 2014].
- Warmerdam, F., 2008. The Geospatial Data Abstraction Library. In B. Hall & M. G. Leahy, eds. *Open Source Approaches in Spatial Data Handling*. Berlin.
- Wermuth, M., 2005. Modellvorstellungen zur Prognose. In G. Steierwald & H.-D. Künne, eds. *Stadtverkehrsplanung: Grundlagen, Methoden, Ziele*. Berlin: Springer.
- Westra, E., 2010. *Python Geospatial Development*, Birmingham: Packt Publishing.

- Wiedemann, R., 1974. Simulation des Straßenverkehrsflusses. In *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe Band 8*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Institut für Verkehrswesen.
- Zandbergen, P.A., 2013. *Python Scripting for ArcGIS*, York Street: ESRI Press.
- Zhao, J. et al., 2013. The Time-Space Aquarium is Full of Albatrosses. In A. Moore & I. Drecki, eds. *Geospatial Visualization*.
- Zielstra, D. & Zipf, A., 2010. A Comparative Study of Proprietary Geodata and Volunteered Geographic Information for Germany. In M. Painho, M. Y. Santos, & H. Pundt, eds. *13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*. Heidelberg: Springer.
- Zilske, M., 2011. Learning MATSim in 8 Lessons - The MATSim Input. Available at: <http://www.matsim.org/docs/tutorials/8lessons/input> [Accessed July 7, 2014].
- Zimmer, W. et al., 2013. "Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewbility" *RENEWBILITY II - Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehr*, Berlin.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Ablauf des Vier-Stufen-Algorithmus (VSA) (Hilty et al. 1998, p.64)	8
Abbildung 2: Würfelförmiger Kartennutzungsraum (MacEachren 1995, p.358).....	10
Abbildung 3: Kategorien von Zeitinformationen und deren Visualisierungsmöglichkeiten (Klein 2013)	13
Abbildung 4: Isochronenkarte (Spiekermann & Wegener 1993, p.5)	14
Abbildung 5: Chronoplethenkarte (Hardin 2014).....	14
Abbildung 6: Unipolar anamorphe Karte (Dunn 2014)	14
Abbildung 7: Multipolar anamorphe Karte (Spiekermann & Wegener 1993, p.36)	14
Abbildung 8: Standbilder einer Kartenanimation von Aktivitäten in Chicago (Carr 2013b) links: 6:00 Uhr, mittig: 12:00 Uhr, rechts, 22:00 Uhr	16
Abbildung 9: Standbilder einer Kartenanimation von Flughafenauslastungen der USA (FlightAware 2013b)	16
Abbildung 10: 3D-Darstellung der Öffnungszeiten ausgewählter Einrichtungen (Ostermann et al. 2005, p.17).....	18
Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Raum-Zeit-Pfades (Lenntrop 1976).....	18
Abbildung 12: Verkehrsvolumen, abgestuft durch Linienbreite (Caliper 2008, p.2)	19
Abbildung 13: Verkehrsfluss, abgestuft durch Ampelfarben (Caliper 2008, p.7)	19
Abbildung 14: Kombination aus 3D-Karte, Auslastungskarte und Animation	20
Abbildung 15: Schematischer Ablauf der Visualisierungspipeline	21
Abbildung 16: Typische Web-Architektur für ein WebGIS (nach de Lange 2013)	27
Abbildung 17: Durchschnittsgeschwindigkeit auf den Autobahnauffahrten (PTV 2014b)	30
Abbildung 18: „Simulation eines teilsignalisierten Kreisverkehrsplatzes mit Spiralmarkierung und ÖV- Priorisierung“ (PTV 2014a)	30
Abbildung 19: „Verkehrsmanagement in PTV VISSIM: Integrierte Simulation von variabler Geschwindigkeitsanzeige und temporärer Seitenstreifenfreigabe“ (PTV 2014b)	30
Abbildung 20: „Simulation von nicht spurgebundenem Verkehr mit PTV VISSIM: Verschiedene Fahrzeugarten teilen sich die Fahrbahn“ (PTV 2014c)	30
Abbildung 21: Nachverfolgung des Tagesplanes einer einzelnen Person durch OTFVis (MATSim 2012a)	31
Abbildung 22: Ausschnitt einer Kartenanimation zur Visualisierung von Verkehrsflüssen durch OTFVis (MATSim 2012b).....	31
Abbildung 23: Visualisierung durch Google Earth; Diagramme und Legende als Bilder integriert; Details einzelner Verkehrsknoten können in Infobox dargestellt werden (MATSim 2012b).....	32

Abbildung 24: Ausschnitte aus Kartenanimation. Signaturierungen können nach Attributen der Personen angepasst werden (Senozon 2014)	32
Abbildung 25: Ausschnitt einer manuell erstellten Kartenanimation über Kohlenstoffmonoxid-Emissionen im Zeitraum zwischen 13:30 und 14:30 Uhr (Miller 2010a, p.63)	33
Abbildung 26: Reisezeiten, ausgehend vom CBD am Nachmittags-Berufsverkehr (Miller 2010b, p.93)	33
Abbildung 27: Ausschnitt einer Kartenanimation, die automatisch durch Houdini erstellt wurde (Salvini 2005)	33
Abbildung 28: Alterspyramide der synthetischen Bevölkerung mit Differenzierung nach Führerschein, Fahrzeugbesitz und Fahrzeugnutzung.....	40
Abbildung 29: Verteilung der Haushaltsgrößen	40
Abbildung 30: Bevölkerungsdichte nach Ortsteil.....	41
Abbildung 31: Durchschnittsalter nach Ortsteil.....	41
Abbildung 32: Zurückgelegte Personenkilometer (Pkm) nach Modus.....	42
Abbildung 33: Gegenüberstellung von Strecke und Zeit nach Modus (dargestellt ist eine Stichprobe von 10.000 Probanden)	42
Abbildung 34: Bewegung zwischen Wegezwecken.....	43
Abbildung 35: Bewegung zwischen Standorten.....	43
Abbildung 36: Bevölkerungsdichte.....	44
Abbildung 37: Aktivitätendichte in Wohnung	44
Abbildung 38: Dichte Arbeitsaktivitäten	45
Abbildung 39: Dichte Freizeitaktivitäten	45
Abbildung 40: Dichte Einkaufsaktivitäten	45
Abbildung 41: Dichte Bildungsaktivitäten	45
Abbildung 42: Schematische Arbeitsweise des TAPAS-Analyzers und dessen Auswertungsmodule ...	48
Abbildung 43: Integration des GeoVis-Moduls in den TAPAS-Analyzer.....	48
Abbildung 44: Beispiele für Thematische Karten: Bevölkerungsdichte auf Basis der Ortsteile (oben links) und die Nutzungsdichte von Einkaufsgelegenheiten auf Basis von Bezirken (oben rechts), des großen Sechseck-Rasters (unten links) und des kleinen Rechteck-Rasters	51
Abbildung 45: Dialog zum Anpassen des Themas und der Gebietsunterteilung. Bevölkerungsdichte auf Ortsteile (oben links); Einkauf-StO auf Ortsteile (oben rechts); Einkauf-StO auf mittlerem Sechseck-Grid (unten)	52
Abbildung 46: Umsetzung der Raum-Zeit-Pfade	56
Abbildung 47: Tooltip-Infoboxen zu den einzelnen Segmenten des Raum-Zeit-Pfades.....	58
Abbildung 48: modaler Dialog zum hinzufügen oder entfernen von Tagesplänen	59

Abbildung 49: mögliche Perspektiven auf einen Raum-Zeit-Pfad: Startansicht mit 0° Altitude (oben links); 60° Altitude (oben rechts); 90° Altitude (unten links); optimale Sicht 30° Altitude, 45° Azimuth (unten rechts)	60
Abbildung 50: 3D-Koordinatensystem durch x-, y- und z-Achsen (links in blau) und astronomisches Koordinatensystem durch Azimut und Altitude (rechts in rot) gemeinsam dargestellt. Ein fiktiver Raum-Zeit-Pfad befindet sich in der Mitte.....	61
Abbildung 51: Ablesen der 2D-Koordinaten aus den rotierten 3D-Koordinaten	62
Abbildung 52: unplausible Tagespläne, deren genaue Generierung genauer geprüft werden könnte: ein 7 jähriges Mädchen (link) und eine 67 jährige Frau (rechts).....	63
Abbildung 53: Startansicht der Verkehrsströme	65
Abbildung 54: Quellverkehr des Ortsteils Tiergarten.....	66
Abbildung 55: Zielverkehre des Ortsteils Tiergarten.....	67
Abbildung 56: Quellverkehr einer TVZ im Ortsteil Gesundbrunnen (links) mit viel Einkauf durch das Gesundbrunnen-Center; Quellverkehr einer kleinen Sechseck-Zelle im Ortsteil Mitte (rechts)	68
Abbildung 57: Modaler Dialog zur Anpassung der Verkehrsströme	68
Abbildung 58: Quellverkehr von Tiergarten, gefiltert auf Vorgänger-Standorttyp Wohnort	69
Abbildung 59: Quellverkehre von Tiergarten, gefiltert auf Folge-Standorttyp Arbeitsstandort.....	69
Abbildung 60: Quellverkehre von Tiergarten, gefiltert auf Vorgänger-Standorttyp Wohnort und Folge-Standorttyp Arbeitsstandort	70
Abbildung 61: Fahrtenmatritzen mit Vorgänger- und Folge-Standorttyp	71
Abbildung 62: Fahrtenmatrix mit Vorgänger- und Folge-Standorttyp als Baumstruktur	72
Abbildung 63: Möglichkeiten zur Erstellung von Bogenkurven (W3C 2011b)	73
Abbildung 64: Nachvollziehen des Verlaufs aggregierter Wegeketten	75
Abbildung 65: Startansicht des animierten Dashboards für eine Gesamtübersicht. Um 0:00 Uhr Mitternacht befinden sich alle Personen am jeweiligen Wohnort.....	78
Abbildung 66: Gesamtsituation um 6:00 Uhr.....	80
Abbildung 67: Gesamtsituation um 12:00 Uhr.....	80
Abbildung 68: Gesamtsituation um 18:00 Uhr.....	80
Abbildung 69: Gesamtsituation im Bereich Mitte um 15:30 Uhr morgens; Im Hintergrund ist die Nutzungsdichte der Freizeit-Standorte auf Basis der TVZs eingestellt	81
Abbildung 70: Laufzeit und Geschwindigkeit der einzelnen Module in Abhängigkeit des Datenvolumens (Anzahl von Personen)	88
Abbildung 71: Strukturierung des DVD-Inhaltes	104

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung von Eignung, Vorteilen, Nachteilen und Erzeugungsaufwand der vier Darstellungstypen (nach Ostermann et al. 2005, p.27)	36
---	----

9 Listingverzeichnis

Listing 1: Inhalt der JSON-Dateien für Geometrien (links) und Attribute (rechts) am Beispiel der Ortsteile.....	54
Listing 2: Programmcode zum Darstellen der Choroplethen-Karte (vereinfacht)	55
Listing 3: Zugriff auf Verkehrsströmungen über den „Fahrtenbaum“ mittels JavaScript	72
Listing 4: Abbildung der Baumstruktur in das JSON-Format.....	72
Listing 5: SVG-Element zur Darstellung eines rechtskurvigen Bogens zwischen Start- und Endbogen	73
Listing 6: Algorithmus zur Platzierung der Quell- und Zielpunkte neben den Kreisdiagrammen	74
Listing 7: Standortkette im JSON-Format.....	82
Listing 8: Erzeugen aller Punktsignaturen mit verzögerter Ein- und Ausblendung.....	84

Anhang A – Öffnen der umgesetzten Geovisualisierungen über die beigegebene DVD

Auf der beigegebenen DVD befinden sich die Webseiten, in denen die umgesetzten Geovisualisierungen eingebettet sind -der kostenfreie portable Webserver *Abyss Web Server X1* und das Open Source Standard-VIS *Inkscape 0.48*. Der Inhalt der DVD ist so aufbereitet, dass der Webserver sofort gestartet, die Geovisualisierungen geöffnet und Inkscape begonnen werden können.



Abbildung 71: Strukturierung des DVD-Inhaltes

Zum korrekten Aufrufen der Webseiten muss zuerst der Webserver gestartet werden. Dabei kann es geschehen, dass dies im Rahmen eines Antivirenprogrammes oder einer Firewall bestätigt werden muss. Im Anschluss öffnet sich ein Dialog, der sich selbstständig in das Benachrichtigungsfeld (System Tray) minimiert und über das -Symbol aufrufbar ist. Der Webserver stoppt automatisch beim Schließen des Dialoges.

Danach können die Webseiten über die angebotenen Verknüpfungen geöffnet werden. Die Verknüpfungen verweisen auf die Webadresse <http://localhost/>, die bei Bedarf auch direkt über die Adressleiste im Webbrowser angesteuert werden kann. Optimiert wurden die Geovisualisierungen für die beiden Webbrowser *Microsoft Internet Explorer 9* und *Mozilla Firefox 30*.

Abschließend kann Inkscape gestartet werden, um exportierte SVG-Dateien nachzubearbeiten.

Anhang B – Rohdaten von drei Personen eines Haushalts

t_id	p_id	hh_id	p_group	start_time_min	mode	distance	distance_real	activity
22	1000085	1000017	2	898	2	4969.40231	6076.65307	211
23	1000085	1000017	2	1085	2	3208.12636	4512.77599	631
24	1000085	1000017	2	1133	2	4480.47718	6055.79787	700
25	1000086	1000017	1	651	2	7710.30634	9604.0248	640
26	1000086	1000017	1	736	2	6011.79646	7209.3236	720
27	1000086	1000017	1	880	2	1789.4072	2971.02757	531
28	1000087	1000017	1	468	3	4939.45269	5676.2592	410
29	1000087	1000017	1	685	5	3621.77191	5070.48067	50
30	1000087	1000017	1	770	5	1746.99106	2445.78749	10
31	1000087	1000017	1	822	0	785.061871	1099.08662	740
32	1000087	1000017	1	877	0	785.061871	1099.08662	10
33	1000087	1000017	1	911	5	12823.6998	17953.1797	721
34	1000087	1000017	1	1162	3	12823.6998	18153.723	700
35	1000087	1000017	1	1232	1	1454.14588	2035.80423	720
36	1000087	1000017	1	1476	1	1454.14588	2035.80423	700
37	1000088	1000017	11	457	2	1500.43923	2313.71053	722
38	1000088	1000017	11	470	2	1500.43923	2169.05012	700
39	1000088	1000017	11	663	2	514.440437	569.49384	50
40	1000088	1000017	11	688	2	3508.51305	4019.85957	720
41	1000088	1000017	11	751	2	3454.11514	3957.05924	10
42	1000088	1000017	11	898	2	1277.11115	1472.1116	722
43	1000088	1000017	11	921	2	1277.11115	1444.31093	700
44	1000088	1000017	11	979	5	2820.53544	3948.74961	720
45	1000088	1000017	11	1054	3	5035.79762	6855.50739	800
46	1000088	1000017	11	1142	3	4001.83526	5242.84951	700
47	1000089	1000017	21	557	5	4219.47893	5907.2705	300
48	1000089	1000017	21	795	5	4219.47893	5907.2705	700
49	1000089	1000017	21	873	1	891.674357	1248.3441	720
50	1000089	1000017	21	1011	1	420.220197	588.308275	740
51	1000089	1000017	21	1138	1	514.440437	720.216611	700
52	1000089	1000017	21	1155	3	1454.14588	2709.06772	720
53	1000089	1000017	21	1314	0	1454.14588	2035.80423	711

t_id	activity_start_min	activity_duration_min	is_home	taz_id_start	taz_id_end	loc_id_start	loc_id_end
22	915	170	f	2	53	-1000017	12337
23	1098	35	f	53	531	12337	26995
24	1149	530	t	531	2	26995	-1000017
25	676	60	f	2	761	-1000017	66985
26	755	125	f	761	11	66985	37178
27	890	800	t	11	2	37178	-1000017
28	485	200	f	2	277	-1000017	26249
29	710	60	f	277	14	26249	98
30	782	40	t	14	2	98	-1000017
31	837	40	f	2	5	-1000017	42632
32	891	20	t	5	2	42632	-1000017
33	972	190	f	2	320	-1000017	44084
34	1192	40	t	320	2	44084	-1000017
35	1246	230	f	2	8	-1000017	36470
36	1493	270	t	8	2	36470	-1000017
37	465	5	f	2	86	-1000017	57706
38	478	185	t	86	2	57706	-1000017
39	668	20	F	2	89	-1000017	647
40	701	50	f	89	22	647	35985
41	763	135	t	22	2	35985	-1000017
42	906	15	f	2	7	-1000017	57123
43	929	50	t	7	2	57123	-1000017
44	1004	50	f	2	121	-1000017	36372
45	1072	70	f	121	178	36372	58691
46	1155	570	t	178	2	58691	-1000017
47	595	200	f	2	227	-1000017	59319
48	833	40	t	227	2	59319	-1000017
49	881	130	f	2	96	-1000017	36333
50	1018	120	f	96	89	36333	44630
51	1145	10	t	89	2	44630	-1000017
52	1164	150	f	2	8	-1000017	36470
53	1346	360	t	8	2	36470	-1000017

t_id	taz_bbr_type_start	bbr_type_home	hh_cars	hh_income	hh_has_child	hh_persons	p_age	p_driver_license
22	1		1	2	3466	f	5	21
23	1		1	2	3466	f	5	21
24	1		1	2	3466	f	5	21
25	1		1	2	3466	f	5	18
26	1		1	2	3466	f	5	18
27	1		1	2	3466	f	5	18
28	1		1	2	3466	f	5	6
29	1		1	2	3466	f	5	6
30	1		1	2	3466	f	5	6
31	1		1	2	3466	f	5	6
32	1		1	2	3466	f	5	6
33	1		1	2	3466	f	5	6
34	1		1	2	3466	f	5	6
35	1		1	2	3466	f	5	6
36	1		1	2	3466	f	5	6
37	1		1	2	3466	f	5	42
38	1		1	2	3466	f	5	42
39	1		1	2	3466	f	5	42
40	1		1	2	3466	f	5	42
41	1		1	2	3466	f	5	42
42	1		1	2	3466	f	5	42
43	1		1	2	3466	f	5	42
44	1		1	2	3466	f	5	42
45	1		1	2	3466	f	5	42
46	1		1	2	3466	f	5	42
47	1		1	2	3466	f	5	45
48	1		1	2	3466	f	5	45
49	1		1	2	3466	f	5	45
50	1		1	2	3466	f	5	45
51	1		1	2	3466	f	5	45
52	1		1	2	3466	f	5	45
53	1		1	2	3466	f	5	45

t_id	p_abo	p_has_bike	p_sex	scheme_id	score_combined	score_finance	score_time	loc_coord_x_start
22	1	t	2	19538	0.96733001	1	1	385780.928
23	1	t	2	19538	0.96733001	1	1	389911.36
24	1	t	2	19538	0.96733001	1	1	390256.105
25	1	t	1	33073	0.11020652	0	0	385780.928
26	1	t	1	33073	0.11020652	0	0	392832.8
27	1	t	1	33073	0.11020652	0	0	387557.716
28	1	t	2	9686	0.40943031	0	0	385780.928
29	1	t	2	9686	0.40943031	0	0	387987.22
30	1	t	2	9686	0.40943031	0	0	387302.888
31	1	t	2	9686	0.40943031	0	0	385780.928
32	1	t	2	9686	0.40943031	0	0	386553.021
33	1	t	2	9686	0.40943031	0	0	385780.928
34	1	t	2	9686	0.40943031	0	0	384413.807
35	1	t	2	9686	0.40943031	0	0	385780.928
36	1	t	2	9686	0.40943031	0	0	387236.907
37	0	t	2	11111	0.07014399	0	0	385780.928
38	0	t	2	11111	0.07014399	0	0	385880.6
39	0	t	2	11111	0.07014399	0	0	385780.928
40	0	t	2	11111	0.07014399	0	0	385379.564
41	0	t	2	11111	0.07014399	0	0	388043.506
42	0	t	2	11111	0.07014399	0	0	385780.928
43	0	t	2	11111	0.07014399	0	0	387016.89
44	0	t	2	11111	0.07014399	0	0	385780.928
45	0	t	2	11111	0.07014399	0	0	384936.326
46	0	t	2	11111	0.07014399	0	0	382031.15
47	0	t	1	18588	0.79354789	1	0.05895604	385780.928
48	0	t	1	18588	0.79354789	1	0.05895604	383608.472
49	0	t	1	18588	0.79354789	1	0.05895604	385780.928
50	0	t	1	18588	0.79354789	1	0.05895604	385263.443
51	0	t	1	18588	0.79354789	1	0.05895604	385379.564
52	0	t	1	18588	0.79354789	1	0.05895604	385780.928
53	0	t	1	18588	0.79354789	1	0.05895604	387236.907

t_id	loc_coord_y_start	loc_coord_x_end	loc_coord_y_end
22	5821377.9	389911.36	5818594.68
23	5818594.68	390256.105	5821785.86
24	5821785.86	385780.928	5821377.9
25	5821377.9	392832.8	5824543.43
26	5824543.43	387557.716	5821630.44
27	5821630.44	385780.928	5821377.9
28	5821377.9	387987.22	5816952.84
29	5816952.84	387302.888	5820511.6
30	5820511.6	385780.928	5821377.9
31	5821377.9	386553.021	5821223.63
32	5821223.63	385780.928	5821377.9
33	5821377.9	384413.807	5808620.69
34	5808620.69	385780.928	5821377.9
35	5821377.9	387236.907	5821463.21
36	5821463.21	385780.928	5821377.9
37	5821377.9	385880.6	5822875.79
38	5822875.79	385780.928	5821377.9
39	5821377.9	385379.564	5821054.49
40	5821054.49	388043.506	5818760.59
41	5818760.59	385780.928	5821377.9
42	5821377.9	387016.89	5821042.15
43	5821042.15	385780.928	5821377.9
44	5821377.9	384936.326	5818684.74
45	5818684.74	382031.15	5822806.61
46	5822806.61	385780.928	5821377.9
47	5821377.9	383608.472	5817755.2
48	5817755.2	385780.928	5821377.9
49	5821377.9	385263.443	5820650.34
50	5820650.34	385379.564	5821054.49
51	5821054.49	385780.928	5821377.9
52	5821377.9	387236.907	5821463.21
53	5821463.21	385780.928	5821377.9

Anhang C – Zuordnung der Wegezwecke zu Aktivität

Nummer	Wegezweck	Aktivität	Standort	Vorkommen im Datensatz
50	Einkauf	Einkäufe	Einkaufs-StO	11,938%
740	Andere	Sonstige Freizeitaktivitäten	Anderer StO	1,049%
799	Andere	Sonstige Aktivitäten	Anderer StO	0,981%
211	Arbeit	Arbeiten	Arbeits-StO	9,219%
62	Arbeit	Arbeitssuche	Arbeits-StO	0,12%
410	Bildung	Schule	Bildungs-StO	2,322%
411	Bildung	Studium	Bildungs-StO	0,726%
499	Bildung	Mittagspause in Schule	Bildungs-StO	0,001%
10	priv. Erledigung	Hauswirtschaft	Wohnort	12,058%
522	priv. Erledigung	Persönliche Angelegenheiten / Dienstleistungen	StO priv. Erl.	4,708%
611	priv. Erledigung	Gespräche persönlichen Inhalts	StO priv. Erl.	2,36%
631	priv. Erledigung	Besuche	StO priv. Erl.	1,919%
32	priv. Erledigung	Hauswirtschaftliche Tätigkeiten in der Nähe des Hauses	StO priv. Erl.	1,472%
12	priv. Erledigung	E-Commerce	Wohnort	0,003%
700	Freizeit	Freizeit zu Hause	Wohnort	15,131%
531	Freizeit	Essen zu Hause	Wohnort	9,538%
722	Freizeit	Spazierengehen	Freizeit-StO	3,866%
640	Freizeit	Ausflug	Freizeit-StO	3,512%
711	Freizeit	Fernsehen	Wohnort	3,379%
720	Freizeit	Ausgehen, Essen gehen	Freizeit-StO	3,345%
800	Freizeit	Lernen mit Kindern, Spielen oder Sport mit Kindern	Freizeit-StO	3,276%
721	Freizeit	Sport	Freizeit-StO	2,725%
299	Freizeit	Aktive Freizeit zu Hause, Reparaturen	Wohnort	2,479%

724	Freizeit	Besuch von Veranstaltungen (Kino, Theater, Kirche)	Freizeit-StO	1,091%
300	Freizeit	Ehrenamt	Freizeit-StO	0,97%
511	Freizeit	Schlafen	Wohnort	0,642%
723	Freizeit	Spielen	Freizeit-StO	0,416%
231	Freizeit	Auf die Arbeit bezogene Gespräche	Freizeit-StO	0,303%
512	Freizeit	Ausruhen / Nichtstun	Freizeit-StO	0,253%
711	Freizeit	Fernsehen	Freizeit-StO	0,139%
722	Freizeit	Spazierengehen	Wohnort	0,055%
511	Freizeit	Schlafen	Freizeit-StO	0,004%

Anhang D - Berliner Ortsteile



Anhang E – Poster für die Vorstellung des TAPAS-Verkehrsmodells

TAPAS

Travel Activity PAtern Simulation

Simulation des Verkehrs von morgen

Das mikroskopische Nachfragemodell TAPAS:

- untersucht die mittel- bis langfristigen Veränderungen der Personenverkehrs nachfrage in Szenarien
- ermöglicht die Abbildung und Bewertung verkehrlicher Maßnahmen und veränderter Rahmenbedingungen
- bietet Schnittstellen zu anderen Modellen des Institutes (Landnutzung, Flotten, Güterverkehr, Umlegung)
- Referenzprojekte: VEU, Renewability sowie Infradem

Von der Einzelperson zum Gesamtbild

TAPAS setzt am individuellen Mobilitätsverhalten an und

- nimmt Aktivitäten als Ausgangspunkt täglicher Mobilität
- berücksichtigt detaillierte Personeneigenschaften sowie den jeweiligen Haushaltskontext
- betrachtet Wechselwirkungen zwischen lang- und kurzfristigen Entscheidungen (z.B. Pkw-Besitz, Ziel- und Modalwahl, Abhängigkeiten in der Wegekette)
- ermöglicht räumliche und zeitliche Differenzierungen

TAPAS -Ergebnis

Tagespläne für jede Person

Zeitliche Abläufe

Verkehrsströme

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Wie gestalten wir unsere logistische Zukunft?

Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2
12489 Berlin

Ansprechpartnerin: Rita Cyganski
Telefon: +49 30 67055 -147
Email: Rita.Cyganski@DLR.de