

Multimodale Annotation geographischer Daten zur personalisierten Fußgängernavigation

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt an der
Technischen Universität Dresden
Fakultät Informatik

eingereicht von
Dipl.-Ing. Thorsten Völkel
geboren am 05.08.1978 in Hamburg

Betreuender Hochschullehrer:
Prof. Dr. rer. nat. habil. Gerhard Weber

Dresden im Dezember 2008

*Für meine Töchter
Svea Marie und Mia Marike.*

Danksagung

Nach meinem Studium der Ingenieurinformatik in Kiel bot mir Prof. Gerhard Weber die Stelle eines wissenschaftlichen Mitarbeiters an seinem Lehrstuhl am Multimedia Campus Kiel an. Zu diesem Zeitpunkt sah es nach einem normalen Verlauf eines Dissertationsvorhabens aus. Der durch äußere Umstände erzwungene Wechsel der Hochschule und die damit verbundene zwischenzeitliche Tätigkeit in der Industrie ließen den Verlauf dieser Dissertation jedoch vom Normalfall abweichen. Ich möchte daher an dieser Stelle besonders meinem Doktorvater danken, der mir über den gesamten Zeitraum und trotz der schwierigen Umstände immer ein konstruktives Arbeitsumfeld ermöglicht hat. Weiterhin danken möchte ich ihm für die unzähligen anregenden und fruchtbaren Diskussionen sowohl bei der Entwicklung des Themas als auch bei der eigentlichen Durchführung dieser Arbeit. Danken möchte ich ebenfalls den weiteren Gutachtern Prof. Alexander Schill und Prof. Miesenberger für die Begutachtung der Arbeit und die konstruktiven und wertvollen Kommentare.

Diese Arbeit würde ohne die Unterstützung weiterer Personen nicht in dieser Form vorliegen. Besonderen Dank bin ich Herrn Hans-Karl Peter und Herrn Dr. Thomas Kahlisch vom Deutschen Blinden- und Sehbehindertenverband (DBSV) sowie Herrn Klaus-Jürgen Schwede von der Deutschen Blindenstudienanstalt verpflichtet, ohne deren Unterstützung eine derart große Anzahl an Rückläufern bei der durchgeführten Umfrage nicht möglich gewesen wäre. Weiterhin gebührt ein erheblicher Dank meiner Potsdamer Kollegin Maria Schiewe und meinem Kollegen Michael Kraus, die unermüdlich das Manuskript auf sprachliche Fehler und unklare Formulierungen prüften.

Abschließend dürfen die wichtigsten Menschen im meinem Leben nicht unerwähnt bleiben. Meinen Eltern danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen und den Rückhalt während der gesamten Arbeit. Meiner Frau Miriam danke ich für die viele Unterstützung während der Zeit des Pendelns zwischen Kiel und Dresden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Gegenstand	1
1.2	Motivation	5
1.3	Gliederung der Arbeit	8
2	Navigationssysteme für Fußgänger	10
2.1	Verfahren zur Positionsbestimmung	11
2.2	Datengrundlagen	14
2.3	Routenplanung und -berechnung	17
2.4	Hilfsmittel für Orientierung und Navigation	19
2.5	Anreicherung geographischer Daten	25
2.6	Zusammenfassung	27
3	Benutzeranforderungen	29
3.1	Mobilitätseingeschränkte Benutzer	29
3.2	Empirische Grundlagen	33
3.2.1	Ziele	33
3.2.2	Methodik und Teilnehmer	34
3.2.3	Ergebnisse	35
3.3	Anforderungsanalyse	37
3.3.1	Geographische Basisdaten	37
3.3.2	Positionsbestimmung	39
3.3.3	Routenberechnung	40
3.3.4	Multimodalität	42
3.3.5	Temporale Anforderungen	44
3.4	Zusammenfassung	45
4	Multimodale Annotation geographischer Daten	47
4.1	LOM-Modalität	47
4.2	Begriffsbildung und Definition	51
4.3	Klassifizierung	54
4.3.1	Ortsbezug	55
4.3.2	Temporaler Bezug	56
4.3.3	Benutzerbezug	58

4.3.4	Informationsrepräsentation	58
4.4	Annotationsprozesse	59
4.5	Zusammenfassung	62
5	Personalisierte Routenberechnung	63
5.1	Theoretische Grundlagen.....	63
5.1.1	Graphen und Navigationsalgorithmen.....	64
5.1.2	Multikriterienanalyse.....	69
5.2	Multikriterielle Routenberechnung.....	72
5.3	Personalisierung.....	81
5.3.1	Benutzermodellierung.....	81
5.3.2	Personalisierte Routenberechnung.....	85
5.4	Strategien zur Konsolidierung von Annotationen.....	87
5.5	Zusammenfassung.....	93
6	Systemarchitektur	94
6.1	Zentrale Komponenten der Serverseite	95
6.2	Zentrale Komponenten der Clientseite.....	97
6.3	Datenschutzrechtliche Aspekte.....	98
6.4	Prototypische Implementierung zur Simulation.....	100
6.5	Performance-Analyse und Skalierbarkeit.....	104
6.6	Zusammenfassung.....	109
7	Evaluation.....	110
7.1	Wizard-of-Oz-Evaluation ortsbasierter Dienste	110
7.2	Prototyp.....	113
7.3	Versuchsaufbau und -durchführung	119
7.4	Ergebnisse und Analyse	125
7.4.1	Allgemeines Annotationsverhalten der Benutzer	126
7.4.2	Homogenität der Benutzergruppen	131
7.4.3	Vergleich zu nicht-mobilitätseingeschränkten Benutzern	136
7.4.4	Gebrauchstauglichkeit des Prototyps.....	140
7.5	Zusammenfassung.....	144
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	145
	Literaturverzeichnis	149

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Phasen der Navigationsaufgabe	3
Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der satellitengestützten Positionsbestimmung.....	12
Abbildung 2.2: Umsetzung von realer Topologie in Datenstrukturen	15
Abbildung 2.3: Mobiles Messsystem und Auswertung der Aufnahmen	16
Abbildung 2.4: Ultraschall-Griffaufsatz des Blindenlangstocks Ultracane	20
Abbildung 2.5: Trekker und Sendero GPS-System	22
Abbildung 2.6: Talking Signs Emitter und Empfänger.....	24
Abbildung 3.1: Beispiele für mobilitätseinschränkende Faktoren und Hilfsmittel.....	30
Abbildung 3.2: Auswirkungen verschiedener Sehschädigungen	31
Abbildung 3.3: Anzahl der Nennungen der verwendeten Hilfsmittel.....	36
Abbildung 3.4: Bereitschaft der Befragten in Bezug auf Umwege.....	41
Abbildung 3.5: Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs.....	43
Abbildung 4.1: Stetige und unstetige temporale Bezüge am Beispiel einer Baustelle	57
Abbildung 5.1: Beispiel für einen gerichteten, gewichteten Graphen	64
Abbildung 5.2: Einfacher Navigationsgraph.....	68
Abbildung 5.3: Prioritätsliste nach der ersten Iteration.....	68
Abbildung 5.4: Prioritätenliste nach der zweiten Iteration	68
Abbildung 5.5: Prioritätenliste nach der dritten Iteration	69
Abbildung 5.6: Entscheidungsmatrix multikriterieller Probleme	71
Abbildung 5.7: Graph mit Gewichtsvektoren	73
Abbildung 5.8: Normalisierung von Teilgewichten.....	75
Abbildung 5.9: Erweiterte Datenstruktur	76
Abbildung 5.10: Navigationsgraph mit Gewichtsvektoren.....	78
Abbildung 5.11: Zustand der multikriteriellen Prioritätenliste nach der ersten Iteration	80
Abbildung 5.12: Zustand der multikriteriellen Prioritätenliste nach der zweiten Iteration	81
Abbildung 5.13: Struktur des Benutzermodells für die Personalisierung.....	82
Abbildung 5.14: Abbildung der Likertskala auf Gewichtswerte	83
Abbildung 5.15: Gruppenprofile der evaluierten Benutzergruppen.....	84
Abbildung 5.16: Korrelation zwischen Benutzerprofil und Kostenfunktion	85
Abbildung 5.17: Graph mit multiplen Gewichten.....	86
Abbildung 5.18: Gleichgewichtung der Annotationswerte.....	89

Abbildung 5.19: Zusammenhang zwischen Annotationen und konsolidierter Bewertung.....	90
Abbildung 5.20: Höhergewichtung aktuellerer Annotationswerte	91
Abbildung 6.1: Schichtenmodell der Serverseite	95
Abbildung 6.2: Schichtenmodell des Clientsystems	98
Abbildung 6.3: Georeferenzierte Straßenkarte mit überlagerndem Navigationsgraphen	101
Abbildung 6.4: Architektur der Simulationsanwendung.....	102
Abbildung 6.5: Bildschirmfoto der Simulationsumgebung	103
Abbildung 6.6: Struktur des generierten Netzwerks	105
Abbildung 6.7: Anzahl der Knoten und Iterationen.....	106
Abbildung 6.8: Laufzeit der Algorithmen in Abhängigkeit von der Weglänge.....	107
Abbildung 6.9: Architektur für Lastverteilung und Datenkonsistenz	108
Abbildung 7.1: Generelle Struktur von Wizard-of-Oz-Versuchsaufbauten.....	111
Abbildung 7.2: Dialoge des Prototyps für Senioren und Rollstuhlfahrer	114
Abbildung 7.3: Dialogstruktur des Prototyps.....	115
Abbildung 7.4: Komponenten des Versuchssystems	116
Abbildung 7.5: Konzept der gestenbasierten Eingabe	117
Abbildung 7.6: Dialogstruktur für blinde und sehbehinderte Benutzer	118
Abbildung 7.7: Versuchsaufbau des Benutzertests	120
Abbildung 7.8: Testrouten für die Evaluation.....	121
Abbildung 7.9: Annotationsstationen der Route Campus.....	122
Abbildung 7.10: Annotationsstationen der Route Helmholtz	123
Abbildung 7.11: Verteilung der Bewertungen nach Kriterien und Nutzergruppen	127
Abbildung 7.12: Annotationsverhalten mit und ohne Einbezug anderer Benutzer.....	130
Abbildung 7.13: Präferenzen zu positiven und negativen Bewertungen	131
Abbildung 7.14: Vergleich des Anteils freier Annotation zwischen den Gruppen.....	137
Abbildung 7.15: Problematische Stellen bei Zielführung.....	141
Abbildung 7.16: Verwendung der verschiedenen Medien für die Zielführung	142

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Altersverteilung der Teilnehmer	35
Tabelle 4.1: Mögliche Kombinationen von Modalitäten und Medien	49
Tabelle 4.2: Vergleich der Eigenschaften von Attributen und Annotationen	53
Tabelle 4.3: Übersicht der Ortsbezugstypen	55
Tabelle 5.1: Pseudocode für die Rekursion des Dijkstra-Algorithmus	67
Tabelle 5.2: Pseudocode für die erweiterte Variante des Dijkstra Algorithmus	77
Tabelle 7.1: Demographische Daten der Probanden	124
Tabelle 7.2: Absolute und relative Anzahl der Annotationen über die gesamte Evaluation .	126
Tabelle 7.3: Häufig annotierte Merkmale	129
Tabelle 7.4: Bewertungen der Gruppe Senioren	133
Tabelle 7.5: Bewertungen der Gruppe Rollstuhlfahrer	134
Tabelle 7.6: Bewertungen der Gruppe der Sehgeschädigten	135
Tabelle 7.7: Absolute und relative Anzahl der Annotationen	137
Tabelle 7.8: Bewertungen der Kontrollgruppe	138
Tabelle 7.9: Ergebnisse und Signifikanzniveaus des t-Tests	139

1 Einführung

1.1 Gegenstand

Mobilität ist eine zentrale Voraussetzung für die autonome Gestaltung des täglichen Lebens. Der Weg zur Arbeit, der Kauf von Gütern des täglichen Bedarfs und die Pflege sozialer Kontakte sind lediglich einige Beispiele von Tätigkeiten, die ohne einen gewissen Grad an Mobilität nicht oder nur unzureichend möglich sind. Sprachlich liegt der lateinische Begriff ‚Mobilitas‘ zugrunde, so dass ‚Mobilität‘ zumeist als Synonym für Beweglichkeit verwendet wird. Im soziologischen Kontext wird der Begriff hinsichtlich des Einnehmens einer inneren Haltung bezüglich der Bewegung zwischen sozialen Rollen, Funktionen oder Gruppen interpretiert (Hildebrandt, Deubel & Dick, 2001). Im Kontext dieser Arbeit wird der Begriff der Mobilität jedoch ausschließlich in Bezug auf die räumliche Ortsveränderung verwendet. Diese wird in (Läpple, 1995) wie folgt definiert:

Mobilität bezeichnet ganz allgemein die Bewegung von Menschen und Dingen in Räumen. [...] Unter dem Begriff der räumlichen Mobilität werden im weitesten Sinne alle Bewegungsvorgänge zwischen menschlichen Aktivitätsstandorten gefasst.

Dabei werden Aktivitätsstandorte in (Ernst, 1999) als Orte definiert, die im Zusammenhang mit menschlichen Tätigkeiten aufgesucht werden, wobei Wohnen, Arbeiten, Versorgung, Bildung und Freizeit als die wichtigsten Aktivitäten genannt werden. Weiterhin wird Mobilität in (Ernst, 1999) beschrieben als:

[...] eine wichtige Grundlagenfunktion zur Ausübung von Aktivitäten und zur Nutzung bzw. Erschließung von Lebensräumen [...], die für die persönliche Entwicklung sowie eine gesellschaftliche und soziale Partizipation [...] einen hohen Stellenwert hat.

Aus den vorgestellten Definitionen wird deutlich, dass die räumliche Mobilität einer Person einen direkten Einfluss auf viele Lebensbereiche sowie die berufliche, gesellschaftliche und soziale Integration hat. Obgleich die angegebenen Definitionen bereits sehr weitreichend sind, soll im Kontext dieser Arbeit eine leicht abgewandelte Begriffsbildung erfolgen, um einen direkteren Bezug zum Menschen zu ermöglichen:

Mobilität ist die Fähigkeit einer Person, selbständig und gegebenenfalls durch die Verwendung von Hilfsmitteln einen Wechsel des räumlichen Orts zu vollziehen. Hilfsmittel sind alle Mittel, die für den Wechsel des Aufenthaltsorts förderlich sind.

Die angeführte Definition schränkt die Begriffsbildung einerseits auf die räumliche Ortsveränderung ein, andererseits kann Mobilität als Fähigkeit in direktem Bezug zu einem Menschen gesetzt werden. Als Fähigkeit kann die Mobilität durch externe Faktoren beeinflusst werden und somit sowohl positiven als auch negativen Änderungen unterliegen. Eine gehbehinderte Person kann beispielsweise durch die Verwendung eines Rollstuhls oder Rollators eine erhebliche Verbesserung ihrer Mobilität erreichen. Ebenso erfolgt eine signifikante Mobilitätssteigerung durch die Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von öffentlichen Verkehrsmitteln. Bei der Betrachtung der Mobilität als Fähigkeit bildet die Autonomie der Fortbewegung einen wichtigen Aspekt. Der Grad der Mobilität einer Person kann daher nicht nur anhand der physischen und kognitiven Fähigkeiten bewertet werden, sondern es müssen ihre Fähigkeiten in Bezug auf eine selbständige Fortbewegung und Orientierung sowohl in bekannten als auch in unbekanntem Gebieten einbezogen werden.

Die Gruppe der mobilitätseingeschränkten Fußgänger, die in Abschnitt 3.1 genauer definiert wird und der in dieser Arbeit besondere Aufmerksamkeit zukommt, nimmt im Kontext der Mobilität eine spezielle Rolle ein. Mitglieder dieser Gruppe verfügen aus einem oder mehreren Gründen über eine eingeschränkte Mobilität, so bestehen beispielsweise für Rollstuhlfahrer viele strukturelle Barrieren wie Bordsteine oder Treppen. Für blinde und sehbehinderte Menschen ist es dagegen oft problematisch, sich in unbekanntem Gebieten zurechtzufinden, da sie Landmarken und Orientierungsmerkmale der Umgebung nicht visuell und somit nur erschwert oder gar nicht wahrnehmen können. Sehgeschädigte Menschen sind daher bezogen auf die Autonomie ihrer Fortbewegung eingeschränkt, obwohl keine motorische Behinderung besteht.

Fußgänger müssen unabhängig vom Grad ihrer Mobilität bei der Überwindung einer Strecke eine sogenannte Navigationsaufgabe bewältigen. Die Navigationsaufgabe umfasst diejenigen Prozesse, die für das Erreichen eines entfernten, nicht direkt wahrnehmbaren Ziels durchgeführt werden müssen. Die folgende Abbildung 1.1 zeigt die Gliederung der Navigationsaufgabe in die verschiedenen Prozesse beziehungsweise Prozesssteile.

Zu Beginn der Navigationsaufgabe erfolgt eine statische Orientierung, bei welcher der eigene Standort bestimmt wird. Dieser ist Grundlage für die Planung der Route und des direkt zurückzulegenden Wegabschnitts. Sind sowohl Route als auch direkt zu wählender Weg aufgrund der äußeren Wahrnehmung bestimmt, erfolgt der Beginn der Bewegung entlang des gewählten Wegabschnitts. Anschließend erfolgt während der Bewegung auf Basis der Wahrnehmung der Umwelt eine kontinuierliche und dynamische Planung bzw. eine Anpassung der ursprünglich geplanten Route sowie des jeweils aktuell zurückzulegenden Wegabschnitts. Das Erreichen des Ziels führt schließlich zur Beendigung der Bewegung, da die Navigationsaufgabe erfüllt ist.

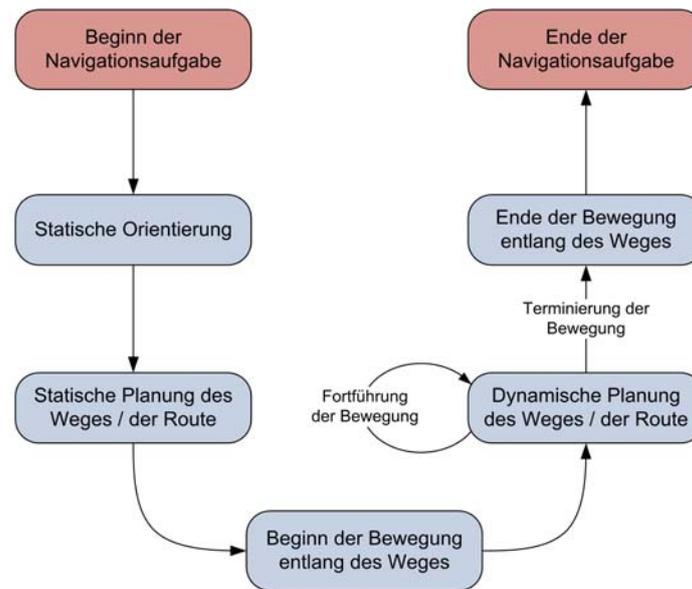


Abbildung 1.1: Phasen der Navigationsaufgabe

In der wissenschaftlichen Literatur werden die Begriffe Navigation und Navigationsaufgabe häufig für ähnliche Sachverhalte verwendet. In diesem Kontext haben sich unterschiedliche Definitionen und Verwendungen der betreffenden Begrifflichkeiten herausgebildet. So wird die Navigationsaufgabe in (Harper & Green, 2000) in die Bestandteile Orientierung und Navigation zerlegt. Die Orientierung umfasst dabei die Fähigkeit, sich innerhalb der direkten Umgebung fortzubewegen, zusammen mit der Lösung des lokalen Problems, welche Richtung bzw. welcher unmittelbarer Weg zur Erreichung eines entfernt liegenden Ziels verfolgt werden soll (Bentzen, 1979). Die Fortbewegung erfordert zudem die Kenntnis von unmittelbaren Hindernissen und potentiellen Gefahren, die umgangen werden müssen. Bezogen auf mobilitätseingeschränkte Personen reduziert sich die Orientierung gegebenenfalls auf die verbliebenen sensorischen und kognitiven Fähigkeiten für die Ermittlung der eigenen Position in Relation zur Umgebung (Jacobson, 1993).

Die Navigation beinhaltet den übergeordneten Planungsprozess (Farmer, 1979), der üblicherweise im Vorwege auf Basis von Vorwissen (z. B. Kartenmaterial) oder direkt bei der Ausführung der eigentlichen Navigationsaufgabe erfolgt, wobei im letzteren Fall Kenntnisse über die lokale Umwelt (wie beispielsweise Landmarken oder Umgebungsmerkmale) notwendig sind. In (Baker, 1981) wird Navigation als Methode definiert, die Richtung bekannter Ziele innerhalb einer unbekannteren Umgebung zu bestimmen, wobei die Navigation aufbauend auf empirischen Studien in einen routen- und einen ortsbasierten Teil zerlegt wird. Die routenbasierte Navigation umfasst die Überprüfung und Bewertung der aktuellen Richtung sowie die Abschätzung von Entfernungen, während der ortsbasierte Teil die Bestimmung und Bewertung der aktuellen Position in Relation zu Wegpunkten und Landmarken beinhaltet.

Eine andere Begriffsbildung erfolgt in (Strothotte et al., 1996), in der die Navigationsaufgabe in Mikro- und Makronavigation unterteilt wird. Die Mikronavigation umfasst die Orientierung und Navigation für die direkte Umgebung des Fußgängers bis zu einer Distanz von etwa zehn Metern und beinhaltet die Umgehung von Hindernissen und Gefahren. Die Makronavigation umfasst dagegen alle Distanzen oberhalb von etwa fünfzig Metern. Verglichen mit der in (Harper & Green, 2000) verwendeten Terminologie erfolgen die Orientierung innerhalb der Mikronavigation und die Wegplanung innerhalb der Makronavigation. Allen Begriffsbildungen ist die Unterteilung der Navigation in einen lokalen und einen globalen Anteil gemein, wobei das lokale Navigationsproblem das Umgehen von Hindernissen und das Vermeiden von potentiellen Gefahrenquellen umfasst. Basierend auf lokal wahrnehmbaren Umgebungsmerkmalen erfolgt die Entscheidung, in welcher Richtung bzw. auf welchem Weg die Route fortgesetzt wird. Der globale Anteil der Navigation beinhaltet die eigentliche Routenplanung und somit die Festlegung der Streckenabschnitte, die für das Erreichen des Ziels bewältigt werden müssen.

In den letzten Jahren haben sich Navigationssysteme von einem teuren Spezialgerät für militärische und professionelle Anwendungen zu erschwinglichen Konsumgütern für jedermann entwickelt. Förderlich für die Entstehung dieses Massenmarktes war die Öffnung des amerikanischen NAVSTAR Global Positioning Systems (GPS) für zivile Anwendungen. Die Öffnung beruht im Wesentlichen auf dem Wegfall einer vom amerikanischen Militär durch Verschlüsselung der Daten künstlich geschaffenen Ungenauigkeit, die eine Positionsbestimmung auf lediglich 100–150 Meter Genauigkeit erlaubte. Mittlerweile ermöglicht GPS abhängig von der Anzahl verfügbarer bzw. sichtbarer Satelliten eine durchschnittliche Genauigkeit von etwa fünfzehn bis fünfundzwanzig Metern. An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich der Begriff Global Positioning System und dessen Kurzform GPS ursprünglich nur auf das amerikanische NAVSTAR-System bezogen, mittlerweile jedoch als Synonym für alle satellitengestützten Navigationssysteme Verwendung finden. Bei notwendigen expliziten Unterscheidungen der verschiedenen Systeme werden die entsprechenden vollständigen Bezeichnungen verwendet, ansonsten wird die Abkürzung GPS synonym für ein satellitengestütztes Navigationssystem benutzt.

Die weiteste Verbreitung haben Systeme für die Fahrzeugnavigation gefunden. Neuere Modelle werden für die Verwendung innerhalb von Fahrzeugen manuell an der Frontscheibe befestigt und sind durch ihre kompakte Größe auch für Fußgänger komfortabel mitzuführen. Zunehmend werden aber auch andere mobile Geräte wie PDA, Smartphones oder Mobiltelefone mit Navigationssoftware ausgestattet. Aktuellere mobile Geräte sind häufig mit einem integrierten GPS-Sensor ausgestattet; ältere Geräte können mit einem extern über Bluetooth angebotenen Empfänger nachgerüstet werden. Durch die Miniaturisierung und die dadurch entstehende Portabilität wird der Bereich der Fußgängernavigation zunehmend erschlossen, so dass eine Navigation für Fußgänger auch in unbekanntem Gebieten ohne ausführliche Vorbereitung möglich ist und eine Erhöhung der allgemeinen Mobilität erfolgt.

Der Einsatz von Navigationssystemen führt für viele Benutzer zu einer entspannteren Reise, da die mentale Belastung der Orientierung in einem unbekanntem Gebiet wesentlich geringer ausfällt. Begründet wird dies durch eine weniger intensive Erfassung der Umgebung, kürzere Vorbereitungszeiten auf den zurückzulegenden Weg und einen durch die Unterstützung des Systems geringeren Stressfaktor (Burnett & Lee, 2005).

Obwohl Navigationssysteme zunehmend für die Fußgängernavigation Anwendung finden, erfolgt die Navigation nach wie vor mit für die Fahrzeugnavigation optimiertem Kartenmaterial. Spezifisch von Fußgängern benötigte Daten wie beispielsweise der Verlauf von Bürgersteigen, der Standort von Ampeln für das sichere Überqueren von Straßen oder der Verlauf von reinen Gehwegen sind nicht verfügbar. Dabei führt gerade die Verwendung von zusätzlichen Informationen wie Landmarken bei der Wegbeschreibung zu einer Erhöhung der Sicherheit von Fußgängern bei der Wahl von Navigationsentscheidungen sowie diesbezüglich zu einer signifikant reduzierten Fehlerrate (Ross, May & Thompson, 2004). Eine der wichtigsten aktuellen Aufgaben ist daher die Bereitstellung von spezifischen Daten und Metadaten für die Fußgängernavigation (May et al., 2003).

Trotz der genannten Einschränkung überwiegen für nicht-mobilitätseingeschränkte Personen die Vorteile die Nachteile, denn allein die für die Fahrzeugnavigation optimierten Anweisungen, an welcher Stelle ein Richtungswechsel vorgenommen werden muss, sind für eine gute Orientierung ausreichend. Das Fehlen bestimmter Informationen kann meist durch das visuelle Erfassen der Umgebung ausgeglichen werden. Zudem stellen strukturelle und bauliche Barrieren für nicht-mobilitätseingeschränkte Personen keine unüberwindbaren Hindernisse dar. Mobilitätseingeschränkte Personen stellen dagegen an Navigationssysteme weitaus höhere Anforderungen, die von den verfügbaren Systemen nur unzureichend erfüllt werden. Einige dieser Anforderungen stellen harte Kriterien hinsichtlich der Verwendbarkeit solcher Systeme dar. Werden derartige Anforderungen wie beispielsweise die Zugänglichkeit der Benutzungsschnittstelle nicht erfüllt, so entfällt ein Nutzen für die jeweilige Benutzergruppe vollständig. Für mobilitätseingeschränkte Benutzer besteht daher bei den derzeitigen verfügbaren Navigationssystemen ein erhebliches Verbesserungspotential.

1.2 Motivation

Die Motivation für die Durchführung dieser Arbeit leitet sich aus der Problemstellung der Fußgängernavigation im Allgemeinen und derjenigen mobilitätseingeschränkter Fußgänger im Besonderen ab. Nachfolgend wird die Problemstellung für die Gruppen der Sehgeschädigten, Rollstuhlfahrer und Senioren exemplarisch erläutert.

Die Gruppe der Sehgeschädigten erfährt bei der Orientierung in unbekanntem Gebieten viele Einschränkungen, da viele Umgebungsmerkmale nicht wahrgenommen werden können und ein Zugang zu öffentlichen Verkehrsmitteln oft mit großen Schwierigkeiten ver-

bunden ist (Golledge, 1993). (Clark-Carter, Heyes & Howarth, 1986) gehen aufgrund eigener Studien davon aus, dass mindestens 30 % der Sehgeschädigten längere Strecken nur in Begleitung zurücklegen. Ein Großteil der Sehgeschädigten, die Strecken alleine bewältigen, bleibt dabei auf bekannten und erlernten Wegen, da die Erkundung unbekannter Gebiete mit einer hohen mentalen Belastung und Orientierungsschwierigkeiten verbunden ist (Hill & Rieser, 1993). Dadurch ist ein stark eingeschränkter Zugang zu beruflichen und bildungstechnischen Aktivitäten bedingt, der unter anderem auf Probleme zurückzuführen ist, die in unmittelbarem Zusammenhang mit der Fähigkeit einer autonomen Fortbewegung und Orientierung in unbekanntem Gebieten stehen (Marston, Golledge & Constanzo, 1997), (Marston & Golledge, 1998) und (Marston & Golledge, 2003). Eine Unterstützung durch Navigationssysteme würde gerade für diese Benutzergruppe zu einer signifikanten Erhöhung der Mobilität führen und zu einer Steigerung der Autonomie bei der Gestaltung des täglichen Lebens beitragen. Derzeit ermöglicht jedoch keines der verfügbaren Navigationssysteme eine Berechnung von speziell für Sehgeschädigte optimierten Routen, da hinreichende Datengrundlagen fehlen. Navigationsanweisungen können daher ebenfalls keine Informationen über Umgebungsmerkmale enthalten, die gerade sehgeschädigten Fußgängern die Orientierung erheblich erleichtern würden.

Rollstuhlfahrer als vielleicht prominenteste Gruppe mobilitätseingeschränkter Fußgänger können im Gegensatz zu Sehgeschädigten die direkte Umgebung ohne wesentliche Einschränkungen visuell erfassen. Für Rollstuhlfahrer stellt sich eine andere Herausforderung bei der Orientierung und Navigation in unbekanntem Gebieten, da eine Route gefunden werden muss, die keine unüberwindbaren strukturellen und baulichen Barrieren aufweist. Derartige Barrieren und Probleme umfassen beispielsweise das Fehlen von Rampen oder zu steile Rampen, schlecht passierbare Untergründe wie matschige oder vereiste Flächen sowie Grasflächen, hohe Bordsteine oder aber die Unpassierbarkeit von Straßen aufgrund zu starkem Verkehrs und fehlenden beampelten Fußgängerquerungen (Meyers et al., 2002). Bei der Verwendung des öffentlichen Personennahverkehrs muss zudem ein barrierefreier Zugang zu den jeweiligen Haltestellen und Verkehrsmitteln gewährleistet sein, der insbesondere bei vielen Straßen- und U-Bahnhaltestellen nicht vorhanden ist. Viele Rollstuhlfahrer vermeiden daher den Besuch unbekannter Gebiete, da ihnen Informationen zur Barrierefreiheit der Umgebung fehlen (Thapar et al., 2004). Obwohl sich Rollstuhlfahrer durch den Einsatz von Navigationssystemen auch in unbekanntem Gebieten orientieren können, ist die Barrierefreiheit und Passierbarkeit der berechneten Routen nicht sichergestellt (Ding et al., 2007).

Senioren stellen eine der größten Gruppen mobilitätseingeschränkter Fußgänger dar, wobei die Faktoren sehr vielschichtig sind, durch die ein negativer Einfluss auf die Mobilität begründet ist. Beispiele umfassen viele altersbedingte Erkrankungen wie Demenz oder ein Nachlassen der Sehkraft, häufig hervorgerufen durch Krankheiten wie der altersbedingten Trübung der Augenlinse (Katarakt) oder Erkrankungen des Sehnervs (zum Beispiel Glaukom). Viele vormals sehr mobile Menschen haben mit zunehmendem Alter Schwierigkei-

ten, sich in unbekanntem Gebieten zurechtzufinden. Dieser Umstand führt zu einer stark erhöhten mentalen Belastung bei der Orientierung und Navigation, wenn der Weg vor Reiseantritt nicht zweifelsfrei bekannt ist. Eine Unterstützung durch Navigationssysteme würde für viele ältere Menschen eine Erleichterung bewirken, ist aber aufgrund der zweidimensionalen Kartendarstellungen in Kombination mit sogenannten „turn-by-turn“-Sprachanweisungen oftmals problematisch. Für viele ältere Menschen ist die Umsetzung der abstrahierten zweidimensionalen Kartendarstellung auf die dreidimensionale Umwelt mit erheblichen Problemen verbunden. Im Gegensatz dazu hat sich die Verwendung von Navigationsanweisungen unter Einbezug markanter Landmarken sowie von Fotos für ältere Menschen als sehr vorteilhaft erwiesen (Goodman, Brewster & Gray, 2005). Die Anforderungen von älteren Menschen bezogen auf die Routenwahl umfassen zudem zusätzliche Kriterien wie beispielsweise die Sicherheit des zurückzulegenden Wegs, da Senioren statistisch gesehen überdurchschnittlich oft von Unfällen betroffen sind und diese in vielen Fällen eine langwierige Rehabilitation zur Folge haben (Mitchell & Suen, 1998).

Mobilitätseingeschränkte Benutzer werden durch derzeit verfügbare Navigationssysteme nur unzureichend unterstützt, da viele der spezifischen Anforderungen nicht erfüllt werden (siehe dazu auch die in Kapitel 3 beschriebenen Benutzeranforderungen). Das für die Navigation eingesetzte Kartenmaterial stellt dabei einen der Hauptgründe für die mangelnde Unterstützung dar, da dieses in wesentlichen Teilen für die Anwendung der Fahrzeugnavigation optimiert ist. Beispielsweise fehlen Daten wie der Standort von speziell für Sehgeschädigte ausgestatteten Ampeln, Angaben über strukturelle Barrieren für Rollstuhlfahrer oder aber Sicherheitseinstufungen von Wegstrecken für ältere Fußgänger. Entsprechend können diese Faktoren weder für die Berechnung von hinsichtlich mehrerer Kriterien optimierten Routen noch für die Generierung alternativer Navigationsanweisungen verwendet werden. Eine Erhebung derartiger Daten durch öffentliche Einrichtungen und Behörden ist wünschenswert, erscheint jedoch gerade im Hinblick auf die damit verbundenen Kosten als unrealistisch. Vielmehr sind neue Verfahren erforderlich, mit denen zusätzliche Daten erhoben werden können, die den Einbezug verschiedener Kriterien für die Routenberechnung und die Generierung erweiterter Navigationsanweisungen erlauben. Verfahren unter Einbezug der Benutzer erscheinen besonders vielversprechend, da die Wahrnehmung von Barrieren und geeigneten Orientierungsmerkmalen bei mobilitätseingeschränkten und nicht mobilitätseingeschränkten Fußgängern stark differiert, wie beispielsweise die Studie von (Vujakovic & Matthews, 1994) belegt.

Entsprechend der genannten Verbesserungspotentiale von Navigationssystemen und insbesondere der Datengrundlage wird in dieser Arbeit ein Verfahren auf Basis multimodaler Annotation entwickelt, welches die Anreicherung geographischer Daten durch die Benutzer selbst erlaubt. Unter dem Begriff Annotation wird vereinfacht die Erweiterung geographischer Daten durch zusätzliche Attribute durch Benutzer verstanden. Annotationen umfassen dabei einfache Points-of-Interest ebenso wie Fotos, Audionachrichten bis hin zu Bewertun-

gen einzelner Wegabschnitte. Eine genaue Begriffsbildung erfolgt in Abschnitt 4. Darauf aufbauend werden Methodiken und Algorithmen entwickelt bzw. untersucht, die eine mehrkriterielle Bewertung von Routen erlauben und somit die Berechnung geeigneter Wege für die Gruppe und für Teilgruppen der mobilitätseingeschränkten Fußgänger ermöglichen. Der Beitrag dieser Arbeit beschränkt sich dabei auf die Entwicklung der genannten Konzepte sowie deren Evaluation. Die Entwicklung eines Navigationssystems mit auf den Konzepten und Verfahren basierenden Erweiterungen liegt außerhalb des Kontextes dieser Arbeit.

1.3 Gliederung der Arbeit

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit werden Systeme für die Orientierung und Navigation von mobilitätseingeschränkten und insbesondere von sehgeschädigten Fußgängern beschrieben, wobei diese im Hinblick auf die genannten Problemstellungen diskutiert werden. Es folgt eine kurze Diskussion des Stands der Technik für die Positionsbestimmung sowie eine Einordnung dieser Technologien nach ihrer Anwendbarkeit für die Fußgängernavigation. Abschließend werden in Kapitel 2 verschiedene Ansätze für die Routenberechnung besprochen.

Aufbauend auf einer Ende des Jahres 2007 durchgeführten Umfrage werden in Kapitel 3 die Benutzeranforderungen von mobilitätseingeschränkten Fußgängern analysiert. Die Anforderungen werden hinsichtlich der folgenden Bereiche diskutiert: benötigte geographische Daten, Positionsbestimmung, Routenberechnungsverfahren, Multimodalität im Sinne des Einbezugs verschiedener Verkehrsmittel sowie temporale Anforderungen. In Kapitel 4 erfolgt die Beschreibung des Verfahrens der multimodalen Annotation geographischer Daten, welches die Basisdaten für die in Kapitel 5 beschriebenen Methoden der multikriteriellen personalisierten Routenberechnung liefert. In diesem Kapitel erfolgt zudem die Beschreibung von Ansätzen zur Konsolidierung von Annotationsdaten mehrerer Benutzer, so dass diese Daten für eine personalisierte und multikriterielle Routenberechnung verwendet werden können.

Die Konzeption einer allgemeinen Systemarchitektur erfolgt in Kapitel 6, in der sowohl die Systemkomponenten der Server- als auch der Clientseite dargestellt werden. Zudem werden die Evaluationsergebnisse hinsichtlich der Performance des in Kapitel 5 vorgestellten Algorithmus auf einem aktuell verfügbaren Smartphone beschrieben und diskutiert. Abschließend erfolgt die Beschreibung der Simulationsumgebung, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, und die als Grundlage für weiterführende Arbeiten Anwendung finden kann.

Die Evaluation des Verfahrens der multimodalen Annotation wird in Kapitel 7 näher beschrieben. Die Evaluation basiert auf einem für mobile Szenarien adaptierten Wizard-of-Oz-Versuchsaufbau und erfolgt mit einem eigens entwickelten Testsystem mit Benutzern aus

den Gruppen der sehgeschädigten Fußgänger, Rollstuhlfahrer und Senioren als auch ein Vergleich zu einer Kontrollgruppe nicht-mobilitätseingeschränkter Benutzer. Abschließend erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse anhand einer strukturierten quantitativen und qualitativen Auswertung der aufgenommenen Datensätze. Kapitel 8 schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsrichtungen.

In einigen Teilen dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf die Gruppe der sehgeschädigten Fußgänger gesetzt. Diese Schwerpunktsetzung, wie sie beispielsweise bei der Durchführung der Umfrage im Zuge der Anforderungsanalyse vorgenommen wurde, führt jedoch nicht zu einer Einschränkung der Anwendbarkeit der vorgestellten Konzepte, so dass eine Gültigkeit der Verfahren für die gesamte Gruppe der mobilitätseingeschränkten Fußgänger erhalten bleibt.

2 Navigationssysteme für Fußgänger

Bestehende Systeme für die Fußgängernavigation unterscheiden sich nicht wesentlich von denjenigen für die Fahrzeugnavigation. Prinzipiell bestehen diese Systeme aus den folgenden Standardkomponenten: Positionierung, Routenplanung, Routenführung (des Benutzers), Datenbank-Management für die Verwaltung der Kartendaten sowie Benutzungsschnittstelle. Systeme für die Fahrzeugnavigation verfügen optional über eine Komponente für die Auswertung von Verkehrsinformationen, so dass gegebenenfalls Bereiche mit sehr hohem Verkehrsaufkommen umfahren werden können.

Die Positionierung erfolgt zumeist GPS-basiert, obgleich aufgrund der zum Teil sehr schlechten Genauigkeit in städtischen Gebieten eine Kombination mit anderen Positionierungsverfahren angestrebt wird. Bei der Fahrzeugnavigation fließen bei fest installierten Systemen zum Teil zusätzliche Sensordaten wie die Geschwindigkeit und die Auswertung der Lenkung in die Positionsberechnungen mit ein, so dass ein schlechter GPS-Empfang ausgeglichen werden kann. Obwohl für die Untersuchungen dieser Arbeit aufgrund des Schwerpunkts eine genügend genaue Positionsbestimmung vorausgesetzt wird, werden in diesem Abschnitt gängige Verfahren und Technologien vorgestellt, die dem Leser einen Eindruck sowohl der verfügbaren Möglichkeiten als auch der Einschränkungen bei der Bestimmung der Position eines Fußgängers vermitteln sollen. Eine Übersicht über gängige Positionierungsverfahren und aktuelle Forschungsaktivitäten ist in Abschnitt 2.1 enthalten. Eine kurze Einführung der von Navigationssystemen verwendeten Datenstrukturen erfolgt in Abschnitt 2.2. Die Berechnung einer Route von einem Start- zu einem Zielort wird in nahezu allen Systemen lediglich in Bezug auf die Länge der Wegstrecke oder die Fahrzeit optimiert. Diese Kriterien sind für die Fußgängernavigation nicht uneingeschränkt geeignet, so dass eine Diskussion klassischer und alternativer Ansätze in Abschnitt 2.3 erfolgt. In Abschnitt 2.4 werden Aspekte der Benutzungsschnittstelle und der Generierung von Navigationsanweisungen innerhalb der Diskussion von Hilfsmitteln behandelt. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass die folgenden Diskussionen immer in Bezug auf die Zielgruppe der mobilitätseingeschränkten Fußgänger erfolgt. Entsprechend werden auch Hilfsmittel für die Mikronavigation für sehgeschädigte Fußgänger behandelt, da diese für eine Navigation als Grundvoraussetzung dienen, auch wenn sie nicht direkt in die Kategorie der Navigationssysteme einzuordnen sind. Abschließend erfolgt in Abschnitt 2.5 die Beschreibung aktueller Systeme und Technologien für die Erweiterung geographischer Daten mit durch Benutzer bereitgestellten Informationen.

2.1 Verfahren zur Positionsbestimmung

Die satellitengestützte Positionsbestimmung ist das am häufigsten eingesetzte Verfahren innerhalb von Navigationssystemen. GPS-Systeme bestehen im Allgemeinen aus drei Segmenten: einem Weltraum-, Kontroll- und Benutzersegment. Das Weltraumsegment umfasst die verfügbaren Satelliten sowie etwaige vorhandene Reservesatelliten. Die Bodenstationen für die Überwachung der Bewegung der Satelliten und zur Zeitsynchronisation bilden das Kontrollsegment, während die zivilen und militärischen Anwender das Benutzersegment darstellen. Für einen Kaltstart benötigen handelsübliche GPS-Sensoren mindestens vier sichtbare Satelliten. Bei einem Kaltstart sind die Ephemeridendaten (Angaben zu Satellitenstatus und -zeit) und Almanachdaten (Angaben zu den Positionen der Satelliten) im GPS-Empfänger nicht bekannt. Entsprechend muss die Übertragung der Almanachdaten durch die Satelliten abgewartet werden, die periodisch etwa alle 12,5 Minuten durchgeführt wird. Wenn die letzte Position bekannt ist, müssen bei einem dann durchgeführten Warmstart lediglich die Ephemeridendaten aktualisiert werden, so dass eine erste Positionsbestimmung nach etwa 45 Sekunden erfolgen kann. Wenn schließlich die Position der Satelliten bekannt ist (d.h. auch die Almanachdaten sind aktuell), kann der Abstand des Empfängers zu den einzelnen Satelliten durch die Auswertung der jeweiligen Signallaufzeit erfolgen.

Die eigentliche Berechnung der Position erfolgt mittels Triangulationsverfahren. Bei der Verfügbarkeit von drei Satelliten können Längen- und Breitengrad und bei Verfügbarkeit von mindestens vier Satelliten zusätzlich die Höhe über Normal Null berechnet werden. Abbildung 2.1 auf der folgenden Seite zeigt schematisch die Berechnung der Position eines Anwenders. Dieser empfängt das Signal von vier Satelliten und kann aus den Signallaufzeiten Δt_1 bis Δt_4 die jeweilige Entfernung zu den Satelliten bestimmen. Da die Positionen der Satelliten aufgrund der Almanachdaten bekannt sind, lassen sich die gesuchten Größen X_{Anw} , Y_{Anw} und Z_{Anw} relativ zum Ursprung des verwendeten Bezugssystems berechnen. Bei der GPS-basierten Navigation wirkt sich jedoch die Notwendigkeit einer freien Sicht auf die Satelliten nachteilig aus, was besonders in städtischen Gebieten den Einsatz von GPS erschwert, da die Signale an Gebäudefassaden reflektiert werden können. Eine Übersicht der Probleme und Lösungsansätze von Verfahren zur GPS-basierten Positionsbestimmung innerhalb von Gebäuden ist in (Lachapelle, 2004) zu finden, wobei sich die Anwendung in Gebäuden insgesamt als nicht praktikabel erwiesen hat.

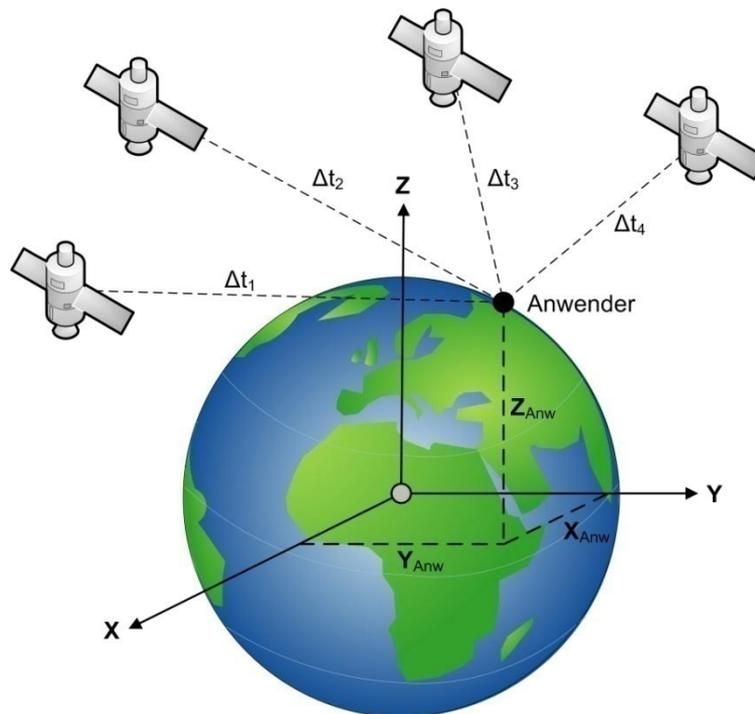


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der satellitengestützten Positionsbestimmung

Für die Navigation wird derzeit fast ausschließlich das amerikanische NAVSTAR GPS-System verwendet, wogegen das von Russland als Konkurrenzprodukt entwickelte GLONASS-System lediglich eine untergeordnete Rolle spielt. Das NAVSTAR-System arbeitet mit 29 Satelliten und ermöglicht eine Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von 15–25 Metern. Um eine Unabhängigkeit von dem vom amerikanischen Militär betriebenen NAVSTAR-System zu erreichen, wird von der Europäischen Union das Galileo-System entwickelt, wobei derzeit lediglich erste Testsatelliten verfügbar sind. Mit einer flächendeckenden Verfügbarkeit des Galileo-Systems ist erst in einigen Jahren zu rechnen. In Kombination mit dem kompatiblen NAVSTAR-System werden Genauigkeiten von etwa vier Metern sowie eine deutlich erhöhte Verfügbarkeit insbesondere in städtischen Gebieten für den Normalverbraucher erwartet, so dass insbesondere Anwendungen wie die Fußgänger-navigation von der Bereitstellung des Galileo-Systems profitieren werden (Hunaiti et al., 2006).

Navigationssysteme werden von Fußgängern vorwiegend in städtischen Gebieten angewendet, wo eine freie Sicht auf die Satelliten zumeist nur unzureichend gewährleistet ist und somit die Genauigkeit der Positionsbestimmung nachlässt. Assisted GPS (A-GPS) ist ein Verfahren, bei dem Mobiltelefone mit integriertem GPS-Empfänger mit zusätzlichen Informationen von den Netzbetreibern versorgt werden. Diese Informationen verlagern die notwendige Rechenleistung vom mobilen Endgerät zum Netzbetreiber und ermöglichen aufgrund der besseren Sichtbarkeit der Satelliten von den Sendemasten eine genauere Positionsbestimmung des Mobiltelefons (Richton, Vannucci & Wilkus, 2002). Allerdings hat

sich A-GPS zumindest in Europa nicht durchgesetzt, da die Endgeräte die Berechnungen mittlerweile ohne große Verzögerungen selbständig durchführen können und die ohne die Verwendung von A-GPS erreichte Positionsgenauigkeit für die vorherrschenden Anwendungen ausreichend ist. Im amerikanischen Raum spielt A-GPS eine größere Rolle, da gesetzliche Vorschriften eine Ortung des Mobiltelefons bei Notrufen erfordern.

Differential GPS (D-GPS) stellt eine in Europa oft verwendete Alternative für die genaue Ortsbestimmung dar. Dabei werden Korrektursignale von terrestrischen Referenzstationen in die Berechnung der aktuellen Position einbezogen, so dass sich je nach verwendetem Dienst eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern bis zu 2,5 Metern erreichen lässt (Kaplan & Hegarty, 2005). In Deutschland werden die Referenzstationen von den Landesvermessungsämtern betrieben und der entsprechende Dienst unter dem Namen Sapos¹ angeboten. Der Dienst ist kostenpflichtig, wobei die Kosten abhängig von der gewünschten Genauigkeit sind. Obwohl sich der Dienst für die Fußgängernavigation sehr gut eignen würde, hat sich eine Verwendung bisher nicht durchgesetzt, da die Empfangsgeräte sehr kostspielig und für ein bequemes Mitführen zu unhandlich sind.

Einen anderen Ansatz verfolgen sogenannte Dead-Reckoning-Systeme, die ausgehend von einer bekannten Position relative Ortsänderungen mittels verschiedener Sensoren erfassen und auswerten. Meist integrieren derartige Sensoren einen Beschleunigungsmesser, einen Schrittzähler sowie einen digitalen Kompass. Dead-Reckoning-Systeme werten die jeweilige Richtung des Fußgängers aus und berechnen aufgrund einer Schätzung der Schrittlänge die zurückgelegte Strecke und die resultierende Position. Beispiele für derartige Systeme sind in (Lee & Mase, 2002), (Randell, Djiallis & Muller, 2003) oder (Lachapelle, 2007) beschrieben, wobei das in (Foxlin, 2005) vorgestellte System aufgrund seiner Miniatürisierung sogar in einen Schuh integriert wurde. Die Minimierung von Abweichungen bei der Messung der Orientierung und Schrittlänge ist als eine der dringlichsten Problemstellungen Gegenstand vieler Forschungsarbeiten. So wird in (Jirawimut et al., 2003) ein auf Kalman Filtern basierendes Verfahren für die Schätzung der Abweichungen beschrieben, welches insgesamt vielversprechende Ergebnisse insbesondere in Kombination mit einer GPS-basierten Ortsbestimmung liefert. (Beauregard & Haas, 2006) beschreiben ein ähnliches Korrekturverfahren, bei dem die Berechnung der Abweichung über trainierte neuronale Netze erfolgt. Als quantifizierbares Ergebnis wurde bei der Positionsbestimmung ein Fehler von unter 2% der zurückgelegten Strecke nach einer Gesamtstrecke von vier Kilometern angegeben, was insbesondere in Kombination mit einer GPS-basierten Ortsbestimmung zu sehr guten Ergebnissen führt. Bisher hat jedoch keine weitreichende Integration von Dead-Reckoning-Systemen in Navigationsgeräte stattgefunden.

¹ Sapos-Dienst der Landesvermessungsämter: <http://www.sapos.de/>

Unter der Annahme, dass die Positionen von WLAN Access Points bekannt sind, kann die Bestimmung der Position durch die Auswertung von WLAN-Signalstärken erfolgen, so dass durch eine Positionsbestimmung mittels Triangulation zumindest eine teilweise Kompensation bei unzureichender GPS-basierter Ortsbestimmung möglich ist. Die meisten Arbeiten und Entwicklungen wie etwa (Wallbaum, 2007) beinhalten dabei ausschließlich die Auswertung der Signalstärke bekannter WLAN Access Points. Der Fehler in freiem Gelände liegt bei den klassischen Verfahren bei circa 15–40 Meter (Cheng et al., 2005). Verbesserungen werden durch die zusätzliche Auswertung der Signalstärke des Empfangsgerätes auf Seiten des Access Points (Yeung & Ng, 2007) oder durch den Einsatz von den Methoden Time-of-Arrival (TOA) und Time-Difference-of-Arrival (TDOA) Methoden erreicht (Golden & Bateman, 2007). Bei den letztgenannten Verfahren sendet das mobile Endgerät eine festgelegte Anfrage an den Access Point und berechnet die Signallaufzeit bis zum Empfang der Antwort (TOA). Gleichzeitig berechnet der Access Point die Zeit, die zwischen Empfang der Anfrage und Senden der Antwort vergeht und übermittelt diese Information an den Sender (TDOA). Das System zeigte bei Testläufen innerhalb von Gebäuden eine vielversprechende Genauigkeit von 2–6 Metern. Für einen breiten Einsatz des Verfahrens sind jedoch Standardisierungen notwendig, da Änderungen in der Firmware bzw. kleinere Änderungen der Hardware der beteiligten Sender und Empfänger erforderlich sind.

2.2 Datengrundlagen

Das Kartenmaterial bildet eine wichtige Grundlage jedes Navigationssystems. Als Datenmodell für die Verwaltung strukturierter Straßennetze dient das standardisierte GDF-Format (Geographic Data Files), welches in der ISO/DIS-Norm 14825:2004 beschrieben ist. Die beiden führenden Anbieter von Straßenkarten Navteq und Tele Atlas stellen ihr Kartenmaterial unter anderem unter Verwendung dieses Formats bereit. Das GDF-Datenmodell ist in drei Ebenen gegliedert:

1. *Topologie*: geometrische Objekte (Punkte, Linien und Flächen)
2. *Attribute (Features)*: Eigenschaften von geometrischen Objekten
3. *zusammengesetzte Attribute (Complex Features)*: Aggregation von Attributen

Innerhalb der Topologie-Ebene sind die geometrischen Objekte enthalten, wobei diese Punkte, Linien und Flächen umfassen. Die zweite Ebene beinhaltet Attribute (Features), die den geometrischen Objekten zugeordnet werden können. Das GDF-Format definiert standardisierte Attribute, erlaubt jedoch auch die Erweiterung um herstellerspezifische Attribute. Durch die Zuordnung von Attributen werden geometrische Objekte weiter spezifiziert, so dass beispielsweise die Zuordnung des standardisierten Attributs ‚Road Element‘ zu einem Linienobjekt dieses als Straße kenntlich macht. In der dritten Ebene werden Attribute

schließlich zu zusammengesetzten Attributen aggregiert. Beispiele für zusammengesetzte Attribute sind Bundesländer, die wiederum aus mehreren Landkreisen bestehen, oder Städte, die ihrerseits aus mehreren Stadtteilen bestehen.

Abbildung 2.2 zeigt beispielhaft die Umsetzung realer Topologien in Datenstrukturen. Straßenkreuzungen und -abzweigungen werden in Punkte, Straßen selbst in Linien umgewandelt. Punkte und Linien werden mit zusätzlichen Informationen wie etwa dem Straßennamen attribuiert. Die entstehende Datenstruktur ist ein Graph bzw. ein Netzwerk bestehend aus Knoten und Kanten, so dass sich für die Routenberechnung klassische Standardalgorithmen sowie deren Erweiterungen anwenden lassen.

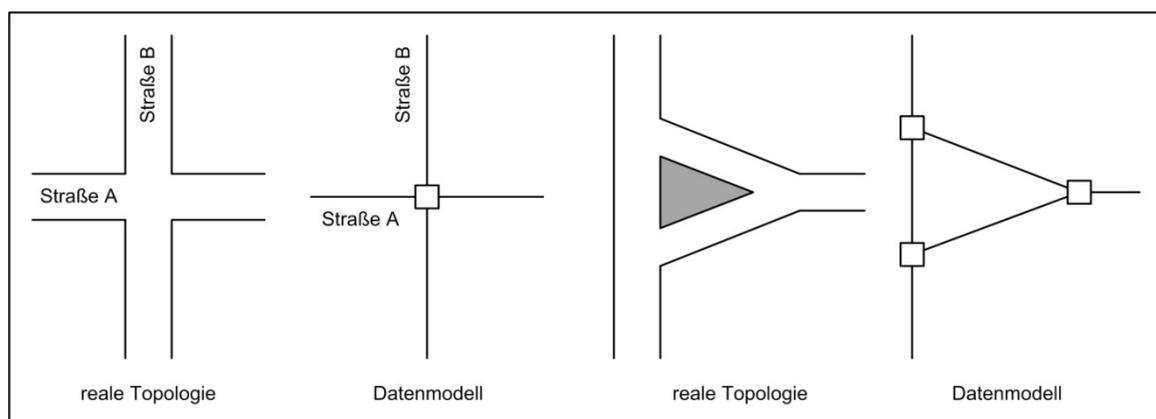


Abbildung 2.2: Umsetzung von realer Topologie in Datenstrukturen

Das Kartenmaterial wird für Navigationssysteme zumeist auf CD oder DVD angeboten. Die von den Systemen benötigten Formate sind herstellerabhängig, da das GDF-Format lediglich als Grundlage dient. Bezogen auf die Fußgängernavigation zeigen schon die in Abbildung 2.2 dargestellten Beispiele, dass die kommerziell verfügbare Datenbasis erweitert werden muss. Obwohl die genaue Topologie des Straßennetzwerks vorhanden ist und sich Aussagen wie die Unzugänglichkeit von bestimmten Straßen wie Autobahnen über die Auswertung der Attributierung ableiten lassen, fehlen wichtige Informationen wie die genaue Führung von Bürgersteigen oder anderer ausschließlich für Fußgänger zugänglicher Bereiche. Insgesamt ist eine direkte Verwendung des kommerziell verfügbaren Kartenmaterials insbesondere für mobilitätseingeschränkte Fußgänger nur unzureichend möglich, obgleich selbst das Kartenmaterial von speziell für sehgeschädigte Fußgänger entwickelten Navigationsgeräten auf diesen Daten basiert. Für eine detaillierte Analyse der Anforderungen von Fußgängern an die Datenbasis siehe Kapitel 3.

Eine weitere Quelle für den Bezug von Kartendaten sind die Vermessungsämter der Städte und Länder. Bei diesen sind die Daten über die jeweils zugehörigen Flächen in digitaler Form zumeist im ESRI-Shape-File- oder GDX-Format erhältlich. Der Bezug derartigen Kartenmaterials ist sehr kostenintensiv, ermöglicht aber den Einbezug weiterer Details

wie etwa der genauen Lage von Bürgersteigen oder dem Standort von Haltestellen des öffentlichen Nahverkehrs. Aufgrund des Formats ist es jedoch nicht möglich, die einzelnen Elemente automatisch in eine navigierbare Datenstruktur zu überführen, so dass ein sehr großer manueller Aufwand bei der Erstellung von für die Navigation mobilitätseingeschränkter Fußgänger geeigneten Wegenetzwerken entsteht.

Die Firma Ludwig und Schwefer GmbH² hat das mobile Erfassungssystem *eagle eye* mit direktem Lage- und Höhenbezug entwickelt, welches für die Aufnahme und Bewertung der Infrastruktur verwendet werden kann. Die kameragestützten Messsysteme sind auf ein Fahrzeug montiert (siehe Abbildung 2.3) und können sowohl für die Bestands- als auch für die Zustandsdatenerfassung eingesetzt werden.



Abbildung 2.3: Mobiles Messsystem (links) und Auswertung der Aufnahmen (rechts)
Quelle: Ludwig und Schwefer GmbH

Das System ermöglicht eine sehr genaue automatische Erfassung von digitalen Kartendaten, wie sie auch für die Fußgängernavigation notwendig sind. Beachtet werden müssen jedoch die relativ hohen Kosten für das System. Zudem ist eine flächendeckende Aufnahme der Kartendaten aufgrund der benötigten Zeit kaum möglich, so dass ein Einsatz nur für ausgewählte Bereiche praktikabel erscheint.

Die Aktualität des verfügbaren Kartenmaterials ist ein zusätzliches Kriterium für die Verwendbarkeit für die Fußgängernavigation. Die komplette Überarbeitung der Daten durch Anbieter und Vermessungsämter erfolgt meist in einem Zyklus von ein bis fünf Jahren, wobei sich die Intervalle nach der Wichtigkeit der Straßenabschnitte richten. Entsprechend werden neu gebaute Autobahnabschnitte wesentlich früher in das Kartenmaterial integriert als Straßen kleiner Neubaugebiete. Große Hersteller von Navigationssystemen wirken diesem Problem mit der Entwicklung neuer Technologien entgegen. So bietet beispielsweise TomTom mit MapShare einen Dienst, der es Benutzern erlaubt, Kartendaten zu aktualisieren und diese anderen Benutzern zur Verfügung zu stellen. Weitere Angebote umfassen die

² Ludwig und Schwefer GmbH: <http://www.ls-soest.de/>

Bereitstellung von Points-of-Interest oder besonderer Routen, die zum Beispiel ausgesuchte Sehenswürdigkeiten in einer Urlaubsregion beinhalten. Das Angebot dieser Dienste spiegelt den Bedarf an aktuellen und zusätzlichen Informationen wieder, der durch das standardmäßig ausgelieferte Kartenmaterial nicht ausreichend befriedigt wird. Zu einem Großteil sind diese Dienste jedoch kostenpflichtig und bilden die Grundlage einer längerfristigen Kundenbindung für Hersteller von Navigationssystemen.

Derzeit verfügbare Kartendaten bilden eine gute Grundlage für Navigationssysteme. Die Anforderungen mobilitätseingeschränkter Benutzer, wie sie in Kapitel 3 näher beschrieben werden, werden jedoch nur unzureichend erfüllt. Es fehlen insbesondere zusätzliche für Fußgänger relevante Daten sowie eine feinere Granularität. Das Fehlen dieser spezifischen Daten ist derzeit durch das Hauptanwendungsgebiet der Fahrzeugnavigation begründet. Es besteht somit ein Bedarf an Verfahren, um vorhandenes Kartenmaterial mit für Fußgänger und insbesondere für mobilitätseingeschränkte Fußgänger relevanten Daten anzureichern.

2.3 Routenplanung und -berechnung

Die Berechnung einer Route bildet einen der Hauptbestandteile von Navigationssystemen. Das verfügbare und zumeist als reine Straßennetzwerke vorhandene Kartenmaterial liegt in Bezug auf die Datenstruktur meist als Graph vor. Daher lassen sich als Grundlage für die Berechnung einer Route klassische Shortest-Path-Algorithmen wie der Dijkstra-Algorithmus (Dijkstra, 1959) oder A*-Algorithmus (Hart, Nilsson & Raphael, 1968) verwenden, für die jedoch eine Gewichtung der Kanten des Netzwerks bestimmt werden muss. Für die Berechnung wenden kommerzielle Systeme der Fahrzeug- und Fußgängernavigation hauptsächlich die Kriterien *zurückzulegende Entfernung* und / oder *benötigte Zeit* als Gewichtung an. Viele der aktuellen Forschungsarbeiten befassen sich aufgrund der für die Fahrzeugnavigation sehr großen Straßennetzwerke hauptsächlich mit der Entwicklung von Algorithmen, mit denen Routen effizienter berechnet werden können. Klassische Algorithmen wie die oben genannten berechnen zumeist die Kosten der Pfade eines Knotens zu allen anderen Knoten. Ein Überblick neuerer Arbeiten ist in (Ghiani et al., 2003) zu finden. Bei der Fahrzeugnavigation werden hinsichtlich der Kriterien, die an einen Weg gestellt werden, mittlerweile jedoch auch weiterführende Ansätze verfolgt. So werden beispielsweise in (Winter, 2001) die Anzahl und der Umfang der Richtungswechsel in die Bewertung der Route mit einbezogen. Weitere Beispiele für Bewertungskriterien umfassen die Komplexität der Navigationsanweisungen (Duckham & Kulik, 2003) sowie die Bevorzugung von Routen, die dem Benutzer bekannte Landmarken beinhalten (Patel et al., 2006).

Zunehmend gewinnen Verfahren an Bedeutung, mit denen gerade bei der Fahrzeugnavigation eine dynamische Anpassung der Routen an Verkehrsgegebenheiten ermöglicht wird. TomTom High Definition Traffic verwendet beispielsweise die Bewegungsprofile der Mo-

biltelefone von angemeldeten Benutzern, um Aussagen über Regionen mit großen Verkehrsaufkommen und stockendem Verkehr abzuleiten. Bewegen sich auf einer Straße viele der Benutzer nur sehr langsam, kann auf sehr dichten Verkehr geschlossen werden. Diese Informationen können in eine dynamische Routenberechnung einfließen, so dass ein Autofahrer um diese Gebiete geleitet werden kann. Dieser kostenpflichtige Dienst wird von TomTom bereits in den Niederlanden in Kooperation mit Vodafone angeboten.

Bezogen auf die Fußgängernavigation hängt die Wahl einer für den Benutzer günstigen Route zusätzlich von weiteren Kriterien ab, wie u.a. die Ergebnisse einer Reihe von aktuellen Forschungsarbeiten zeigen. (Yao & Fickas, 2007) schlussfolgern in ihrer Arbeit, dass eine Personalisierung insbesondere der Routenauswahl für Fußgänger unabdingbar ist, da ansonsten eine signifikante Verminderung der Effektivität und Nutzerakzeptanz bei der Verwendung auftritt. Bei dem von (Akasaka & Onisawa, 2003) sowie (Akasaka & Onisawa, 2005) entwickelten Prototypen erfolgt die Routenauswahl aufgrund der subjektiven Präferenzen des Benutzers, die unter Verwendung von Fuzzy-Maßen und -Integralen bewertet werden und die dem System durch den Benutzer zugeführt werden. Ein anderer Ansatz wird in (Kawabata et al., 2005) sowie (Kawabata et al., 2005a) verfolgt, wobei die Routenberechnung im dort vorgestellten Navigationssystem von der aktuellen Situation und dem Kontext des Benutzers abhängig ist. So wird beispielsweise bei der Routenberechnung für einen Benutzer mit Kinderwagen der Einbezug von sehr stark frequentierten Straßenzügen möglichst vermieden. In (Costelloe, Mooney & Winstantley, 2001) erfolgt die Berechnung von Wegen in Transportnetzwerken bezüglich mehrerer Kriterien wie der Länge des Wegs, der entstehenden Kosten und der Anzahl der Verkehrsmittelwechsel, wobei multikriterielle Optimierungsverfahren angewendet werden. (Fernandez et al., 1999) wenden multikriterielle Verfahren für die Routenberechnung von autonomen Robotern innerhalb von Gebäuden an, wobei die die Länge des Wegs, der Energieverbrauch, die Zugänglichkeit des Weges sowie zeitliche Aspekte als Kriterien herangezogen werden.

Multikriterielle Verfahren werden in jüngerer Vergangenheit zunehmend eingesetzt, um Wege und Routen auch für Fußgänger hinsichtlich mehrerer durchaus diametral zueinander stehender Kriterien zu bestimmen und zu bewerten. In (Rinner & Raubal, 2004), (Raubal & Rinner, 2004) sowie (Bäumer, Panov & Raubal, 2007) wird eine Multikriterienanalyse auf das Problem der Hotelauswahl in einem Umkreis von fünfhundert Metern um einen Touristen untersucht. Der Tourist kann auf einem mobilen Gerät seine Präferenzen hinsichtlich Zimmerpreis, eigenem Waschraum / WC und der Zeit für das morgendliche Auschecken angeben. Die Präferenzen werden für die Bestimmung des am besten geeigneten Hotels verwendet, wobei die Route letztlich nur hinsichtlich der kürzesten Strecke berechnet wird. Die Arbeit ist eine der wenigen, die Multikriterienverfahren und ortsbasierte Dienste kombinieren, wendet die Verfahren jedoch nur indirekt auf die Routenberechnung an. Mathematische Grundlagen sowie aktuelle Forschungsarbeiten im Bereich der multikriterielle Rou-

tenberechnung sind schließlich in (Martins, 1984), (Granat & Guerriero, 2003), (Pangilinan & Janssens, 2007) und (Tarapata, 2007) zu finden.

2.4 Hilfsmittel für Orientierung und Navigation

Die Entwicklung von Hilfsmitteln für die Unterstützung der Orientierung und Navigation mobilitätseingeschränkter und insbesondere sehgeschädigter Menschen ist Thema vieler kommerzieller und wissenschaftlicher Arbeiten und Entwicklungen. Fast alle Hilfsmittel und Systeme bieten zumeist nur eine einseitige Unterstützung des Benutzers bei der Mikro- oder Makronavigation, so dass zumindest bei blinden Benutzern für eine vollständige Unterstützung der Navigationsaufgabe mindestens zwei Hilfsmittel gleichzeitig verwendet werden müssen. Andere Gruppen mobilitätseingeschränkter Fußgänger benötigen dagegen lediglich eine Unterstützung der Makronavigation, da die Mikronavigation über die visuelle Wahrnehmung ausreichend unterstützt wird.

Das aus einem Studentenprojekt entstandene Navigationssystem Trailblazers³, welches unter anderem von Microsoft finanziell unterstützt wurde, bietet Rollstuhlfahrern die Möglichkeit, barrierefreie Wege aufzuzeichnen und an einen zentralen Server zu übermitteln. Dieser stellt die barrierefreien Wege anderen Benutzern zur Verfügung, so dass Rollstuhlfahrer sich auf Basis dieser Daten einen Weg ohne unüberwindbare Hindernisse berechnen lassen können. Mittlerweile wurde Trailblazers als Open Source Software freigegeben, nachdem die ursprünglich geplante kommerzielle Weiterentwicklung eingestellt wurde. Wissenschaftliche Arbeiten umfassen (Kurihara, Nonaka & Yoshikawa, 2004), (Sobek & Miller, 2006) und (Ding et al., 2007), wobei die vorgestellten Systeme dem Trailblazers Navigationssystem konzeptionell sehr ähnlich sind.

Hilfsmittel für die Unterstützung der Mikronavigation für sehgeschädigte Menschen umfassen u. a. den Blindenlangstock sowie den Blindenführhund und werden für die Vermeidung von unmittelbaren Hindernissen und Unwägbarkeiten benötigt. Der Blindenlangstock wird für die taktile und akustische Erkundung der direkten Umgebung verwendet, wobei die so gewonnen Informationen von blinden Fußgängern für die Bestimmung des aktuellen Orts verwendet werden können. Der Blindenlangstock erlaubt lediglich die Erkundung des vorausliegenden Gehwegs, so dass blinde Fußgänger nicht vor in Brust- und Kopfhöhe befindlichen Hindernissen gewarnt werden. Der sogenannte Ultracane (Hoyle et al., 2004) besteht aus einem Blindenlangstock mit einem Aufsatz, der mittels Ultraschallsensoren einen weiteren Bereich erfasst, als dies mit einem gewöhnlichen Langstock über taktile Impulse möglich ist. Der Ultracane ermöglicht eine frühzeitige Wahrnehmung von Hindernissen und eine Überwachung des Bereichs in Brust- und Kopfhöhe. Meldungen über vorhandene Hinder-

³ Trailblazers-Projekt: <http://www.trailblazers.de>

nisse erfolgen dabei taktil über Vibrationssensoren auf dem Griff des Ultracane. Der Ultracane ist als kommerzielles Produkt verfügbar und wird von der britischen Firma Sound Foresight Ltd.⁴ vertrieben. Abbildung 2.4 zeigt den Griffaufsatz mit den integrierten Ultraschallemittern und -sensoren.



Abbildung 2.4: Ultraschall-Griffaufsatz des Blindenlangstocks Ultracane
Quelle: Sound Foresight Ltd.

Die Entwicklung speziell auf die Bedürfnisse sehgeschädigter Benutzer angepasster GPS-basierter Navigationssysteme ist seit vielen Jahren Thema von Forschungsaktivitäten und -projekten. Eines der ersten Systeme ist in (Loomis J. M. et al., 1994) beschrieben, wobei viele grundlegende Arbeiten bereits in den 80er Jahren durchgeführt wurden (Loomis J. M., 1985), (Collins, 1985) und (Brusnighan et al., 1989). Das von Loomis et al. beschriebene System besteht aus den klassischen Komponenten eines Navigationssystems: einer Positions- und Orientierungsbestimmung mittels Differential GPS und digitalen Kompasses, einem geographischen Informationssystem zur Verwaltung der geographischen Daten sowie einer Komponente zur Generierung von Navigationsanweisungen und einer Benutzungsschnittstelle, die über eine akustische Ausgabe und eine vereinfachte Tastatur für die Eingabe verfügt. Die damaligen Ergebnisse waren vielversprechend, der Schwerpunkt der Arbeit bestand jedoch darin, blinde Benutzer innerhalb eines festgelegten Kanals zu führen.

Das MoBIC-Projekt ist ein weiteres Forschungsprojekt, in dem ein GPS-basiertes Navigationssystem speziell für sehgeschädigte und ältere Benutzer entwickelt wurde (Strothotte et al., 1996) und (Petrie et al., 1996). Der Aufbau des Systems ähnelt dem zuvor beschriebenen, verfügt jedoch zusätzlich über das sogenannte MoBIC Pre-Journey System (MoPS), welches dem Benutzer die Erkundung und Planung der Route im Vorfeld erlaubt. Ein weiterer Unterschied zu den genannten und anderen Systemen, wie beispielsweise dem in (Fruchterman, 1995) beschriebenen, ist die Aufnahme von für die spezifischen Benutzergruppen hilfreichen geographischen (Meta-)Daten, die eine Anreicherung der Navigationsanweisungen um zusätzliche Informationen ermöglichen. Das MoBIC-System ermöglicht

⁴ Ultracane der Sound Foresight Ltd.: <http://www.soundforesight.co.uk/new/ultracane.htm>

zudem eine Routenberechnung hinsichtlich drei verschiedener Kriterien: Länge des Weges, Sicherheit des Weges und Vermeidung von Treppen. Allerdings erfolgt die Routenberechnung jeweils isoliert für jeweils nur ein Kriterium. Obwohl beide damals vorgestellte Systeme aufgrund ihrer Größe sehr auffällig sind und in einem Rucksack vom Benutzer mitgeführt werden müssen, bilden sie dennoch die Grundlage für spätere Entwicklungen wie etwa (Loomis, Golledge & Klatzky, 2001) und (Loomis et al., 2005) und Erweiterungen wie beispielsweise Drishti (Helal, Moore & Ramachandran, 2001) und (Ran, Helal & Moore, 2004).

Innerhalb des Projekts MAPPED⁵ wurde ein speziell auf die Bedürfnisse behinderter Menschen angepasstes mobiles System für die Routenplanung entwickelt⁶. Besondere Anpassungen wurden unter anderem bei der Benutzungsschnittstelle vorgenommen, so dass die besonderen Bedürfnissen behinderter Benutzer berücksichtigt werden. Das System erlaubt Benutzern das Hinzufügen von Hindernissen (Augmentierungen), so dass diese bei der Berechnung barrierefreier Routen berücksichtigt werden können. Die Routenberechnung wird somit um ein weiteres Kriterium erweitert. Derzeit sind jedoch keine weiterführenden Informationen über die genaue Realisierung der Routingkomponente verfügbar, so dass kein Vergleich zu dem in dieser Arbeit entwickelten Konzepten gezogen werden kann. Aufgrund der verfügbaren Informationen ist jedoch davon auszugehen, dass keine Strategien zur Konsolidierung der von den Benutzern gelieferten Daten erfolgt. Zudem beschränkt sich die Verwendung von Nutzerdaten ausschließlich auf Hindernisse. Ein allgemeiner Ansatz, wie er in dieser Arbeit vorgestellt wird, ist auf Basis der verfügbaren Informationen nicht erkennbar. Innerhalb des Projekts ASK-IT⁷ wurden ebenfalls Technologien entwickelt, die eine Relevanz für diese Arbeit aufweisen. Die Ergebnisse der Entwicklung des relevanten Moduls zur barrierefreien Zielführung und Routenberechnung sind jedoch vertraulich und nicht öffentlich zugänglich. Eine Diskussion der Ergebnisse ist somit nicht möglich.

Innerhalb der an der Universität Graz durchgeführten Projekte Pontes und Odilia (Pressl, Mayerhofer & Wieser, 2007) wurde ein Prototyp für die GPS-basierte Zielführung von blinden und sehbehinderten Fußgängern entwickelt. Dieser integriert zusätzlich einen Bewegungssensor der Schweizer Firma Vectronix AG⁸. Einen Schwerpunkt bildete die Erstellung von angereichertem Kartenmaterial, wobei die Kartenbasis manuell durch zusätzliche Informationen wie Daten über Hindernisse erweitert wurde, was die Erstellung jedoch sehr aufwendig und entsprechend kostenintensiv macht. Das System erlaubt die Berechnung von Routen anhand zwei verschiedener Kriterien: Länge und Sicherheit des Weges. Die Kriterien werden jedoch ebenso wie im MoBIC-Projekt lediglich isoliert betrachtet.

⁵ MAPPED Projekt: <http://services.txt.it/MAPPED/>

⁶ siehe dazu auch den finalen Report des Projekts unter http://services.txt.it/MAPPED/resources/MAPPED_Final_Report.zip

⁷ Ask-It Projekt: <http://www.ask-it.org/index.php?page=index>

⁸ Lokalisierungssensor der Vectronix AG: <http://www.vectronix.ch/index.php?show=50>

Speziell angepasste Navigationssysteme sind derzeit die einzigen vollwertigen Hilfsmittel für die Unterstützung von sehgeschädigten Fußgängern bei der Makronavigation. Die beiden bekanntesten kommerziellen Produkte sind Trekker der kanadischen Firma Humanware⁹ und das Sendero GPS der amerikanischen Firma Sendero Group¹⁰. Beide Systeme sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Das Trekker-Navigationssystem basiert auf einem Standard-PDA, dessen berührungsempfindlicher Bildschirm durch eine aufgesetzte Tastatur verdeckt wird. Die einzelnen Tasten sind dabei so aufgebaut, dass ein Druck direkt auf den Bildschirm übertragen wird und die darunter positionierten Bedienelemente ausgelöst werden. Trekker kann mittels eines Trageriemens, an dem zusätzlich der GPS-Empfänger und ein kleiner Lautsprecher für die akustische Ausgabe der Navigationsanweisungen angebracht sind, bequem über der Schulter mitgeführt werden. Sendero GPS verwendet für die Ausgabe eine tragbare Braillezeile, die jedoch im Vergleich mit dem Trekker deutlich größer ist. Als alternative Ausgabe steht ebenfalls eine Sprachsynthese bereit.



Abbildung 2.5: Trekker (links) und Sendero GPS (rechts)

Im Gegensatz zu für den Massenmarkt entwickelten Navigationssystemen verfügen beide Systeme über einen sogenannten Explorationsmodus. Dieser kann für das Erkunden von Wegen verwendet werden, so dass der Benutzer im Vorfeld einer Reise einen Überblick der Route erhält. Eine der wichtigsten zusätzlichen Funktionen ist die sogenannten „Wo bin ich?“-Funktion, die es dem Benutzer jederzeit ermöglicht, sich Informationen über den aktuellen Standort ausgeben zu lassen. Diese Funktion wird von Benutzer immer dann häufig verwendet, wenn Unsicherheiten bezüglich der eigenen Position bestehen. Trekker bietet zudem einen sogenannten Fahrzeugmodus. Verwendung findet dieser beispielsweise während Busfahrten und ermöglicht den Benutzern, die gewünschte Haltestelle rechtzeitig zu erkennen, wenn akustische Ansagen schwer verständlich oder nicht vorhanden sind.

Sowohl Trekker als auch Sendero GPS verwenden als Datenbasis aufbereitetes Kartenmaterial kommerzieller Distributoren wie Navteq oder Tele Atlas, so dass eine sehr große Reichweite des verfügbaren Kartenmaterials gewährleistet werden kann. Nachteilig ist jedoch, dass das verwendete Kartenmaterial für die Fahrzeugnavigation optimiert ist und so-

⁹ Humanware: <http://www.humanware.com/en-europe/home>

¹⁰ Sendero Group LLC: <http://www.senderogroup.com/>

mit viele Anforderungen von sehgeschädigten Fußgängern nicht erfüllt sind. Beispielsweise sind die Navigationsanweisungen den für die Fahrzeugnavigation verwendeten sehr ähnlich und enthalten lediglich die Information, in welcher Entfernung ein Einbiegen in einer Querstraße erfolgen oder eine kreuzende Straße überquert werden muss. Beide Systeme ermöglichen ihren Benutzern das Speichern von eigenen Points-of-Interest zusammen mit zusätzlichen Informationen. Diese Daten lassen sich anschließend mit anderen Nutzern teilen, so dass im Vorfeld einer Reise die Datenbasis für den Zielort erweitert werden kann. Für die Routenberechnung verwenden beide Systeme die Länge des Weges als Optimierungskriterium, so dass eine Personalisierung hinsichtlich anderer Kriterien wie beispielsweise der Sicherheit oder Barrierefreiheit des Weges nicht möglich ist. Trotz der genannten Einschränkungen werden beide Systeme von ihren Benutzern sehr geschätzt, ermöglichen sie sehgeschädigten Fußgängern doch eine Orientierung und Navigation in unbekanntem Gebieten. Weitere kommerzielle Navigationslösungen für blinde und sehgeschädigte Fußgänger umfassen Street Talk der amerikanischen Firma Freedom Scientific¹¹ und Wayfinder Access¹², wobei das letztgenannte System auf handelsüblichen Mobiltelefonen in Kombination mit Screenreadern wie Nuance Talks¹³ oder Mobile Speak¹⁴ betrieben wird.

Das Open-Source-Projekt Loadstone GPS¹⁵ bietet auf der Plattform von Mobiltelefonen der Nokia Series 60 mit Symbian Betriebssystem eine einfache Möglichkeit für blinde und sehbehinderte Benutzer, Points-of-Interest zu verwalten und sich aus diesen Routen zusammenzustellen. Die für Screenreader zugängliche Software führt den Benutzer über Navigationsanweisungen auf einer Route entsprechend der Reihenfolge der gesetzten Points-of-Interest. Das System wird von vielen Nutzern zudem dazu verwendet, um bestimmte Punkte beispielsweise in Fußgängerzonen oder auf großen Plätzen wiederzufinden. Die Loadstone-Software ermöglicht die Integration frei erhältlicher Karten, so dass Zusatzinformationen über den aktuellen Standort abrufbar gemacht werden können.

Obgleich durch die Verwendung von GPS-basierten Navigationssystemen zur Unterstützung der Mobilität sehgeschädigter Personen vielversprechende Ergebnisse erzielt werden konnten (Loomis et al., 2005), ist eine Positionsbestimmung mittels GPS nicht in allen Situationen geeignet. Für eine genaue Positionsbestimmung wird eine freie Sichtverbindung zu den anzupeilenden Satelliten benötigt – diese Voraussetzung ist insbesondere in Städten und innerhalb von Gebäuden nur unzureichend erfüllt. In vielen Innenstädten wird die Genauigkeit der Positionsbestimmung durch Signalreflektionen an den Gebäudefassaden zum Teil erheblich beeinträchtigt, in Gebäuden ist aufgrund der nicht vorhandenen Sichtbarkeit der Satelliten eine GPS-basierte Ortsbestimmung nahezu ausgeschlossen. Ein Ansatz für die

¹¹ Freedom Scientific, Inc.: http://www.freedomsci.com/fs_products/StreetTalk.asp

¹² Wayfinder Access Navigationssystem: <http://www.wayfinder.com/?id=1258&lang=de-DE>

¹³ Nuance Talks Software: <http://www.nuance.com/talks/>

¹⁴ Mobile Speak Screenreader: <http://www.codefactory.es/en/products.asp?id=24>

¹⁵ Loadstone Software: <http://www.loadstone-gps.com>

Lösung dieses Problems ist die Installation von Ortskennzeichnungen wie etwa RFID-Sendern oder Bluetooth-Barken, die elektronisch ausgewertet werden können. Beispiele für derartige Systeme umfassen das auf Infrarot-Barken basierende Talking Signs System (Golledge, Marston & Costano, 1998) und das auf RFID-Sendern basierende System Talking Braille (Ross & Lightman, 2005).

Talking Signs ermöglicht sehgeschädigten Fußgängern die Orientierung in städtischen Arealen. Das System besteht aus mehreren Sende- und einer Empfangseinheiten (siehe Abbildung 2.6), wobei die Sendereinheiten an wichtigen Punkten angebracht werden und ein Infrarotsignal mit Informationen über den Standort emittieren. Die gesendeten Informationen können mittels der Empfangseinheiten ausgewertet werden, wenn diese direkt in Richtung der Sendeeinheit gehalten werden. Die Darstellung der Informationen erfolgt durch synthetische Sprache, so dass sich das System insbesondere für blinde Benutzer eignet.



Abbildung 2.6: Talking Signs Emitter und Empfänger

Das System Talking Signs findet in mehreren Regionen der Vereinigten Staaten und Japans Anwendung. Installationen sind beispielsweise in der Innenstadt von San Francisco und in etwa fünfzig japanischen Städten vorhanden. Einer der großen Vorteile des Systems ist die zusätzliche Orientierungsinformation, da der Benutzer das vom Sender emittierte Signal nur dann abrufen kann, wenn er die Empfangseinheit in Richtung der Sendeeinheit ausrichtet. Nachteilig sind hingegen die Abhängigkeiten von den Installationen, da diese nur in wenigen Regionen weiträumig vorhanden sind. Zudem ist jede Erweiterung der Abdeckung mit einem hohen Investitionsaufwand verbunden.

Talking Braille überträgt ortsbasierte Informationen mittels der Verwendung von RFID Sende- und Empfangseinheiten. Die Information wird ebenfalls durch synthetische Sprache ausgegeben. Im Gegensatz zu Talking Signs ist eine Orientierungshilfe jedoch nicht möglich, da Richtungsinformationen nicht ermittelt werden können. Zudem ist Talking Braille ebenso abhängig von Installationen, was jedoch für den vorgesehenen Einsatz in Gebäuden aufgrund der unzureichenden Verfügbarkeit von GPS akzeptabel ist.

2.5 Anreicherung geographischer Daten

Die Anreicherung oder Attributierung geographischer Daten ist zunehmend Gegenstand sowohl wissenschaftlicher als auch kommerzieller Arbeiten, da durch zusätzliche ortsbezogene Informationen die Wertschöpfungskette erweitert bzw. ausgeweitet werden kann. Zusätzliche, georeferenzierte Informationen ermöglichen die Entwicklung neuer Dienste wie beispielsweise die Suche nach einem nahegelegenen Restaurant oder der nächsten Bushaltestelle. Eine der größten Problematiken bleibt jedoch die Akquisition und Verarbeitung der Daten. In diesem Abschnitt werden Arbeiten, Technologien und Systeme vorgestellt, welche die Anreicherung geographischer Daten ermöglichen oder aber Dienste auf Grundlage entsprechender Zusatzinformationen bereitstellen.

Wissenschaftliche Arbeiten umfassen beispielsweise (Horstmann et al., 2006), in der ein System für die automatische Annotation von geographischen Daten auf Basis einer computergestützten Auswertung von gedrucktem Kartenmaterial entwickelt wurde. Semantische Entitäten werden mittels einer Bilderkennung extrahiert und in ein auf der Geography Markup Language¹⁶ (GML) basierendes Format überführt. Die so gewonnenen Informationen können in einem weiteren Schritt für die nichtvisuelle Präsentation verwendet werden, um beispielsweise sehgeschädigten Personen Zugang zu gedruckten Karten zu ermöglichen. Bei dem vorgestellten Verfahren erfolgt jedoch keine Georeferenzierung, so dass eine direkte Verwendung für die Navigation nicht möglich ist.

Das OurWay-System (Holone & Misund, 2008) implementiert ein ähnliches Verfahren, wie es in (Völkel & Weber, 2008) und in erweiterter Form in dieser Arbeit beschrieben ist. OurWay ermöglicht Rollstuhlfahrern und anderen mobilitätseingeschränkten Menschen, Wegabschnitte mit einer dreistufigen Bewertung bezüglich ihrer Barrierefreiheit zu annotieren. Die Bewertungen umfassen ‚nicht barrierefrei‘ sowie ‚aufwendig zu passieren‘ und ‚gut‘. Die Bewertungen der Benutzer werden auf einem zentralen Server zusammengeführt und bilden die Grundlage für die Berechnung eines möglichst barrierefreien Weges. Dabei werden die Kantenlängen des Navigationsgraphen je nach Bewertung durch die Benutzer mit einem festgelegten Faktor multipliziert, so dass barrierefreie Wege für Standard-Routing-Algorithmen kürzer erscheinen als nicht barrierefreie Wege, auch wenn sie sich in ihrer realen Länge nur geringfügig unterscheiden. Obwohl das OurWay-System einige Ähnlichkeiten mit den in dieser Arbeit entwickelten Verfahren aufweist, ist die Anwendung lediglich auf eine Benutzergruppe beschränkt. Ein Verfahren für eine Personalisierung wird durch das OurWay-System nicht bereitgestellt. Für die Berechnung einer geeigneten Route werden lediglich die beiden Kriterien Länge und Barrierefreiheit kombiniert, eine Verallgemeinerung auf eine beliebige Anzahl an Kriterien erfolgt nicht. Zudem werden Annotationsdaten nicht konsolidiert, sondern lediglich die letzte Annotation für einen Wegabschnitt

¹⁶ Geographic Markup Language: <http://www.opengeospatial.org/standards/gml>

verwendet. Die daraus folgenden Nachteile sind in dieser Arbeit detailliert in Abschnitt 5.4 beschrieben.

Innerhalb des Projektes BAIM¹⁷ (Barrierefreie ÖV-Informationen für mobilitätseingeschränkte Personen) wurde eine Infrastruktur für die Bereitstellung von Informationen bezüglich durchgängig barrierefreien Transportwegen innerhalb des Öffentlichen Nahverkehrs entwickelt. Innerhalb des Projekts wurden entsprechende Daten aufgenommen und in die Fahrgastinformationssysteme der Verkehrsverbünde Rhein-Main sowie Berlin-Brandenburg integriert, wobei die Informationen für die Nutzer dabei über verschiedene Ausgabegeräte wie etwa Mobiltelefon, PDA oder stationärem Auskunftssystem zugänglich sind. Zusätzlich wurde ein Routingdienst implementiert, der die verschiedenen Bedürfnisse der Benutzer berücksichtigt (Bühler, Heck & Becker, 2008). Die innerhalb des BAIM-Projekts verwendeten Daten wurden durch Experten erhoben, wodurch eine hohe Kostenbelastung des angebotenen Dienstes bedingt ist. An dieser Stelle erscheinen Verfahren für den Einbezug des Benutzers bei der Akquisition von spezifischen Daten über die Barrierefreiheit von Einrichtungen des Öffentlichen Nahverkehrs als sehr vielversprechend, um eine weitreichende Datenabdeckung zu ermöglichen.

Das EU-geförderte Projekt Haptimap, welches Anfang September 2008 startete, hat als Zielstellung, Informationen zur Barrierefreiheit in Produkte des Massenmarktes sowie in mobile ortsbasierte Dienste zu integrieren. Dabei sollen einerseits Werkzeuge entwickelt werden, die es Entwicklern erlauben, adaptierbare multimodale Komponenten für Anwendungen zu entwickeln. Andererseits sollen Richtlinien für die Integration von Informationen zur Barrierefreiheit entwickelt sowie deren Anwendbarkeit anhand von Designstudien demonstriert werden. Mit Navteq ist einer der weltweit führenden Anbieter digitaler Straßenkarten am Projekt beteiligt, so dass ein besonderer Fokus bei in der Integration von zusätzlichen Informationen in vorhandene digitale Karten liegt. Aufgrund der bisher veröffentlichten Projektbeschreibungen ist jedoch nicht absehbar, ob eine Beteiligung der Endnutzer bei der Anreicherung der geographischen Daten angestrebt wird.

In (Beeharee & Steed, 2006) und (Beeharee & Steed, 2007) wird ein System beschrieben, welches den Benutzer bei der Orientierung mittels georeferenzierter Fotos der Route unterstützt. Dabei werden die Fotos zusätzlich durch graphische Elemente wie beispielsweise Pfeile annotiert, so dass dem Benutzer des Systems die Routenführung verdeutlicht wird. Erste Benutzerstudien zeigen positive Ergebnisse, wobei ausgeweitete Studien für zukünftige Arbeiten angekündigt sind. Insgesamt erscheint eine Annotation der geographischen Daten mit Fotos als sehr vielversprechend, wobei insbesondere temporale Aspekte zu beachten sind. So ist eine Korrelation der Fotos mit der realen Umgebung nur dann möglich, wenn die Umweltbedingungen sehr ähnlich sind. So sind im Winter aufgenommene Bilder für die Verwendung im Sommer nicht uneingeschränkt geeignet. Ebenso ist die jeweilige Tageszeit

¹⁷ Projekt BAIM: <http://www.baim-info.de>

von Bedeutung, da ein sehr hohes Abstraktionsvermögen der Benutzer notwendig ist, um beispielsweise bei Tageslicht aufgenommene Bilder mit der zugehörigen Umwelt bei Nacht zu korrelieren.

Flickr¹⁸ ist ein Fotoportal, das Benutzern das Anlegen und Verwalten von Fotoalben ermöglicht, wobei die Fotos je nach Freigabe auch für andere Benutzer sichtbar sind. Flickr bietet die Möglichkeit, Fotos mit einem sogenannten Geotag zu annotieren, so dass diese dann entsprechend georeferenziert sind und der Ort der Aufnahme ermittelt werden kann. Google Earth¹⁹ ist ein von Google entwickeltes System, das Satellitenbilder der Erde aneinanderreicht und so die Erdoberfläche lückenlos darstellt. Das System ermöglicht eine hohe Vergrößerung der Bilder, so dass beispielsweise einzelne Autos auf Straßen und Details von Häusern erkennbar sind. Zudem verknüpft Google die Satellitenbilder zunehmend mit georeferenzierten Informationen wie Points-of-Interest oder aber Fotos. Microsoft bietet mit Virtual Earth²⁰ einen ähnlichen Dienst. Die genannten Dienste bieten zwar selbst keine weitreichenden Möglichkeiten einer personalisierten Routenberechnung, ermöglichen aber über Schnittstellen das Einbinden zusätzlicher georeferenzierter Daten, so dass eine Nutzung dieser Schnittstellen für die Erweiterung der Datenbasis möglich ist.

2.6 Zusammenfassung

Navigationssysteme werden zunehmend für den Bereich der Fußgängernavigation eingesetzt. Bisher erfolgt jedoch keine weitreichende Adaptierung dieser Systeme auf die speziellen Bedürfnisse und Anforderungen dieser Benutzergruppe. Insbesondere die Gruppe der mobilitätseingeschränkten Fußgänger würde erheblich von einer Verbesserung ihrer Mobilität profitieren, findet jedoch aufgrund ihrer sehr spezifischen Anforderungen keine ausreichende oder nur mangelhafte Unterstützung durch bestehende Systeme und Verfahren. In diesem Kapitel wurden bestehende Systeme, Projekte und Technologien vorgestellt und auf ihre Anwendbarkeit für die Fußgängernavigation mobilitätseingeschränkter Benutzer betrachtet.

Eine stark verbesserte Positionierung ist für eine nachhaltige Entwicklung von Navigationslösungen besonders für mobilitätseingeschränkte Fußgänger unumgänglich. Derzeit verfügbare GPS-Empfänger erfüllen die gestellten Anforderungen nur unzureichend. Die nicht ausreichende Datenbasis ist ein weiteres Problem, da die verfügbaren Kartendaten bisher für die Verwendung im Bereich der Fahrzeugnavigation optimiert sind. Zusätzliche geographische Daten sind jedoch notwendig, um personalisierte Navigationslösungen speziell für mobilitätseingeschränkte Benutzer realisieren zu können. Eine flächendeckende Aufnahme

¹⁸ Flickr-Dienst: <http://flickr.com/>

¹⁹ Google Earth Software: <http://earth.google.de/>

²⁰ Microsoft Virtual Earth Software: <http://www.microsoft.com/virtualearth/>

solcher Daten durch öffentliche Institutionen oder professionelle Anbieter ist aufgrund des Kostenfaktors nur schwer realisierbar, so dass Verfahren benötigt werden, welche den Einbezug von Benutzern bei der Akquisition solcher Daten ermöglichen. Obwohl bereits Ansätze für derartige Verfahren bestehen bzw. parallel zu dieser Arbeit entwickelt wurden, sind bisher lediglich Speziallösungen ohne die Möglichkeit einer Verallgemeinerung auf verschiedene Benutzergruppen verfügbar. Im folgenden Kapitel werden die Anforderungen der Gruppe der mobilitätseingeschränkten Benutzer näher betrachtet. Diese Anforderungen dienen als Grundlage für das in dieser Arbeit vorgestellte allgemeine Verfahren der multimodalen Annotationen geographischer Daten sowie der Verwendung dieser Daten für eine personalisierte Routenberechnung.

3 Benutzeranforderungen

An Fußgängernavigationssysteme werden verschiedene Anforderungen gestellt, von denen sich viele deutlich von den Anforderungen an Navigationssysteme für Fahrzeuge unterscheiden. In diesem Kapitel werden die Benutzeranforderungen an Systeme zur Fußgänger-navigation untersucht, wobei entsprechend des Schwerpunkts dieser Arbeit ein besonderer Fokus auf die zugrunde liegenden geographischen Daten und die Kalkulation einer optimalen Route gelegt wird. Zusätzlich werden Anforderungen hinsichtlich notwendiger Positionierungsverfahren und der Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für die Ein- und Ausgabe analysiert. Wesentliche Teile der Anforderungsanalyse und der Ergebnisse der Umfrage sind ebenfalls in (Völkel, Kühn & Weber, 2008) publiziert.

Zu Beginn dieses Kapitels wird die Gruppe der mobilitätseingeschränkten Fußgänger definiert, welche die Zielgruppe dieser Arbeit bildet. Aufbauend auf einer Umfrage unter 88 blinden und sehbehinderten Personen erfolgt in Abschnitt 3.3 die Spezifizierung der Anforderungen in Bezug auf die eigentliche Zielgruppe der mobilitätseingeschränkten Fußgänger.

3.1 Mobilitätseingeschränkte Benutzer

Die Zielgruppe dieser Arbeit bilden mobilitätseingeschränkte Benutzer. Eine Mobilitätseinschränkung wird nach einer Definition der Universität Illinois²¹ als körperliche Einschränkung verstanden, welche die Bewegung eines Teils oder mehrerer Teile des Körpers behindert. Diese Definition ist für diese Arbeit jedoch zu restriktiv und schränkt die Benutzergruppe unnötig ein, so dass die folgende Definition für den Begriff der Mobilitätseinschränkung zugrunde gelegt wird (Völkel & Weber, 2007):

Eine Mobilitätseinschränkung umfasst alle funktionalen Einschränkungen, welche die Fähigkeit einer Person bezüglich eines autonomen Ortswechsels beeinträchtigen. Physische, kognitive und sensorische Einschränkungen können zu einer Mobilitätseinschränkung führen.

Die angeführte Definition erweitert die Gruppe der mobilitätseingeschränkten Fußgänger über motorisch behinderte Personen hinaus, so dass auch alle diejenigen Fußgänger mit eingeschlossen werden, bei denen andere Faktoren zu einer Einschränkungen bei der Lösung der Navigationsaufgabe führen. Abbildung 3.1 zeigt exemplarisch eine Auswahl von Fakto-

²¹ University of Illinios, Medical Center: <http://uimc.discoveryhospital.com/main.php?id=3246>

ren, die zu einer Mobilitätseinschränkung führen können. Die Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und zeigt lediglich einen Ausschnitt der Menge möglicher Faktoren.

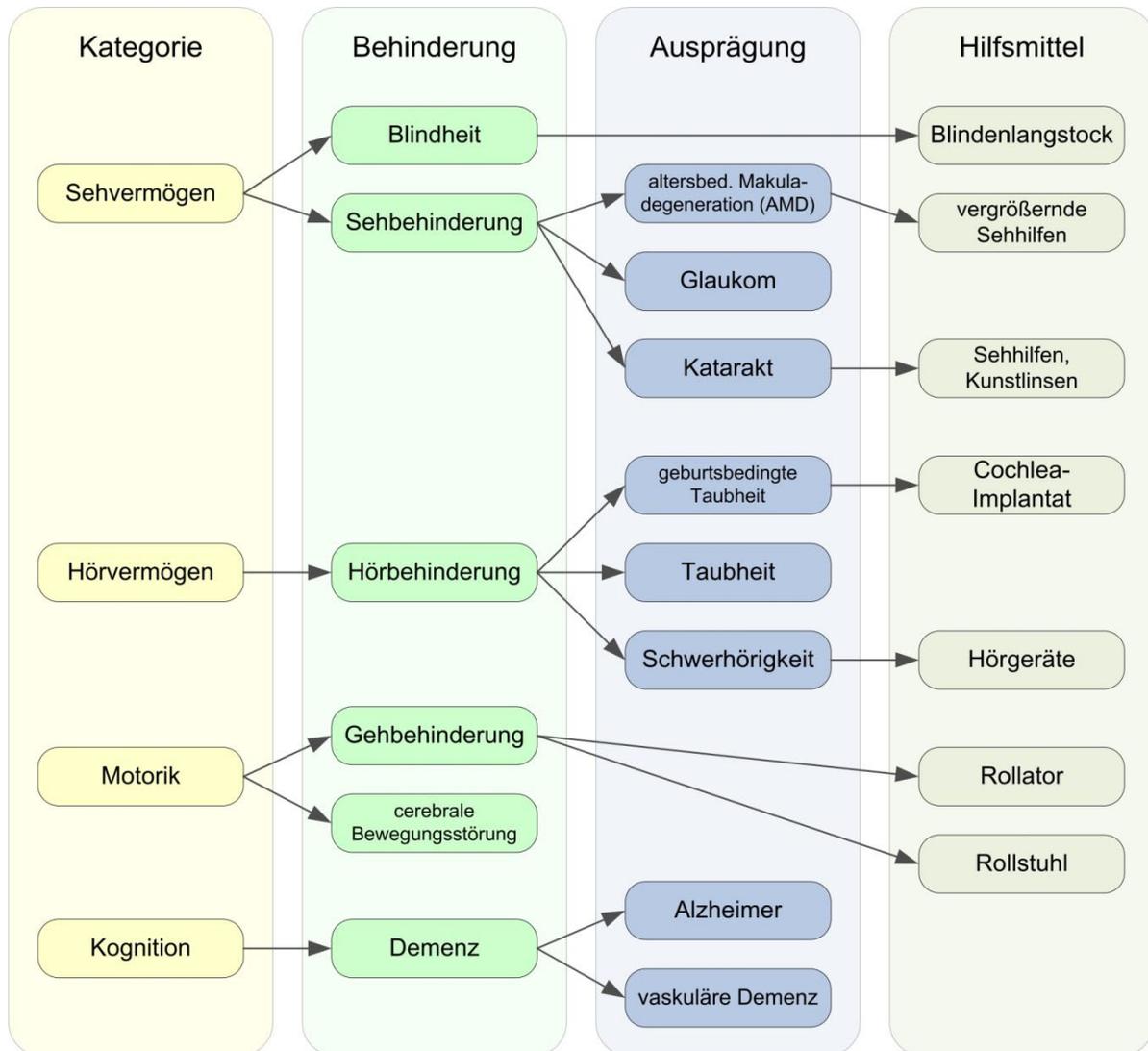


Abbildung 3.1: Beispiele für mobilitätseinschränkende Faktoren und Hilfsmittel

Die Abbildung verdeutlicht die vielfältigen Faktoren, die sich mobilitätseinschränkend auswirken. Sehschädigungen umfassen beispielsweise einen kompletten Verlust des Sehvermögens (Blindheit) ebenso wie diverse Sehbehinderungen (altersbedingte Makuladegeneration, Glaukome und Katarakte). Oftmals lassen sich krankheitsbedingte Sehbehinderungen durch Hilfsmittel oder Behandlungen ausgleichen, zumeist verbleibt jedoch eine Einschränkung der Sehfähigkeiten. Abbildung 3.2 auf der folgenden Seite zeigt im Vergleich zur Normal-sicht (1) exemplarisch die Auswirkungen des Verlusts der zentralen Sehfähigkeit (2), was beispielsweise durch eine Makuladegeneration hervorgerufen werden kann, sowie die Auswirkungen einer durch einen Katarakt bedingten Linsentrübung (3).



Abbildung 3.2²²: (1) normale Sehfähigkeit, (2) Makuladegeneration und (3) Linsentrübung durch Katarakt

Geburtsbedingte Sehschädigungen haben einen Einfluss auf die Bildung einer sogenannten kognitiven Karte (*cognitive map*), da die Umwelt je nach Grad der Schädigung nur teilweise oder überhaupt nicht visuell wahrgenommen werden kann. Eine kognitive Karte umfasst vereinfacht die kognitive Repräsentation der Umwelt (Kitchin & Blades, 2002), wobei diese Repräsentation nach (Moore & Golledge, 1976, S. 7) folgendes beinhaltet:

[...] the awareness, impressions, information, images, and beliefs that people have about environments [...] it implies not only that individuals and groups have information and images about the existence of these environments and their constituent elements, but also that they have impressions about their character, function, dynamics, and structural inter-relatedness, and that they imbue them with meaning, significance, and mythical-symbolic properties.

Bei nicht sehgeschädigten Fußgängern erfolgt die Erfassung von den für die Navigation relevanten Informationen primär durch den visuellen Kanal, wodurch die Wahrnehmung von Objekten in der Umgebung nicht nur in Relation zum Betrachter, sondern auch in Relation untereinander ermöglicht wird (Morrongiello et al., 1995). Sehgeschädigte und blinde Fußgänger müssen dagegen räumliche Relationen mittels taktilen, propriozeptiven und akustischen Sinnen sequentiell erfassen (Bigelow, 1996), so dass die Fähigkeiten zur Konstruktion einer kognitiven Karte stark variieren und im Vergleich weniger ausgeprägt sind als bei nicht sehgeschädigten Fußgängern (Jacobson & Kitchin, 1997). Für sehgeschädigte Benutzer werden andere und detailliertere Informationen benötigt als für nicht sehgeschädigte Benutzer, da unter anderem Landmarken in nicht unmittelbar wahrnehmbarer Entfernung für die Orientierung nicht direkt verwendet werden können. Ein weiteres Beispiel bilden Rollstuhlfahrer, bei denen die kognitive Karte wesentlich detaillierter aufgebaut ist als bei nicht eingeschränkten Fußgängern (Vujakovic & Matthews, 1994). Allerdings ist dieser Detaillierungsgrad hauptsächlich auf die für Rollstuhlfahrer zugänglichen Bereiche beschränkt.

²² Abbildung angelehnt an eine ähnliche Darstellung in (Bradley & Dunlop, 2005)

Innerhalb dieser Arbeit stellen die geographischen und räumlichen Elemente wichtige Teilaspekte bezogen auf die Definition der kognitiven Karte dar, welche zudem den Schwerpunkt der meisten Forschungsarbeiten in diesem Gebiet bilden (Kitchin, 1994). In der klassischen Literatur zum Thema Orientierung und Navigation von Personengruppen mit speziellen Bedürfnissen existieren drei Theorien in Bezug auf mögliche Defizite sehgeschädigter Menschen hinsichtlich ihrer Fähigkeit, eine kognitive Karte der Umwelt zu bilden: die Defizit-Theorie (*deficiency theory*), die Ineffizienz-Theorie (*inefficiency theory*) und die Differenz-Theorie (*difference theory*). Die Theorien wurden von Fletcher (Fletcher, 1980) entwickelt, basieren aber teilweise auf vorhergehenden Arbeiten.

Die Defizit-Theorie geht davon aus, dass die visuelle Wahrnehmung essentiell für die Bildung einer kognitiven Karte ist und dass durch andere Sinne aufgenommene Informationen entsprechend nicht ausreichen (Von Senden, 1932). Die Ineffizienz-Theorie basiert auf der Annahme, dass sehgeschädigte Menschen zwar qualitativ eine gleichwertige kognitive Karte wie sehende Menschen bilden können, dieser Prozess aber durch weniger entwickelte Fähigkeiten hinsichtlich der Aufnahme und Verarbeitung räumlicher Informationen beeinträchtigt wird. Bei der Differenz-Theorie, die auf frühen Arbeiten von Worchel (Worchel, 1951) zurück geht, wird schließlich davon ausgegangen, dass die kognitiven Karten von Sehgeschädigten qualitativ gleichwertig mit denjenigen von sehenden Menschen sind, die kognitiven Karten jedoch Unterschiede hinsichtlich ihrer Bildung und Struktur aufweisen. Mit Ausnahme der Defizit-Theorie werden die genannten Theorien innerhalb der aktuellen Literatur immer wieder zitiert, zudem stützen Versuchsergebnisse je nach Ergebnis oftmals eine der beiden Theorien, ohne dass ein Konsens über einer uneingeschränkten Gültigkeit einer der beiden Theorie gefunden werden könnte. Unbestritten ist jedoch, dass sehgeschädigte und insbesondere blinde Menschen ihre Umgebung mit anderen Sinnen als dem visuellen wahrnehmen müssen. Daher müssen sie sich an anderen Umgebungsmerkmalen orientieren als sehende Menschen, die meist rein visuelle Merkmale verwenden.

Einschränkungen des Hörvermögens können ebenfalls zu Mobilitätseinschränkungen führen. Gehörlose Menschen, die von der Hörschädigung von Geburt an betroffen sind, verwenden zumeist Gebärdensprache als ihre Muttersprache. Entsprechend schwer ist für diese Menschen der Zugang zur geschriebenen Sprache, da diese nicht wie für hörenden Menschen eine orthographische Umsetzung der menschlichen Phonetik darstellt (Perfetti & Sandak, 2000) sowie (Marschark & Harris, 1996). Die Lesegeschwindigkeit geburtstauer Menschen ist zumeist sehr langsam und es bestehen große Schwierigkeiten bei der Erschließung komplexer Satzstrukturen, so dass beispielsweise textuelle Wegbeschreibungen nur sehr schwer oder aber überhaupt nicht zugänglich sind. Gleichermäßen stellen derartige Wegbeschreibungen eine große mentale Belastung bei der Orientierung dar.

Die oben genannten Faktoren können zusätzlich nach ihrer zeitlichen Beständigkeit in dauerhafte und zeitlich befristete Einschränkungen unterteilt werden. Sehschädigungen

können in vielen Fällen als dauerhafte Einschränkungen angesehen werden, da bei den meisten Erkrankungen lediglich ihr Fortschreiten verhindert werden kann, eine Rückgewinnung der vorherigen Sehfähigkeit aber nicht möglich ist. Gehbehinderungen wie beispielsweise ein gebrochenes Bein oder eine Verletzung der Kniebänder sind zeitlich befristete Mobilitätseinschränkungen, die gegebenenfalls die Verwendung von Hilfsmitteln wie Krücken bedingen. Nach einer erfolgreichen Ausheilung sind bleibende Einschränkungen zumindest hinsichtlich der täglichen Mobilität jedoch selten. Altersbedingte Gehbehinderungen, die beispielsweise einen Rollator für die Fortbewegung erfordern, sind hingegen dauerhafte Einschränkungen der Mobilität.

3.2 Empirische Grundlagen

Im Rahmen der Anforderungsanalyse wurde eine Umfrage unter blinden und sehbehinderten Personen durchgeführt. Der Fragebogen wurde über E-Mail-Verteiler des Deutschen Blinden- und Sehbehindertenverbands (DBSV) und der Deutschen Blindenstudienanstalt (Blista) in Marburg an potentielle Teilnehmer der Zielgruppe verschickt. Teilnehmer konnten die Fragebögen direkt mit den Antworten versehen und per E-Mail zurücksenden. Als Alternative wurde den Teilnehmern die Befragung innerhalb eines Telefoninterviews angeboten, worauf etwa 10% der Befragten zurückgriffen. Der Fragebogen wurde als Word-Dokument in einem für Screenreader geeigneten Aufbau gestaltet, wobei vor Beginn der Umfrage Testläufe mit insgesamt drei blinden Personen durchgeführt wurden. Die Auswertung der Umfrage erfolgte in anonymisierter Form in einem zweigliedrigen Verfahren. Dabei entfernte die als Empfänger der Rückläufer auftretende Person die personenbezogenen Daten aus den Fragebögen und leitete diese erst dann zur Auswertung an eine zweite Person weiter. Eine Zuordnung der Ergebnisse zu einem einzelnen Teilnehmer ist daher nicht möglich.

3.2.1 Ziele

Die Zielstellung der Umfrage beinhaltete die empirische Unterstützung der Annahme, dass die von Navigationsgeräten verwendeten geographischen Basisdaten mit zusätzlichen Informationen angereichert werden müssen, um eine geeignete Unterstützung für mobilitätseingeschränkte und in diesem Fall insbesondere für sehgeschädigte Fußgängern zu bieten. Eine weitere Zielstellung bestand in der Ermittlung von Umgebungsmerkmalen, die von sehgeschädigten Fußgängern für die Orientierung verwendet werden, so dass aus den Ergebnissen Anforderungen an die notwendigen Annotationen abgeleitet werden können. Da diese Annotationen die Grundlage für eine multikriterielle Routenberechnung bilden, bestand ein weiteres Thema des Fragebogens in der Routenwahl der Teilnehmer sowie in der Fragestellung, welche Merkmale einem angenehmen bzw. unangenehmen Weg zugeordnet

werden. Insgesamt sind aufgrund der Fragestellungen zudem Aussagen über das Mobilitätsverhalten der Teilnehmer sowie allgemeine Anforderungen an Navigationssysteme ableitbar. Aufgrund der hohen Anzahl der Teilnehmer wurde die Umfrage getrennt nach blinden und sehbehinderten Teilnehmern durchgeführt, welche noch über einen für die Navigation verwertbaren Sehrest verfügen. Ziel der Unterteilung ist die Fragestellung inwieweit blinde und sehbehinderte Fußgänger als eine Benutzergruppe im Kontext von Fußgängernavigationssystemen verstanden werden können.

3.2.2 Methodik und Teilnehmer

Der Fragebogen bestand aus drei Abschnitten mit insgesamt dreißig Fragen. Je nach Fragestellung wurden Auswahl- oder Freitextfragen verwendet. Obwohl die Verwendung von Freitextfragen ein breites Spektrum an Antworten zulässt, ermöglicht diese Form der qualitativen Befragung einen sehr hohen Informationsgehalt, da die Befragten nicht an vordefinierte Antwortmöglichkeiten gebunden sind. Nachteilig ist jedoch, dass eine quantitative statistische Auswertung in den meisten Fällen nicht möglich ist, da eine Vergleichbarkeit der Antworten nicht gegeben ist.

Im ersten Abschnitt des Fragebogens wurden allgemeine demographische Daten erhoben. Diese umfassen das Alter des Befragten, das Geschlecht, den Grad der Sehschädigung sowie die Frage, ob diese bereits seit Geburt bestünde, und ob ein für die Navigation verwertbarer Sehrest vorhanden ist. Der zweite Abschnitt beinhaltete zwölf Fragen mit Bezug auf die Orientierung und Navigation in bekannten Gebieten. Erwartet wurden Angaben, wie die Befragten alltägliche Navigationsaufgaben wie den Weg zur Arbeit oder zum Einkaufen zurücklegen, ob alleine oder in Begleitung, welche Umgebungsmerkmale zur Orientierung genutzt und welche Hilfsmittel verwendet werden. Zu diesem Zweck wurde beispielsweise eine Frage formuliert, wie die Befragten einer dritten Person einen Weg beschreiben würden. Zusätzlich wurde die Frage formuliert, inwieweit und warum bestimmte als unangenehm empfundene Wege vermieden werden. Der dritte Abschnitt umfasste zwölf Fragen in Bezug auf die Orientierung und Navigation in unbekanntem Gebieten, wie Fragen zur Vorbereitung auf unbekannte Wege, zu den verwendeten Umgebungsmerkmalen sowie die Fragen nach dem Aufwand, der für das Erlernen neuer Wege benötigt wird. Zusätzlich wurden Fragen hinsichtlich der Benutzung von Navigationsgeräten, sowie dem diesbezüglich vorhandenen Interesse und einem akzeptablen Lernaufwand für die Einarbeitung in die Bedienung solcher Geräte gestellt. Weiterhin wurde nach allgemeinen Anforderungen bzw. Wünschen bezogen auf Navigationssysteme und der Bereitschaft der Verwendung persönlicher Daten wie Notizen oder Points-of-Interest gefragt.

Durch die Verteilung über die im vorigen Abschnitt genannten E-Mail-Verteiler konnten innerhalb der gesetzten vierwöchigen Frist 88 ausgefüllte und verwertbare Fragebögen in die Auswertung aufgenommen werden. Die Einsendungen kamen durchgehend aus dem

deutschsprachigen Raum, wobei ein kleiner Teil der Rückläufer (vier Fragebögen) aus der Schweiz stammte. Von den Befragten sind 35 (39,8%) Frauen und entsprechend 53 (60,3 %) Männer. Das Alter der Teilnehmer liegt zwischen 22 und 84 Jahren und ist wie in Tabelle 3.1 verteilt:

Alter	20–35	36–50	51–65	> 65
Teilnehmer	22 (25%)	37 (42%)	18 (20,5%)	11 (12,5%)

Tabelle 3.1: Altersverteilung der Teilnehmer

Die Hälfte der Befragten sind blind, die übrigen 44 Befragten gaben an, über einen Sehrest zu verfügen, der im überwiegenden Teil für die Mobilität verwertbar ist. Beispielsweise gaben einige der Befragten an, verschiedene Helligkeiten oder aber Umrisse wahrnehmen zu können. Bei 27 Personen (30,7%) besteht die Blindheit bereits seit der Geburt, 17 (19,3 %) erblindeten erst später. Bei den Sehbehinderten besteht die Behinderung bei 31 (35,2%) der Befragten von Geburt an, bei 13 (14,8%) der Befragten entwickelte sich die Sehbehinderung erst später. Jeweils 9 blinde und 9 sehbehinderte Teilnehmer gaben zudem an, über zusätzliche Behinderungen zu verfügen, wobei größtenteils Hörschädigungen angeführt wurden. Bei der Bewertung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Verteilung der Fragebögen über E-Mail-Verteiler zwar eine hohe Zahl an Rückläufern ermöglichte, die Teilnehmer der Umfrage – einmal abgesehen von den telefonisch Befragten – aber nur die technisch affine Teilgruppe der Sehgeschädigten repräsentiert. Ein repräsentativer Querschnitt durch die Gruppe der Sehgeschädigten ist für eine Umfrage praktisch nicht zu erreichen.

3.2.3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des zweiten und dritten Teils der Umfrage kompakt dargestellt. Eine detailliertere Diskussion und die Auswertung der qualitativen Befragungen werden zusammen mit der Analyse der Anforderungen im folgenden Abschnitt vorgenommen.

Hinsichtlich der täglichen Fortbewegung legen lediglich 7 (8%) der befragten Sehbehinderten und 13 (14,8%) der befragten Blinden längere Strecken nur in Begleitung zurück, der überwiegende Teil der Befragten (68 oder 77,3%) benötigt keine Begleitung, wobei 17 (19,3%) der sehbehinderten und 25 (28,4%) der blinden Teilnehmer Wege mit einem Mobilitätstrainer erlernen. In der Befragung zeigt sich ein relativ hoher Mobilitätsgrad der Befragten verglichen mit den mehr als 30% der Sehgeschädigten, die nach (Clark-Carter, Heyes & Howarth, 1986) längere Strecken nur in Begleitung zurücklegen. Abbildung 3.3 zeigt die Anzahl der Nennungen der jeweiligen Hilfsmittel, wobei Mehrfachnennungen möglich waren.

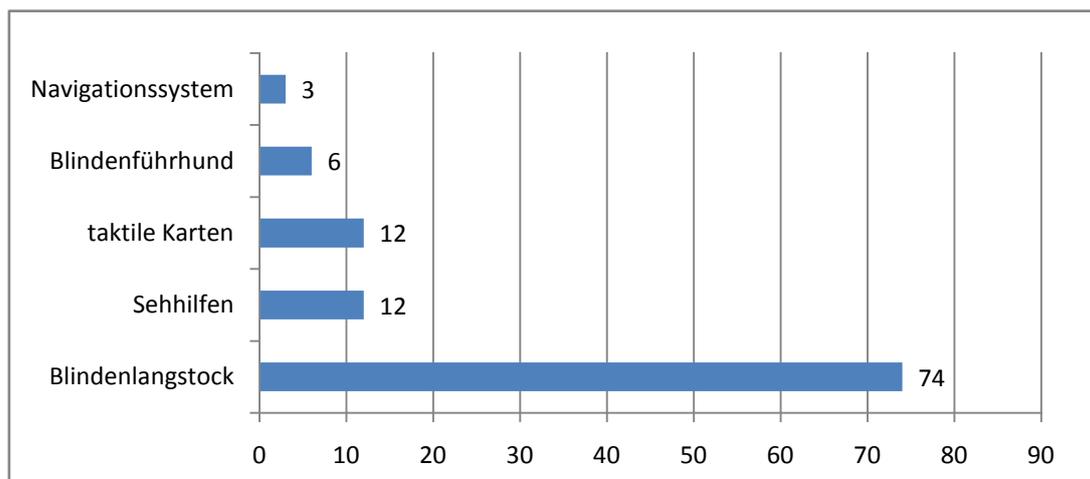


Abbildung 3.3: Anzahl der Nennungen der verwendeten Hilfsmittel

Der Blindenlangstock ist mit 74 (84,1%) Nennungen das mit Abstand am meisten verwendete Hilfsmittel, wobei dieser zusätzlich zu allen blinden Teilnehmern auch von 30 sehbehinderten Teilnehmern verwendet wird. Der Blindenlangstock wird entweder als alleiniges Hilfsmittel (20 Nennungen bzw. 22,7%) oder in Kombination mit anderen Hilfsmitteln wie sonstige Sehhilfen (12 Nennungen bzw. 13,6%), taktilen Karten (12 Nennungen bzw. 13,6%), Blindenführhunde (6 Nennungen bzw. 6,8%) und Navigationssystemen (3 Nennungen bzw. 3,4%) eingesetzt. Der Blindenlangstock wurde von den Befragten qualitativ als sehr gutes Hilfsmittel für die Mikronavigation beschrieben, wobei die taktilen Karten dagegen als sehr hilfreich für die Gewinnung einer Übersicht eines bestimmten Gebietes beschrieben wurden. Obwohl lediglich drei Teilnehmer ein Navigationssystem (ausschließlich Trekker) nutzen, sind die Beurteilungen überaus positiv. So gab ein Befragter an, dass ihm das Navigationssystem deutlich mehr Freiheit ermöglicht, da es ihn die Lage versetzt, auch Strecken in unbekanntem Gebieten zurückzulegen und sich jederzeit zu orientieren.

Im Abschnitt zur Orientierung in unbekanntem Gebieten wurde der benötigte Aufwand erfragt, den die Teilnehmer für das Erlernen von neuen Wegen benötigen. Je nach Komplexität des Wegs lagen die Angaben zwischen ein oder zwei bis maximal zehn Wiederholungen. Im Durchschnitt ergibt sich ein Wert von drei bis vier Wiederholungen für das Erlernen eines Wegs. Ein großes Interesse besteht bei mehr als dreiviertel der Befragten (67 bzw. 76,1%) daran, regelmäßig Unternehmungen in unbekanntem Gebieten durchzuführen. Eine ablehnende Haltung wurde hauptsächlich aufgrund von Befürchtungen eingenommen, dass in unbekanntem Gebieten schnell die Orientierung verloren werden könnte. In diesem Fall gaben 81 (92,1%) der Befragten an, dass Hilfe von Passanten eingeholt werden konnte. Im Gegensatz zu den Angaben zur regelmäßigen Nutzung von Navigationsgeräten gaben 27 (30,7%) der Teilnehmer an, bereits mit derartigen Systemen zumindest experimentiert zu haben. Die Bereitschaft ist bei nahezu allen Befragten (81 bzw. 92,0%) gegeben, speziell auf die Bedürfnisse Sehgeschädigter abgestimmte Navigationssysteme zu verwenden. Die

meisten Befragten (55) würden das System nur in Verbindung mit einem anderen Hilfsmittel – vornehmlich dem Blindenlangstock – verwenden. Auch einer Integration von zusätzlichen Informationen wie Fahrplanauskünfte des öffentlichen Nahverkehrs oder spezielle Points-of-Interest stehen 80 (90,9%) der Befragten positiv gegenüber. Ablehnende Angaben waren hauptsächlich durch Bedenken wie einem höheren Preis der Geräte motiviert. Drei Viertel der Befragten würden die Möglichkeit der Verwaltung persönlicher Informationen wie Points-of-Interest bei einem Navigationsgerät verwenden, lediglich zwei der Befragten lehnte eine derartige Funktionalität grundsätzlich ab, so dass eine hohe Bereitschaft der Befragten zur Aufnahme von Annotationen abgeleitet werden kann.

3.3 Anforderungsanalyse

Die Anforderungen von Fußgängern und insbesondere mobilitätseingeschränkten Fußgängern an Navigationssysteme unterscheiden sich erheblich von den Anforderungen, die an Navigationssysteme für die Fahrzeugnavigation gestellt werden. Eine direkte Verwendung von Systemen zur Fahrzeugnavigation für Fußgänger ist nur dann möglich, wenn Fußgänger in der Lage sind, die Einschränkungen durch eigene Orientierungsleistungen auszugleichen. Ist dies wie bei sehgeschädigten Fußgängern nicht möglich, bestehen weitaus höhere Anforderungen an das Navigationssystem. Mobilitätseingeschränkte Benutzer stellen an die Ausgabe der Navigationsanweisungen andere Anforderungen als nicht mobilitätseingeschränkte Benutzer. So sind die Formulierungen von Navigationsanweisungen für sehgeschädigte und nicht sehgeschädigte Benutzer aufgrund der verschiedenen physischen und kognitiven Anforderungen nicht direkt vergleichbar (Bradley & Dunlop, 2005).

3.3.1 Geographische Basisdaten

Bei der Fahrzeugnavigation dient als Grundlage eine digitale Straßenkarte, die lediglich die bekannten für Fahrzeuge zugänglichen Wege umfasst. Im Gegensatz zu Fahrzeugen sind Fußgänger jedoch nicht ausschließlich an das Straßennetzwerk gebunden und besitzen hinsichtlich der Fortbewegung mehr Freiheitsgrade. Fußgänger können sich beispielsweise innerhalb von Parks und auf Plätzen frei bewegen und die Richtung von Einbahnstraßen ist nicht bindend. Es existieren viele Wege, die für Fahrzeuge nicht zugänglich sind, wie etwa reine Fuß- und Wanderwege, Durchgänge zwischen Gebäuden, Durchlässe an künstlich angelegten Sackgassen oder aber Wege durch öffentlich zugängliche Gebäude. Für Fußgänger sind daher erweiterte geographische Daten wie der Verlauf von Fußwegen wichtig.

Diese Daten finden in der Fahrzeugnavigation keine Anwendung, so dass für die Fußgängernavigation eine höhere Auflösung der geographischen Daten benötigt wird (Corona & Winter, 2001). Folglich führt eine Verwendung verfügbarer digitaler Straßenkarten ohne eine Anreicherung bzw. Erweiterung um zusätzliche Elemente und Attribute nicht zu zu-

friedenstellenden Ergebnissen. Gleichzeitig muss eine Reduzierung bestimmter Daten erfolgen, da für Fußgänger nicht alle Straßen zugänglich sind. Beispiele sind unter anderem Autobahnen bzw. bestimmte Bundesstraßen, bei denen kein Fußweg seitlich entlanggeführt ist.

Die Anforderungen an die geographischen Basisdaten sind für die Zielgruppe der mobilitätseingeschränkten Benutzer restriktiver als für Fußgänger im Allgemeinen und müssen entsprechend erweitert werden. Bei der Gruppe der mobilitätseingeschränkten Benutzer sind insbesondere Informationen hinsichtlich der Unzugänglichkeit bzw. Nicht-Passierbarkeit und ein Maß für die Eignung von Wegabschnitten von besonderer Bedeutung. Beispielsweise sind Wegabschnitte für einen Rollstuhlfahrer ungeeignet, die ausschließlich durch das Überwinden einer Treppe passiert werden können.

Weitere Anforderungen insbesondere für sehgeschädigte und blinde Benutzer werden in (Pressl & Wieser, 2006) angeführt: Das zugrunde liegende Kartenmaterial muss geometrisch konsistent, thematisch korrekt, aktuell und vollständig sein. Im Vergleich zum Fall einer allgemeinen Fußgängernavigation ist eine höhere Auflösung der geographischen Daten notwendig, um sehgeschädigten Benutzern die benötigten Informationen für die Bereiche der Mikro- und Makronavigation zur Verfügung stellen zu können. Zusätzliche Informationen wie beispielsweise der Standort von Banken oder Postfilialen bieten zudem die Möglichkeit, eine aufgabenabhängige Navigation durchzuführen. Zur Unterstützung der Orientierung von sehgeschädigten und blinden Fußgängern müssen Daten vorhanden sein, die eine Überprüfung des gewählten Wegabschnitts erlauben, wie beispielsweise Aussagen über die Steigung eines Abschnitts oder die Beschaffenheit des Untergrunds (Völkel, 2006).

Von besonderer Bedeutung bei der Navigation für mobilitätseingeschränkte Benutzer ist die Bereitstellung von geeigneten Landmarken als Orientierungspunkte und -hilfen durch das geographische Datenmaterial. Beispielsweise sind für die Orientierung älterer Menschen insbesondere Fotos geeignet, die perspektivisch korrekt vom jeweiligen Standort aus aufgenommen werden und eine leichte Identifizierung des korrekten Wegs erlauben (Goodman et al., 2004). (Liu et al., 2006) berichten von vergleichbaren Ergebnissen für die Navigation von Menschen mit kognitiven Behinderungen innerhalb von Gebäuden.

Sehgeschädigte Fußgänger stellen innerhalb der Gruppe der mobilitätseingeschränkten Fußgänger die schärfsten Anforderungen an den Detaillierungsgrad der geographischen Daten. So wurde von den Teilnehmern der Umfrage eine Vielzahl an Umgebungsmerkmalen genannt, die für die Orientierung in bekannten und unbekanntem Gebieten verwendet werden. Diese umfassten zum einen taktil erfassbare Merkmale wie beispielsweise Bordsteinkanten, Bordsteinabsenkungen, Stufen, Zäune, Geländer, die Beschaffenheit des Untergrunds sowie Übergänge zwischen Bodenbelägen oder Begrünungen. Besonders wichtig sind jedoch auch auditiv wahrnehmbare Umgebungsmerkmale wie die Stärke des Verkehrsflusses, die Geräuschkulisse von Geschäften und Restaurants, Einfahrten oder der Widerhall des Blindenstocks an Häuserfassaden. Zu beachten ist, dass bestimmte auditive Merkmale

zeitlichen Änderungen unterliegen, so wie beispielsweise die Stärke des Verkehrsflusses, der von der jeweiligen Tageszeit abhängig ist. Die Verwendung auditiver Merkmale fällt immer dann besonders schwer, wenn der Pegel der Umgebungsgeräusche sehr hoch ist. So sind beispielsweise Baustellen oder große Kreuzungen mit einem hohen Verkehrsaufkommen Bereiche, in denen sich viele sehgeschädigte Personen nur sehr schwer orientieren können. Gerüche bilden eine weitere Kategorie von Umgebungsmerkmalen, die von Sehgeschädigten für die Orientierung verwendet werden, da beispielsweise viele Ladengeschäfte, Bäckereien oder aber Imbiss-Stuben leicht über die charakteristischen Gerüche identifizierbar sind. Bei den sehbehinderten Teilnehmern wurden zusätzlich zu den taktil und auditiv wahrnehmbaren Umgebungsmerkmalen häufig auch visuell erfassbare Merkmale wie etwa Farben, Formen oder Beleuchtungen genannt.

Rollstuhlfahrer benötigen im Wesentlichen zusätzliche Informationen über strukturelle Barrieren, die einen Weg unzugänglich oder unpassierbar machen. Beispiele umfassen hohe Bordsteine, Treppen, das Fehlen von Rampen, den Zustand von Fußgängerwegen, zu schmale Gehwege, zu kleine Verkehrsinseln oder aber die Zugänglichkeit von Haltestellen und Verkehrsmitteln des öffentlichen Nahverkehrs. Eine weitere wichtige Information bilden Steigungen, da insbesondere Rollstuhlfahrer, die einen manuellen Rollstuhl verwenden, eine längere Steigung nur mit großer Anstrengung oder gar nicht überqueren können. Ebenso wie für Rollstuhlfahrer sind diese Informationen aber auch für andere Benutzergruppen wie Senioren für die Berechnung geeigneter Wege von Bedeutung.

3.3.2 Positionsbestimmung

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung ist bei der Fußgängernavigation von größerer Bedeutung als bei der Fahrzeugnavigation. Die Genauigkeit aktuell verfügbarer GPS-Sensoren schwankt je nach äußeren Bedingungen zwischen etwa zehn und dreißig Metern. Diese Genauigkeit ist für die Fahrzeugnavigation ausreichend, da unter Einbezug der Bewegungshistorie mittels angepassten Map-Matching-Algorithmen eine sehr gute Hypothese über die tatsächliche Position des Fahrzeugs möglich ist. Für die Fußgängernavigation lassen sich derartige Verfahren aufgrund der zu geringen Fortbewegungsgeschwindigkeit jedoch nicht anwenden.

Für die Anwendung von Fußgängernavigationssystemen in städtischen Gebieten wird eine Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von unter fünf Metern benötigt, so dass gängige Map-Matching-Verfahren zu einem zufriedenstellenden Ergebnis gelangen. Eine Verwendung aktuell verfügbarer GPS-Empfänger liefert jedoch insbesondere in urbanen Bereichen häufig zu ungenaue Ergebnisse, so dass für einen breiten Einsatz GPS-basierter Navigationslösungen technische Fortschritte notwendig sind.

Im Gegensatz zur Navigation nichtbehinderter Benutzer wird für die Navigation von mobilitätseingeschränkten und insbesondere sehgeschädigten Benutzern eine Genauigkeit von

unter zwei Metern bei der Positionsbestimmung benötigt (Pressl & Wieser, 2006). So kann die Bestimmung des verwendeten Gehsteigs erfolgen, so dass beispielsweise Routen inklusive einer sicheren Straßenquerung bis zum gewünschten Hauseingang genau bestimmt werden können. Ebenso wie Sehgeschädigte profitieren auch Senioren von einer genaueren Positionsbestimmung, da die Navigationsanweisungen genauer formuliert werden können, so dass die mentale Belastung bei der Korrelation der Anweisung mit der realen Umgebung geringer ausfällt. Rollstuhlfahrer benötigen ebenso eine genauere Positionsbestimmung, so dass sie beispielsweise zielgenau zu abgesenkten Bordsteinen zum Überqueren einer Straße geleitet werden können.

Die isolierte Bestimmung der Position ist für die Zielgruppe der mobilitätseingeschränkten Benutzer nicht ausreichend. Nicht sehgeschädigte Benutzer können ihre Orientierung durch die Korrelation visuell erfassbarer Umgebungsmerkmale mit den Navigationsanweisungen bestimmen. Diese Möglichkeit ist für sehbehinderte und insbesondere blinde Benutzer nicht vorhanden. Die Orientierung des Benutzers muss unter Verwendung zusätzlicher Sensoren wie eines digitalen Kompasses ermittelt werden, da eine kontinuierliche Ermittlung der Orientierung aus der Bewegung aufgrund der Geschwindigkeit eines Fußgängers im Gegensatz zu Fahrzeugen nicht möglich ist. Ohne eine Bestimmung der Orientierung ist zudem die Generierung von Navigationsanweisungen nicht möglich, die einen direkten Bezug zur Orientierung aufweisen.

3.3.3 Routenberechnung

Die Gruppe der mobilitätseingeschränkten Benutzer ist in der in Abschnitt 3.1 definierten Form sehr heterogen, so dass die Anforderungen an die Auswahl eines geeigneten Wegs ebenfalls sehr vielschichtig sind. Beispielsweise darf eine geeignete Route für einen Benutzer, der auf einen Rollator als Gehhilfe angewiesen ist, keine Abschnitte enthalten, die ausschließlich durch das Überwinden von Treppen passierbar sind. Für einen Rollstuhlfahrer ist immer dann ein etwas längerer Weg von Vorteil, wenn damit stark steigende Anstiege vermieden werden können. Ein weiteres Beispiel bilden blinde Menschen, bei denen ein Kriterium für die Auswahl eines geeigneten Wegs der Aspekt der Sicherheit ist (Pressl & Wieser, 2006). So vermeiden etwa gleich viele sehbehinderte (19) und blinde (24) Umfrageteilnehmer gezielt bestimmte Bereiche wie große Plätze, Wege mit undeutlichen Bodenstrukturen oder unübersichtliche Kreuzungen ebenso wie Straßenquerungen ohne blindengerechte Beampelung. Gleichzeitig war mit 83 (94,3%) der Befragten die überwiegende Mehrheit bereit, zumindest einen kleinen Umweg von bis zu 5 Minuten (55 Nennungen bzw. 62,5%) oder einen mittleren Umweg von bis zu 15 Minuten (10 Nennungen bzw. 11,4%) für einen besser geeigneteren Weg zu akzeptieren. 18 (29,4%) der Befragten würden einen Umweg sogar uneingeschränkt akzeptieren. Dabei bestanden hinsichtlich der Gruppen der sehbehin-

derten und blinden Befragten keine signifikanten Unterschiede bei der Beantwortung dieser Frage. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

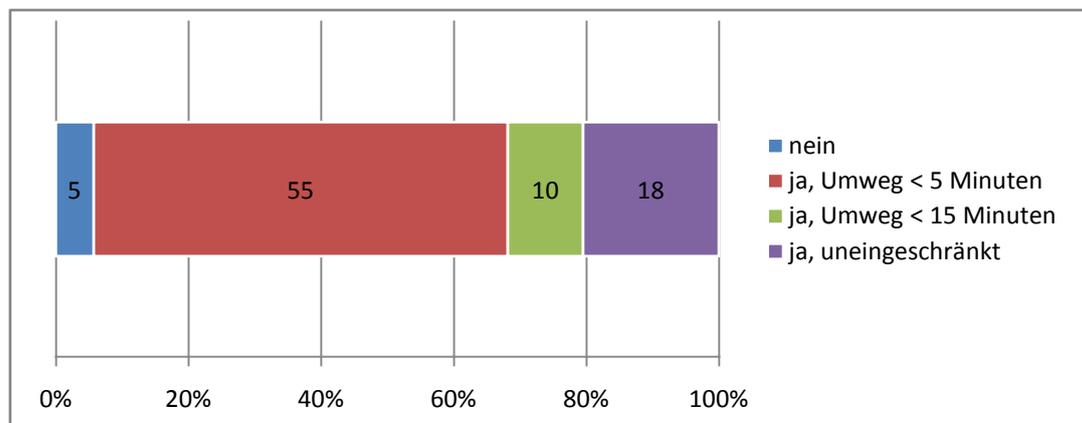


Abbildung 3.4: Bereitschaft der Befragten in Bezug auf Umwege bei besser geeigneten Routen

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Kriterien für einen geeigneten und als angenehm empfundenen Weg nicht auf dessen Wegstrecke oder die Zeit reduziert werden können, obgleich diese beiden Kriterien nach wie vor sehr wichtig sind. Umwege werden nur im begrenzten Maß als akzeptabel angesehen. Aus der Vermeidung von Bereichen mit wenigen Orientierungsmerkmalen wie großen Plätzen folgt gleichermaßen, dass Bereiche mit einer hohen Anzahl an Orientierungsmerkmalen bevorzugt werden, so dass ein entsprechendes Kriterium für die Bewertung eines Wegs abgeleitet werden kann. Die aktuelle Situation des Benutzers bildet ein weiteres Kriterium bei der Bewertung einer geeigneten Route. Blinde Fußgänger verwenden beispielsweise für den Bereich der Mikronavigation hauptsächlich einen Blindenlangstock. Wird der blinde Fußgänger jedoch durch einen Blindenführhund begleitet, können beispielsweise Rolltreppen nicht passiert werden, so dass diese Abschnitte nicht als Teil einer Route zur Verfügung stehen. Ein Vergleich der Gruppen der sehbehinderten und blinden Teilnehmer ergibt eine große Überschneidung an Umgebungsmerkmalen sowie der eingesetzten Hilfsmittel. Diese Schnittmenge wird jedoch von den persönlichen Fähigkeiten jedes einzelnen Sehgeschädigten beeinflusst, insbesondere viele der sehbehinderten Befragten verwenden für die Navigation und Orientierung zusätzlich visuell wahrnehmbare Umgebungsmerkmale.

Für die Bewertung einer Route bestehen über die klassischen Kriterien Weglänge und benötigte Zeit eine Vielzahl weiterer, wie die obigen Ausführungen exemplarisch unterlegen. Bisher weit verbreitete Ansätze für die Berechnung der Route basieren zumeist auf der isolierten Auswertung einzelner Kriterien, so dass eine Erfüllung der gestellten Anforderung nach der Berücksichtigung verschiedener Kriterien nicht gewährleistet werden kann. Entsprechend müssen neue multikriterielle Verfahren entwickelt werden, wie sie in dieser Arbeit in Kapitel 5 vorgestellt werden.

3.3.4 Multimodalität

Einen weiteren Unterschied zur Fahrzeugnavigation bildet die Multimodalität²³ im Sinne der Benutzung verschiedener Verkehrsmittel. Im städtischen Verkehr ist eine alleinige Fortbewegung zu Fuß nicht praktikabel – üblicherweise werden öffentliche Verkehrsmittel wie Straßen-, S- und U-Bahnen oder aber Busse genutzt, um längere Strecken zurückzulegen. In mehreren Arbeiten wurde die Problematik der Planung und Durchführung multimodaler Routen bearbeitet, wobei teilweise kommerzielle Systeme entstanden sind, die von den beteiligten Verkehrsbetrieben eingesetzt werden. Beispiele umfassen die Projekte EU-Spirit²⁴, Intrest²⁵ oder BAIM (Bühler et al., 2006) in denen Basisarbeiten zur multimodalen Fortbewegung sowie zu durchgängigen elektronischen Fahrplaninformationssystemen durchgeführt werden.

Aktuelle Navigationssysteme werden fast ausschließlich als alleinstehend isolierte Systeme ausgeliefert, die sich mangels Schnittstellen nur sehr schwer in ein die multimodale Routenplanung unterstützendes Gesamtsystem integrieren lassen. Erste Ergebnisse aus Forschungsarbeiten sind zwar bereits verfügbar (Rehrl et al., 2005) sowie (Rehrl, Bruntsch & Mentz, 2007), befinden sich jedoch erst im prototypischen Stadium. Die Komplexität der Integration mehrerer Modalitäten für die Routenplanung ist enorm hoch, da die Datenbasis über die einzelnen regionalen ÖPNV-Anbieter sehr heterogen ist. Demgegenüber steht der große Bedarf seitens der Benutzer an derartigen Systemen, der jedoch aufgrund des derzeitigen Entwicklungsstandes nur unzureichend befriedigt werden kann.

Die Multimodalität der Fortbewegung ist für mobilitätseingeschränkte Benutzer von sehr großer Bedeutung, da durch ihre Benutzung eine erhebliche Steigerung der Mobilität, insbesondere hinsichtlich der zurücklegbaren Entfernungen, ermöglicht wird. Abbildung 3.5 zeigt die Ergebnisse der Umfrage in Bezug auf die Nutzung des öffentlichen Nachverkehrs, wobei eine sehr starke Nutzung von Bussen und Taxen besteht. So geben 71 (81 %) der Befragten eine mindestens regelmäßige Nutzung von Bussen und 76 (86 %) eine mindestens regelmäßige Nutzung von Taxen an. Bei der Nutzung von Taxen hoben viele der Befragten hervor, dass keine Bindung an feste Haltestellen bestünde und der Weg zum gewünschten Ziel somit nicht zu Fuß zurückgelegt werden müsse. Ein Vergleich der Gruppen der sehbehinderten und blinden Befragten ergibt für die Benutzung der genannten Verkehrsmittel keinen signifikanten Unterschied.

²³ Der Begriff der Multimodalität hat abhängig vom Anwendungsbereich unterschiedliche Bedeutungen. Ausschließlich in diesem Abschnitt der Anforderungsanalyse erfolgt, soweit im weiteren Verlauf nicht besonders gekennzeichnet, eine Anwendung des Begriffs in Bezug auf die Verwendung verschiedener Verkehrsmittel. Die zentrale und für diese Arbeit relevante Bildung des Begriffs „Multimodalität“ innerhalb des Kontexts der multimodalen Annotation geographischer Daten erfolgt im anschließenden Kapitel 4.

²⁴ Projekt EU-Spirit: www.eu-spirit.com

²⁵ Projekt Intrest: www.intrest.org

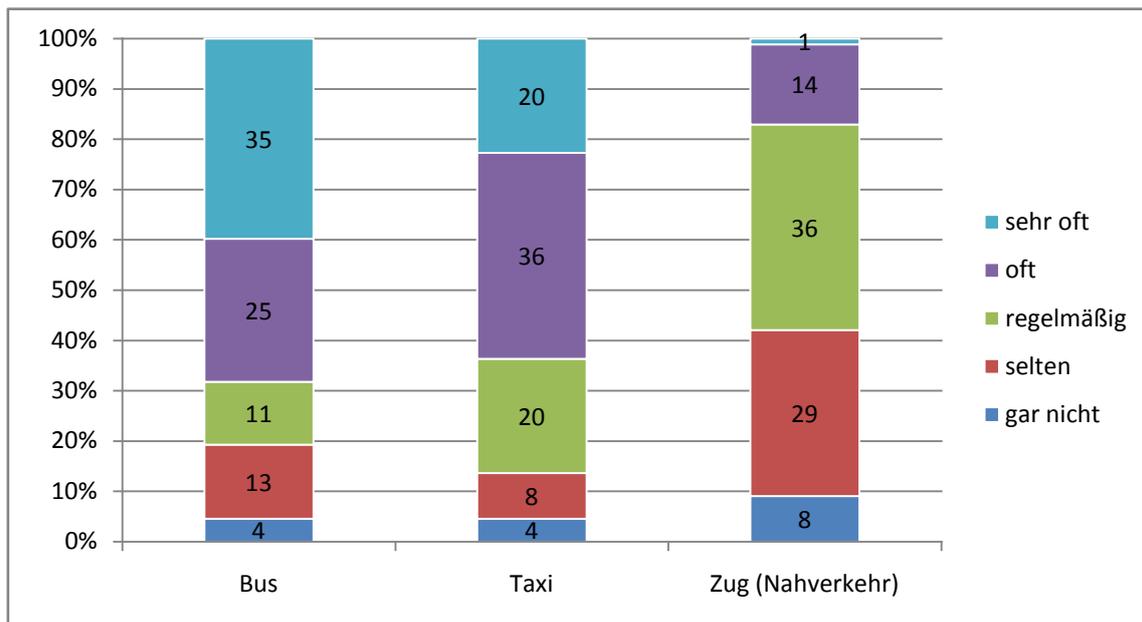


Abbildung 3.5: Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs

Sehr beschwerliche Abschnitte einer Route, wie sie beispielsweise längere starke Anstiege für Rollstuhlfahrer oder Senioren darstellen, lassen sich durch die Verwendung von öffentlichen Verkehrsmitteln leichter bewältigen. Für sehgeschädigte Fußgänger ergibt sich ein großer Vorteil dadurch, dass die mit dem öffentlichen Verkehrsmittel zurückgelegte Strecke nicht erlernt werden muss. Entsprechend ist die mentale Belastung für diesen Teil der Wegstrecke deutlich geringer, wie das folgende Zitat eines Teilnehmers der Umfrage verdeutlicht:

„Da man den Weg, den man fährt, nicht erlernen muss, ist es eine Erleichterung.“

Eine multimodale Fortbewegung ist jedoch nur dann möglich, wenn Verkehrsmittel zugänglich im Sinne der strukturellen Barrierefreiheit sind und die notwendigen Informationen bezüglich der aktuellen Ist-Fahrplandaten dem jeweiligen Nutzer in geeigneter Form zugänglich gemacht werden. So gaben 33 (37,5%) der Befragten Sehgeschädigten an, häufig mit Problemen bei der Zugänglichkeit von Informationen bezüglich Fahrplandaten, Haltestellenänderungen oder der Liniennummer des aktuellen Verkehrsmittels konfrontiert zu sein. Verdeutlicht wird dies durch das folgende Zitat aus der Umfrage:

„Man weiß nicht, welche Bahn oder welcher Bus gerade in der Station einfährt. Bei Verspätungen wird man nicht immer akustisch informiert, sondern die werden auf der optischen Anzeigetafel angezeigt.“

Zudem sind gerade akustische Ansagen in Bussen und Straßenbahnen für sehgeschädigte Personen aufgrund einer hohen Umgebungslautstärke oder unzureichender technischer Ausstattung der Verkehrsmittel oft nicht verständlich, so dass Personen dieser Benutzergruppe große Schwierigkeiten bei der Identifizierung der gewünschten Ausstiegshaltestelle haben.

Speziell zu dieser Thematik wurden bereits mehrere Forschungsprojekte und -arbeiten durchgeführt, so dass eine zukünftige Integration entsprechender Informationsangebote realistisch erscheint, siehe dazu auch (Völkel & Weber, 2006). Entsprechend der obigen Ausführungen ergeben sich die folgenden Anforderungen für die Bereitstellung von Informationen durch Hilfsmittel für die Navigation von mobilitätseingeschränkten Fußgängern:

- Integration von Ist-Fahrplandaten des öffentlichen Nahverkehrs
- Bereitstellung von Fahrplandaten in einem zugänglichen Format
- Bereitstellung von Informationen über bauliche Barrieren und Zugangsmöglichkeiten
- Integration von öffentlichen Verkehrsmitteln in die Routenberechnung

3.3.5 Temporale Anforderungen

Viele der genannten Anforderungen unterliegen über einen bestimmten Zeitraum betrachtet Änderungen und können daher nicht statisch innerhalb eines Systems umgesetzt werden. Temporale Anforderungen werden auf zwei Ebenen an ein Navigationssystem gestellt. Zum einen unterliegen geographische Daten und Attribute unter Umständen über die Zeit Veränderungen, zum anderen muss das Benutzerprofil und damit das Benutzermodell mit zunehmender Länge der Interaktion adaptiert werden. Die Interaktion umfasst dabei die Verwendung des Navigationssystems zur eigentlichen Navigation, aber auch zur Erhebung von zusätzlichen Daten wie Annotationen.

Geographische Daten und Attribute, die einen zeitlich begrenzten Einfluss auf die Umgebungsbedingungen haben, umfassen beispielsweise Hindernisse und Gefahren wie Baustellen und Veranstaltungen. Baustellen haben einen direkten Einfluss auf die Zugänglichkeit von bestimmten Wegen, Veranstaltungen können ebenso einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung von Wegabschnitten nehmen. Bei Baustellen werden beispielsweise im Gehwegbereich die Fußgänger häufig auf die gegenüberliegende Straßenseite umgeleitet, was im Falle von blinden Fußgängern sehr problematisch ist, da zumeist kein gesicherter Überweg vorhanden ist. Gleichzeitig ist die Lärmbelastung von Baustellen für viele sehgeschädigte Personen sehr problematisch, wie das folgende Zitat eines Teilnehmers der Umfrage verdeutlicht:

„Das Schlimmste, was passieren kann, ist der Lärm von Baustellen, weil man sich dann nicht mehr orientieren kann.“

Veranstaltungen wie die Kieler Woche als großes Sportereignis und Volksfest führen dazu, dass bestimmte Wegstrecken allein durch das immense Aufkommen von Gästen für viele mobilitätseingeschränkte Fußgänger nicht mehr geeignet sind. Andere Auswirkungen umfassen die kurzfristige und zeitlich begrenzte Verlegung von Haltestellen des ÖPNV, wobei

diese ebenfalls für blinde und stark sehgeschädigte Fußgänger schwer nachzuvollziehen sind.

Bei der Verwendung von Fotos für die Zielführung von Fußgängern sind temporale Eigenschaften ebenfalls von großer Bedeutung. Wie bereits in Abschnitt 2.5 beschrieben, können zu einer anderen Tages- oder auch Jahreszeit aufgenommene Fotos von vielen Benutzern nicht uneingeschränkt mit den veränderten äußeren Umweltbedingungen korreliert werden. Zudem sind weitere Faktoren wie das Wetter entscheidend für die Eignung der jeweiligen Aufnahmen.

Werden Annotationen als von Benutzern erhobene Daten betrachtet, so müssen diese ebenfalls anhand temporaler Kriterien bewertet werden. Im simplen Fall einer Bewertung von Wegstrecken durch die Benutzer sollten entsprechend des Alters der Bewertung unterschiedliche Gewichtungen bei der Bildung eines Gesamtwertes der Bewertungen vorgenommen werden. Da die Bewertung über die Zeit aufgrund dynamischer Umweltbedingungen Änderungen unterliegen, kann eine gleichgewichtete Bewertung von den tatsächlichen Gegebenheiten abweichen. Entsprechend müssen aktuellere Bewertungen im Gegensatz zu älteren Bewertungen mit einem höheren Gewicht in die Berechnung des Gesamtwerts einfließen.

3.4 Zusammenfassung

Die Anforderungen von Fußgängern und insbesondere von mobilitätseingeschränkten Fußgängern unterscheiden sich erheblich von den Anforderungen, welche bisher an Systeme für die Fahrzeugnavigation gestellt wurden. Die Ergebnisse der empirischen Analyse der Bedürfnisse sehgeschädigter Benutzer ergeben einen hohen Bedarf an Systemen zur Unterstützung der Mobilität, so dass eine selbständige Bewältigung von Wegen auch in für die Benutzer unbekanntem Gebieten leichter möglich wird. Gleiches gilt für andere Benutzergruppen wie beispielsweise Rollstuhlfahrer oder Senioren.

Notwendig ist eine Erweiterung der geographischen Basisdaten, da ohne spezifische Informationen Routen lediglich in Bezug auf ihre Länge optimiert werden können. Vielversprechende Ansätze für die Akquisition zusätzlicher Daten beinhalten den Einbezug von Benutzern. In dieser Arbeit wird daher das Verfahren der multimodalen Annotation entwickelt, welches eine formale Grundlage für die Aufnahme von zusätzlichen Daten bildet. Aus den Anforderungen mobilitätseingeschränkter Benutzer ergibt sich die Notwendigkeit, Routen bezüglich multipler Kriterien wie etwa der Sicherheit, der Barrierefreiheit oder aber dem Aufwand zu optimieren. Es werden daher Verfahren benötigt, welche einen Ausgleich zwischen den oftmals diametralen Kriterien erlauben. Derartige Verfahren müssen eine Personalisierung erlauben, da die Gruppe der mobilitätseingeschränkten Benutzer in sich sehr heterogen ist. Ein derartiges Verfahren einer personalisierten multikriteriellen Routenbe-

rechnung auf Basis erweiterter geographischer Daten wird in dieser Arbeit in Kapitel 5 näher beschrieben.

4 Multimodale Annotation geographischer Daten

Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept der multimodalen Annotation bildet die Grundlage für Verfahren zur semi-automatischen Akquisition geographischer Daten. Multimodale Annotationen werden dafür in einen expliziten und einen impliziten Teil klassifiziert unterteilt. Beispiele für explizite Annotationen umfassen die direkte Eingabe von Informationen durch den Benutzer mittels Stift- oder Spracheingabe. Implizite Annotationen können durch die Analyse der LOM-Modalität (Location-Oriented-Movement) erfolgen, welche in Abschnitt 4.1 eingeführt wird. Anschließend erfolgt in 4.2 die Bildung zentraler Begriffe aus dem Bereich der Geographischen Informationssysteme (GIS) sowie eine formale Definition des Begriffs der Annotation geographischer Daten. In Abschnitt 4.3 wird eine Klassifizierung multimodaler Annotationen entwickelt, so dass eine Kategorisierung ermöglicht wird. In Abschnitt 4.4 werden schließlich Annotationsprozesse untersucht und konkrete Beispiele für multimodale Annotationen gegeben.

4.1 LOM-Modalität

Die LOM-Modalität nimmt eine zentrale Position bei den in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren zur multimodalen Annotation geographischer Daten ein. Bevor eine formale Definition der LOM-Modalität erfolgt, werden die Begriffe ‚Modalität‘ und ‚Medien‘ eingeführt und gegeneinander abgegrenzt.

In der Psychologie erfolgt die Definition des Begriffs ‚Modalität‘ im Teilbereich der Sinnesphysiologie, in dem Modalitäten im Kontext der Klassifikation der Rezeptoren zur Wahrnehmung behandelt werden (Birbaumer & Schmidt, 2005). Eine Modalität wird hier als Gesamtheit aller Eindrücke definiert, die über ein Sinnesorgan vermittelt werden. Der Modalität wird eine Qualität als Maß zugeordnet, welche Informationen mit einem Sinn erkannt werden können (z. B. Farben, Töne). Modalitäten werden in der Sinnesphysiologie Sensorsystemen zugeordnet, wobei Beispiele Berührung und Temperatur für das haptische, Hören und Gleichgewicht für das auditive oder aber Sehen für das visuelle Sensorsystem umfassen.

Sutcliffe (Sutcliffe, 2003) verwendet den Begriff Modalität für die Sinne, die für das Senden und Empfangen von Nachrichten verwendet werden. Dabei erfolgt jedoch eine explizite Beschränkung auf die menschliche Wahrnehmung (Sehen, Hören, Tasten, Schme-

cken und Riechen). Demgegenüber erfolgt in (Nigay & Coutaz, 1993) eine weitgehend technische Definition, wobei eine Modalität als Typ des Kommunikationskanals definiert wird, der für die Übermittlung und den Empfang von Informationen verwendet wird. In dieser Arbeit wird die letzte Definition für die weiteren Diskussionen und insbesondere für die Einführung der LOM-Modalität zugrunde gelegt.

Für einen Benutzer stehen lediglich die menschlichen Sinne für die Aufnahme von Information zur Verfügung: Sehen, Hören, Fühlen, Schmecken und Riechen, wobei die beiden letztgenannten für die multimodale Kommunikation mit einem technischen System derzeit eine untergeordnete Rolle spielen. Für die Ausgabe bzw. die Übermittlung von Informationen sind für den Benutzer andere Fähigkeiten wie etwa die menschliche Sprache, Bewegungen und Gesten, die Mimik oder aber die Körperhaltung relevant. Bei technischen Systemen erfolgt die Aufnahme von Informationen über Sensoren wie Kameras, Tastaturen, Mikrophone oder druckempfindliche Oberflächen. Ebenso wie für die Eingabe benötigt ein technisches System entsprechende Komponenten für die Ausgabe. Beispielsweise werden für die Sprachausgabe Lautsprecher und für die Darstellung von Texten oder Grafiken eine Bildschirmfläche bzw. ein anderes geeignetes Ausgabegerät benötigt. Die Möglichkeiten der Aufnahme und Vermittlung von Informationen hängen bei einem technischen System somit direkt von den verfügbaren Sensoren und Ausgabekomponenten ab.

Oftmals wird keine klare Abgrenzung der Begriffe Modalität und Medium getroffen, was jedoch für die Bildung einer klaren Begrifflichkeit notwendig ist. Medien werden als die Mittel verstanden, die für die Übermittlung der Information verwendet werden (Sutcliffe, 2003). An dieser Stelle besteht ein Bezug zur Darstellung und nicht zur verwendeten Technologie für die eigentliche Übermittlung. Im Kontext dieser Arbeit beschränkt sich die Betrachtung auf wahrnehmbare Medien, wie beispielsweise Text, Bilder und Sprache. Die Kommunikation zwischen Menschen und/oder technischen Systemen erfolgt dabei über eine oder mehrere Modalitäten. Die Kommunikationsteilnehmer nehmen innerhalb der Übermittlung von Informationen entweder die Rolle des Senders oder Empfängers ein. Während einer Interaktion kann die Rollenverteilung einem stetigen Wechsel unterliegen und in bestimmten Situationen sind auch Überlappungen möglich. Die eigentliche Darstellung erfolgt über das verwendete Medium, wobei für die Übermittlung von Information nicht jede Kombination aus Modalität und Medium möglich ist. Eine Übersicht einiger Kombinationsmöglichkeiten ist in Tabelle 4.1 dargestellt, wobei an dieser Stelle kein Anspruch auf Vollständigkeit besteht.

Modalität	Medium	Beispiel
akustisch	Sprache	vorgelesene Webseite
	Musik	abgespielte Musik
	Geräusche	Klatschen oder Lachen
visuell	Text	Schrift dargestellt auf einem Bildschirm
	Bild	Bitmap-Darstellung auf einer Webseite
	Geste	Zeigebewegung des Arms
taktil	Tastatur	Eingabe von Text durch drücken von Tasten
	Maus	Bewegungen sowie Bedienung der Maustasten
	Braille	Darstellung von Textstücken

Tabelle 4.1: Mögliche Kombinationen von Modalitäten und Medien

Für die Kommunikation kann eine Kombination mehrerer Modalitäten und Medien erfolgen. Das Abspielen eines Videos ist beispielsweise eine multimediale Darstellung, benötigt für den Kommunikationsvorgang bzw. die Informationsvermittlung jedoch ebenso mehrere Modalitäten (eine visuelle und eine akustische). Bei multimedialen Benutzungsschnittstellen liegt der Fokus auf der Darstellung der Informationen, die basierend auf den perzeptiven und kognitiven Fähigkeiten des Benutzers aufbereitet werden können. In Abgrenzung dazu erfolgt die Fokussierung bei multimodalen Benutzungsschnittstellen auf die menschlichen Wahrnehmungskanäle bzw. auf die Kommunikationskanäle bei technischen Systemen (Turk & Robertson, 2000). In diesem Sinne sind multimediale Benutzungsschnittstellen als Teilmenge multimodaler Benutzungsschnittstellen anzusehen. Eine weitere Abgrenzung kann bei der Verarbeitung der Eingabe getroffen werden, bei der viele multimodale Systeme eine Kombination von Eingaben verschiedener Modalität zu einem aggregierten Kommando erlauben. Der Prozess der Kommandoaggregation wird als ‚Fusion‘ bezeichnet. Bei der Eingabe von Kommandos oder Informationen können zudem alternative Modalitäten bereitgestellt werden, wie dies bei Diktiersystemen der Fall ist, bei denen die Texteingabe mittels einer Spracherkennung und alternativ mittels der Tastatur erfolgt. Eines der ersten vorgestellten multimodalen Systeme ist das „Put-That-There“-System (Bolt, 1980), welches dem Benutzer das Verschieben von Objekten durch das gleichzeitige Zeigen eines Zielortes und die Benennung des jeweiligen Objekts erlaubt.

Die LOM-Modalität integriert den Ort, die Orientierung und die Bewegung des Benutzers in einer Modalität und kann somit als Ortsmodalität verstanden werden. Dabei erfolgt durch die Integration der Bewegung des Benutzers kein Widerspruch, da diese lediglich die Änderung des Orts über die Zeit darstellt. In der wissenschaftlichen Literatur wird bei der Integration von Ortsinformationen des Benutzers zumeist von Kontextinformationen bezie-

ungsweise von ‚Context-Aware Computing‘ gesprochen. Nachfolgend wird daher eine Abgrenzung zum klassischen Kontextbegriff vorgenommen. Der Begriff des ‚Context-Aware Computing‘ wurde erstmals in (Schilit & Theimer, 1994) verwendet, wobei der Begriff des Kontexts als Ort, Identitäten der in der näheren Umgebung befindlichen Personen und Objekte sowie Änderungen dieser Objekte definiert wird. Diese Definition wird in (Schilit, Adams & Want, 1994) leicht modifiziert: Innerhalb des Kontexts werden Informationen über den Ort des Benutzers und in der Nähe zur Verfügung stehender Ressourcen zusammengefasst. In (Pascoe, 1998) wird der Kontextbegriff dagegen leicht verallgemeinernd als Untermenge physischer und konzeptioneller Zustände definiert, die für eine bestimmte Entität einen Nutzen darstellen. In (Dey, 2001) wird der Begriff ‚Kontext‘ wiederum wie folgt definiert:

Context is any information that can be used to characterize the situation of an entity. An entity is a person, place, or object that is considered relevant to the interaction between a user and an application, including the user and applications themselves.

Informationen werden somit genau dann als Kontext definiert, wenn sie für die Charakterisierung der Situation einer Entität – konkret einer Person, eines Orts oder eines Objekts – verwendet werden können, wobei die Entität für die Interaktion zwischen einem Benutzer und einer Applikation von Bedeutung ist. Dabei werden der Benutzer und die Applikation ebenfalls als Entitäten eingestuft. Obwohl die Definition von Dey auf den vorhergehenden aufbaut, erfolgt keine weitere Verfeinerung bestehender Ansätze, sondern eine Verallgemeinerung und Ausdehnung des Gültigkeitsbereiches. Die damit geschaffene Begrifflichkeit umfasst entsprechend alle Informationen, die einen Bezug auf die Situation der für die Interaktion wichtigen Entitäten haben. Um eine Abgrenzung zu ermöglichen und eine zu weit führende Anwendung des Kontextbegriffs zu vermeiden, muss der Kontextbegriff auf die aktuelle Situation beschränkt werden, so dass die folgende Definition für die weitere Diskussion abgeleitet wird:

Der Kontext umfasst alle Informationen, welche die aktuelle Situation des Benutzers und des Systems beschreiben, einen Bezug zur Interaktion zwischen Benutzer und System aufweisen, jedoch nicht das Resultat dieser Interaktion sind.

Obwohl der Ort eines Benutzers und dessen Orientierung gemeinhin als Kontextinformationen verstanden werden, ermöglicht gerade die letzte Definition des Kontextbegriffs eine detailliertere Differenzierung. Bei Navigationssystemen können beispielsweise der Standort, die Orientierung und die Bewegung als aktive Systemeingaben des Benutzers verstanden werden und sind somit das Resultat einer Interaktion, so dass eine geeignete Modalität – im konkreten Fall die LOM-Modalität – definiert werden muss. Die Definition der LOM-Modalität steht dabei in keinem Widerspruch zu den Grundbegriffen kontextsensitiver Anwendungen, es erfolgt jedoch eine Betonung der eigentlichen Interaktion. Die LOM-Modalität ist eine zeitbehaftete Ortsmodalität, welche die Informationen über den Ort, die

Orientierung und die Bewegung eines Benutzers in einer Modalität aggregiert und wie folgt definiert ist:

Definition 4.1: Sei $P = \{(x, y) \mid x \in W_x \wedge y \in W_y\}$ die Menge aller möglichen Positionen, wobei W_x und W_y die Wertebereiche der x - und y -Koordinaten des verwendeten Bezugssystems sind, sei T die Menge aller Zeitpunkte. Sei ferner K die Menge aller möglichen Orientierungen des Benutzers. Dann sind Ausprägungen der LOM-Modalität wie folgt strukturiert:

$$LOM = \{(p_1, o_1, t_1), (p_2, o_2, t_2), \dots, (p_n, o_n, t_n)\},$$

wobei $p_i \in P$, $o_i \in K$, $t_i \in T$ und $t_i < t_{i+1} \forall i \in \{1, 2, \dots, n-1\}$.

Die jeweilige Relation (p_i, o_i, t_i) beinhaltet die Position p_i und Orientierung o_i des Benutzers zu einem Zeitpunkt t_i . Für eine statische Ortsangabe inklusive der Orientierung ergibt sich $lom_{stat} = (p, o, t)$. Für die Repräsentierung einer dynamischen Ausprägung wird die Information der LOM-Modalität als eine nach den Zeitpunkten t_i geordnete Folge repräsentiert: $lom_{dyn} = (p_1, o_1, t_1), (p_2, o_2, t_2), \dots, (p_n, o_n, t_n)$. Entsprechend lassen sich Bewegungen durch die Auswertung der Positionen einer diskreten Aufnahme einzelner Informationseinheiten der LOM-Modalität über die Zeit bestimmen. Die Analyse der aus der LOM-Modalität erhältlichen Informationen erlaubt dabei aufgrund der zeitlichen Kohärenz der Teilmodalitäten die Bildung semantisch höherwertiger Aussagen, wie etwa die Bestimmung von Verweildauern oder Bewegungsprofilen.

4.2 Begriffsbildung und Definition

Zu Beginn dieses Abschnitts erfolgt eine Einführung zentraler Begriffe des Themenkomplexes Geographischer Informationssysteme (GIS), in dessen weiteren Kontext die Verfahren dieser Arbeit stehen. Bis dato existiert keine durchgängig akzeptierte Definition für Geographische Informationssysteme, vielmehr werden solche Systeme oftmals sehr allgemein als eine Menge von Werkzeugen für die Eingabe, Verwaltung, Bereitstellung, Manipulation, Analyse und Ausgabe geographischer Daten definiert (Marble, Calkins & Peuquet, 1984). In neueren Arbeiten wird die genannte Definition um den zentralen Aspekt der Unterstützung von Entscheidungsprozessen erweitert (Cowen, 1998), (Foote & Lynch, 1996) und (Grimshaw, 1999), der eine wesentliche Rolle in der aktuellen Forschung einnimmt. Ein Navigationssystem und insbesondere auch ein System für die Annotation geographischer Daten zum Zwecke einer personalisierten Fußgängernavigation fallen nach der angeführten Definition direkt in die Klasse Geographischer Informationssysteme.

Ein Datum wird nach (Malczewski, 1999) als geographisch angesehen, wenn es mit einem Ort oder einer Position assoziiert werden kann. Die Begriffe ‚geographisch‘ und ‚räum-

lich‘ werden zumeist synonym verwendet, so dass in dieser Arbeit keine weitere Unterscheidung vorgenommen wird. Ein geographisches Datum, welches einen Bezug zu einer auf der Erdoberfläche befindlichen Position besitzt, wird zusätzlich als georeferenziertes Datum bezeichnet. Die Georeferenzierung ist entsprechend der Prozess des in Bezug Setzens von Datum und realer Position (Hill, 2006).

„Geographische Entitäten“ und „geographische Objekte“ sind reale Elemente innerhalb des geographischen Raumes wie beispielsweise Städte, Gewässer oder Straßen. Geographische Entitäten werden innerhalb von Geographischen Informationssystemen mittels Punkt-, Linien- und Polygonobjekten repräsentiert und durch räumliche Daten wie etwa der Position und Attributen beschrieben. Attribute entsprechen nicht-räumlichen Eigenschaften bzw. Sachdaten, die ein geographisches Objekt charakterisieren und unterscheidbar machen. Beispiele für Attribute umfassen Hausnummern von Grundstücken, die Art des Straßenbelags oder den Grundstückswert. Da in dieser Arbeit die multimodale Annotation geographischer Daten als zentraler Bestandteil einer personalisierten Fußgängernavigation behandelt wird, muss insbesondere eine Abgrenzung der Begrifflichkeiten „Attribut“ und „Annotation“ vorgenommen werden.

Der Begriff „Annotation“ hat sprachlich in „annotatio“ seinen lateinischen Ursprung und bedeutet übersetzt „schriftliche Bemerkung“. Als Tätigkeit basiert der Begriff „Annotieren“ auf dem lateinischen „annotare“, was wiederum als anmerken, aufschreiben, aufzeichnen oder notieren übersetzt werden kann. Ebenso wie Attribute können durch Annotationen Eigenschaften von geographischen Entitäten wie beispielsweise die Höhe des Bordsteines eines Fußweges ausgedrückt werden. Im Gegensatz zu Attributen können durch Annotationen aber auch die vorhandenen geographischen Daten um zusätzliche Entitäten erweitert werden, wenn eine Annotation beispielsweise ein Hindernis beschreibt. Dementsprechend kann eine Annotation einen eigenen räumlichen Bezug besitzen, wogegen Attribute diesen immer nur durch die Zuordnung zu einer geographischen Entität erhalten, da diese lediglich bereits vorhandene nicht-räumliche Eigenschaften von geographischen Entitäten darstellen. Im konkreten Fall der Fußgängernavigation umfassen die geographischen Entitäten hauptsächlich das zumeist in einer Graphenstruktur vorliegende Wegenetz sowie Points-of-Interest. Damit sind Attribute Teil der geographischen und kartographischen Basisdaten, die für ein Navigationssystem benötigt werden. Annotationen werden dagegen erst nachträglich durch Benutzer entsprechender Systeme zu den Basisdaten hinzugefügt und haben immer auch einen direkten Personenbezug. Ein temporaler Bezug ergibt sich für Annotationen aus dem Zeitpunkt des Annotationsprozesses sowie aus zeitlichen Gültigkeitsbeschränkungen. So ist beispielsweise das Vorhandensein von Leuchtreklame lediglich bei Dunkelheit für die Orientierung eines sehbehinderten Fußgängers förderlich. Eine andere zeitliche Gültigkeitsdauer ergibt sich, wenn Annotationen reale Entitäten repräsentieren, die zu bestimmten Zeitpunkten Änderungen unterworfen sind wie beispielsweise Baustellen, die nach Fertig-

stellung der Arbeiten nicht mehr vorhanden sind. In Tabelle 4.2 ist zusammenfassend eine Übersicht der Unterschiede zwischen Attributen und Annotationen dargestellt.

	Attribut	Annotation
Objektbezug	obligatorisch	optional
räumlicher Bezug	über Objektbezug	eigenständig / über Objektbezug
Personenbezug	nicht vorhanden	vorhanden
temporaler Bezug	nicht vorhanden	vorhanden
statische / dynamische Nutzbarkeit	statisch	statisch / dynamisch

Tabelle 4.2: Vergleich der Eigenschaften von Attributen und Annotationen

Eine weitere wichtige Unterscheidung ist hinsichtlich der Nutzung von Attributen und Annotationen für die eigentliche Anwendung der Navigation zu treffen. Attribute wie beispielsweise Straßennamen ermöglichen eine statische Nutzung, so dass ein Fußgänger diese unabhängig von seiner eigentlichen Bewegung für die Orientierung verwenden kann. Bestimmte Annotationen wie etwa die Angabe der Steigung einer Wegstrecke oder die Beschreibung von Untergrundänderungen lassen sich von einem Fußgänger lediglich dynamisch und damit in der Bewegung nutzen. Dementsprechend stellt sich für die Entwicklung einer geeigneten Annotationstechnik die Problematik, wie dynamisch nutzbare Annotationen vom Benutzer aufgenommen werden können, so dass der nicht-punktuelle räumliche Bezug erhalten bleibt.

Annotationen können für die Anreicherung der geographischen Datenbasis mit zusätzlichen Attributen verwendet werden, welche um einen zusätzlichen Personenbezug und einen temporalen Bezug erweitert sind. Zudem kann eine Annotation eine geographische Entität repräsentieren und folglich die Datenbasis erweitern, wobei wiederum sowohl ein Personenbezug als auch ein temporaler Bezug bestehen. Eine multimodale Annotation a ist formal wie folgt definiert:

Definition 4.2: Sei D die Menge aller für Annotationen verwendbarer Datenobjekte, E die Menge der geographischen Entitäten und G die Menge aller Benutzergruppen. Eine Annotation a ist eine Relation, die durch

$$a = (d, lom, e, g),$$

definiert ist, wobei $d \in D$, lom eine Ausprägung der LOM-Modalität nach Definition 4.1, $e \in E$ und $g \in G$ ist.

Entsprechend ergibt sich für die Menge A aller möglichen Annotationen:

$$A \subseteq D \times LOM \times E \times G,$$

wobei LOM die Menge aller Ausprägungen der LOM-Modalität ist.

Die Definition erlaubt die Abbildung aller notwendigen Bezüge einer Annotation. Die Datenobjekte bilden die nutzbaren Informationseinheiten der Annotationen und können dabei von sehr unterschiedlicher Gestalt sein. Eine formale Festlegung erfolgt an dieser Stelle nicht, so dass nach Definition 4.2 jederzeit eine Erweiterung über beliebige Datenobjekte als Elemente der Menge D ermöglicht wird. Beispielsweise können sowohl Bilder als auch Audionachrichten als Datenobjekt ebenso verwendet werden wie Informationen über den Untergrund oder Informationen über Gerüche umliegender Geschäfte.

Bei der Annotation müssen hinsichtlich der Verwendung der Elemente aus LOM und E zwei Fälle unterschieden werden: Handelt es sich bei der Annotation um eine Attributierung einer bereits vorhandenen geographischen Entität e_{alt} , so erfolgt der eigentliche Ortsbezug der Annotation indirekt über den Ortsbezug der zugeordneten geographischen Entität, wobei diese identisch mit dem Ort des Benutzers sein kann. Die Analyse der LOM-Modalität kann dabei jedoch zusätzliche Informationen für die Annotation liefern (siehe dazu Abschnitt 4.3.4). Erfolgt durch die Annotation hingegen eine Erweiterung der Basisdaten durch eine zusätzliche geographische Entität e_{neu} , so gilt der Ortsbezug p der entsprechenden Ausprägung $lom \in LOM$ des Benutzers ebenso für e_{neu} .

In dieser Arbeit werden Verfahren zur multimodalen Annotation vorgestellt, wobei sich die Multimodalität über zwei Eigenschaften der später in Abschnitt 4.4 vorgestellten Annotationsprozesse ergibt. Zum einen wird bei einer Annotation immer auch die LOM-Modalität für die Herstellung der Ortsbezüge analysiert, so dass von einer komplementären Annotation unter Verwendung mehrerer Modalitäten gesprochen werden kann. Zum anderen erlaubt die offene Definition der Annotation den Einbezug einer Vielzahl von Datenobjekten, die je nach Aufbau eines Systems über verschiedene Eingabemodalitäten erzeugt werden können, so dass sich insgesamt die Multimodalität bezüglich zweier Ebenen ergibt.

4.3 Klassifizierung

Die in Abschnitt 4.2 vorgestellte formale Definition für die Annotation geographischer Daten erlaubt den Einbezug einer Vielzahl verschiedener Daten und Medienobjekte für den eigentlichen Annotationsprozess. In diesem Abschnitt erfolgt eine Klassifizierung von Annotationen, so dass diese bei einer späteren Verwendung aufgrund verschiedener Kriterien gruppiert werden können. Zu beachten ist, dass Annotationen hinsichtlich mehrerer Dimensionen klassifiziert werden können, so dass sich im allgemeinen Fall ein Ausprägungsvektor bezüglich der gewählten Kategorien für eine vollständige Klassifizierung einer Annotation

ergibt. In den folgenden Abschnitten werden Klassifizierungen hinsichtlich des Orts- und Benutzerbezugs, des temporalen Bezugs und des Annotationsprozesses diskutiert.

4.3.1 Ortsbezug

Jede Annotation besitzt einen Ortsbezug, wobei primär zwischen vier Typen dieses Bezuges unterschieden wird. Eine erste Unterscheidung ist hinsichtlich der Punkt- bzw. Streckenbezogenheit zu treffen. Zudem kann je nach Annotation ein zusätzlicher Orientierungsbezug notwendig sein. In Tabelle 4.3 ist eine Übersicht der verschiedenen Typen zusammen mit der Angabe einiger Beispiele für jeweils zugehörige Annotationen enthalten.

Ortsbezug	Orientierungsbezug	Annotationsbeispiele
punktuell	nicht vorhanden	Hindernis, Gerüche
	vorhanden	Foto, Leuchtreklame
streckenhaft	nicht vorhanden	Art des Untergrunds, Nutzungsfrequenz, Sicherheitseinstufung
	vorhanden	Steigung, bestimmte Geräusche

Tabelle 4.3: Übersicht der Ortsbezugstypen

Ein punktueller Ortsbezug kann durch die Angabe einer Koordinate der Form (x, y) repräsentiert werden und ist für eine Vielzahl von Annotationen gegeben, wobei sich diese meistens in die Klasse der Points-of-Interest einordnen lassen. Ein Point-of-Interest ist dabei eine spezifische Position, über die zusätzliche Informationen vorhanden sind und die für bestimmte Aktivitäten eines Benutzers von besonderer Bedeutung ist. Beispielsweise bilden die Standorte von Hindernissen Annotationen der genannten Klasse. Da die meisten Hindernisse keinen Orientierungsbezug für eine eindeutige Beschreibung benötigen, lassen sich diese durch die Angabe einer Beschreibung und des punktuellen Ortsbezug repräsentieren, so dass die Annotation eines Pollers prinzipiell durch die einfache Angaben seines Standorts als Ortsbezug vorgenommen werden kann. Punktuelle Ortsbezüge müssen bei bestimmten Annotationen wie etwa Fotos durch einen Orientierungsbezug erweitert werden. Fotos bilden eine für viele Benutzer besonders gut geeignete Darstellung räumlicher Informationen. Der Entscheidungsprozess bei der Navigation kann jedoch nur dann optimal unterstützt werden, wenn das Foto den zu wählenden Weg perspektivisch korrekt darstellt, so dass zusätzlich zum eigentlichen Ort der Aufnahme auch der Orientierungsbezug gegeben sein muss.

Annotationen mit einem streckenhaften Ortsbezug umfassen beispielsweise Informationen über den Untergrund des Wegs oder aber die Nutzungsfrequenz eines Wegabschnitts. Im ersteren Fall bezieht sich die Gültigkeit der Annotation auf alle Positionen, die auf der

durch den Ortsbezug bestimmten Strecke liegen. Im zweiten Fall wird durch die Annotation lediglich ein Maß ausgedrückt, welches für die Bewertung des Wegabschnitts herangezogen werden kann. Streckenhafte Ortsbezüge mit Orientierungsbezug werden von allen Annotationen benötigt, bei denen die Richtung einen entscheidenden Einfluss auf die Gültigkeit bzw. auf die Ausprägung hat. So ist beispielsweise bei der Angabe einer Steigung die Richtung für Rollstuhlfahrer von großer Bedeutung, da ein abfallender Wegabschnitt eine Erleichterung, ein steigender jedoch eine Erschwerung des Wegs bedeutet.

Bei der Entwicklung geeigneter Annotationstechniken und -prozesse muss je nach Annotation ein entsprechender Ortsbezug vorhanden sein, da ansonsten die Nutzbarkeit für die Bewertung von Wegen und für die Generierung von Navigationsanweisungen eingeschränkt ist. Ein entsprechendes System muss dem Benutzer somit die Annotation sowohl mit punktuellen als auch mit streckenhaftem Ortsbezug ermöglichen. Zu beachten ist jedoch, dass Annotationen, die lediglich eine erweiterte Attributierung darstellen, ihren Ortsbezug über die Zuordnung zu einer bereits bestehenden geographischen Entität erhalten.

4.3.2 Temporaler Bezug

Für Annotationen ist ein temporaler Bezug immer durch den Annotationszeitpunkt gegeben und wird innerhalb der eine Annotation repräsentierenden formalen Relation durch das entsprechende Element einbezogen. Unabhängig vom Zeitpunkt der Annotation existieren weitere temporale Bezüge, die unterschiedliche Auswirkungen auf die Gültigkeit und Nutzung einer Annotation besitzen. Diese zusätzlichen temporalen Bezüge können in zwei Klassen unterteilt werden: stetige und unstetige zeitliche Bezüge.

Annotationen mit stetigen temporalen Bezügen haben eine über einen bestimmten zusammenhängenden Zeitraum gleichbleibende Auswirkung auf die Bewertung eines Bereiches oder Orts hinsichtlich verschiedener Kriterien wie beispielsweise der Zugänglichkeit oder Sicherheit. So stellen u.a. Baustellen ein Hindernis dar, welches einen begrenzten und zusammenhängenden zeitlichen Einfluss auf die Zugänglichkeit des zugehörigen Bereiches hat. Zudem erfolgen keine signifikanten Schwankungen der Auswirkungen innerhalb der zeitlichen Gültigkeit der zugehörigen Annotation.

Unstetige temporale Bezüge ergeben sich immer dann, wenn Annotationen Umgebungsmerkmale oder geographische Entitäten beschreiben beziehungsweise erweitern, welche nur unter bestimmten Bedingungen für die Navigation eines Fußgängers relevant sind. So stellt für viele sehbehinderte Fußgänger Leuchtreklame ein wesentliches Orientierungsmerkmal dar. Diese ist jedoch nur unter bestimmten Umweltbedingungen wahrnehmbar – genau dann, wenn ein genügend großer Kontrast zu den umliegenden Flächen erreicht wird. Zudem muss die Leuchtreklame aktiviert sein, was üblicherweise erst bei abnehmender Helligkeit erfolgt. In der nachfolgenden Abbildung 4.1 wird der Unterschied zwischen stetigen und unstetigen temporalen Bezügen verdeutlicht.

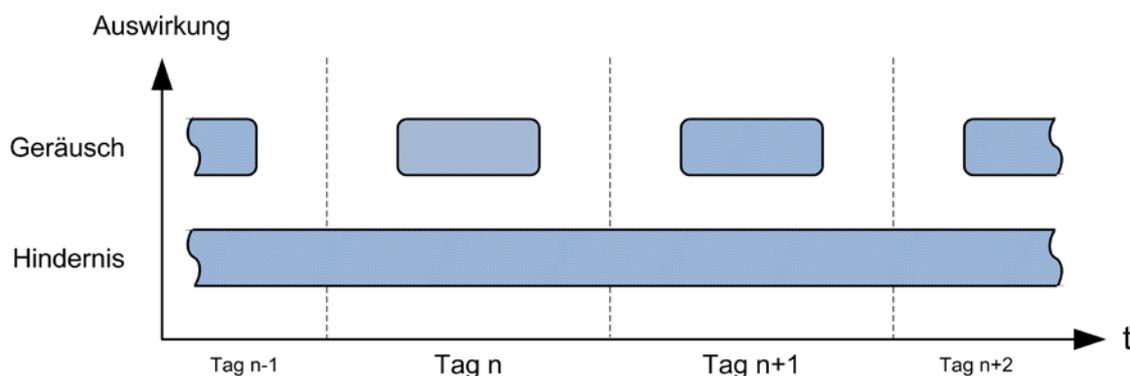


Abbildung 4.1: Stetige und unstetige temporale Bezüge am Beispiel einer Baustelle

Das Beispiel einer Baustelle zeigt zudem, dass sowohl Annotationen als auch die ggf. zugehörigen geographischen Entitäten einen stetigen als auch einen unstetigen temporalen Bezug aufweisen können. Hinsichtlich ihrer Geräuschentwicklung kann eine Baustelle zu einer starken Beeinträchtigung der akustischen Wahrnehmbarkeit der übrigen Umgebungsgeräusche führen. Diese Einschränkung ist jedoch lediglich während der täglichen Betriebszeiten der Baustelle gegeben, so dass sich entsprechend ein unstetiger temporaler Bezug ergibt. Im Gegensatz dazu erfolgt die Einschränkung des begehbaren Bereichs über die gesamte Zeitspanne unabhängig vom Betriebszustand, so dass für die Baustelle als Hindernis einen stetigen temporalen Bezug aufweist. Das obige Beispiel ist idealisiert dargestellt, da sich immer auch Unregelmäßigkeiten innerhalb unstetiger temporaler Bezüge ergeben können. Konkret treten diese für den Fall einer Baustelle an Wochenenden und Feiertagen auf, an denen keine Arbeiten durchgeführt werden und somit keine Beeinträchtigung durch eine hohe Geräuschentwicklung erfolgt.

Ein Beispiel für langfristige unstetige Zeitbezüge stellt zudem die Verwendung von Fotos für die visuelle Darstellung von Navigationsanweisung dar. Ein Foto bildet die visuellen Eigenschaften eines Ausschnitts der Umwelt zum Zeitpunkt der eigentlichen Aufnahme ab. Diese Eigenschaften unterliegen über bestimmte Zeitspannen Änderungen, so dass eine Korrelation des auf dem Foto dargestellten Ausschnitts mit der realen Umgebung für einen Benutzer eines Navigationssystems unter bestimmten Bedingungen problematisch ist. So stellt die auf dem Foto enthaltene Vegetation einen stark zeitabhängigen Faktor dar, da zum Beispiel viele Bäume lediglich in den Sommermonaten Blattwerk tragen, so dass sich die aufgenommen Szenerie in den übrigen Jahreszeiten visuell unterscheiden kann. Ebenso sind Aufnahmen im Herbst oder Winter sehr problematisch, wenn wesentliche Merkmale der aufgenommenen Szenerie von Laub oder Schnee bedeckt sind. Dementsprechend hängt die Verwendbarkeit derartiger Fotos innerhalb bestimmter Zeiträume bei der Korrelation mit der realen Umwelt vom Abstraktionsvermögen des jeweiligen Benutzers ab.

4.3.3 Benutzerbezug

Der Benutzerbezug jeder Annotationen erfolgt direkt über die Benutzergruppe des annotierenden Benutzers, so dass eine spätere Verwendung für Benutzer dieser Benutzergruppe leicht realisiert werden kann. Eine exklusive Beschränkung des Benutzerbezugs auf die Benutzergruppe des annotierenden Benutzers führt jedoch zu einer unflexiblen 1-zu-1-Beziehung zwischen Annotation und Benutzergruppe. Viele geographische Entitäten stellen nicht nur für eine einzelne Benutzergruppe eine wichtige Information hinsichtlich der Fußgängernavigation dar, so dass eine Untergliederung in ein- und mehrdimensionale Benutzerbezüge vorgenommen werden muss.

Zusatzinformationen über die Ausstattung von Ampelanlagen mit blindengerechten Tastern und akustischen Signalen sind ein Beispiel für Annotationen mit einem eindimensionalen Benutzerbezug, da diese Informationen lediglich für die Benutzergruppe der Sehgeschädigten relevant ist. Im Gegensatz dazu sind beispielsweise Treppen sowohl für Rollstuhlfahrer als auch für sehgeschädigte Fußgänger von Bedeutung, so dass die entsprechenden Annotationen einen mehrdimensionalen Benutzerbezug besitzen. Für Rollstuhlfahrer bilden Treppen ein strukturelles und unüberwindbares Hindernis. Für Sehgeschädigte stellen Treppen eine potentielle Gefahrenquelle dar, die rechtzeitig erkannt werden muss.

Ein mehrdimensionaler Benutzerbezug impliziert jedoch nicht, dass die Verwendung von den jeweiligen Annotationen beispielsweise für die Routenplanung und -berechnung oder die Generierung von Navigationsanweisungen für jede Benutzergruppe identisch ist. Gerade das Beispiel einer Treppe als annotierte geographische Entität verdeutlicht den unterschiedlichen Einbezug bei der Berechnung einer geeigneten Route: Für Rollstuhlfahrer stellt eine Treppe ein unpassierbares Hindernis dar, so dass der zugehörige Wegabschnitt für eine potentielle Route nicht verfügbar ist. Für blinde und sehbehinderte Fußgänger stellt eine Treppe dagegen ein überwindbares Hindernis dar, welches aber aufgrund möglicher Gefahrensituationen bei der Generierung von Navigationsanweisungen besonders berücksichtigt werden muss.

4.3.4 Informationsrepräsentation

Innerhalb der für die Darstellung von Annotationen formal definierten Relation $A \subseteq D \times LOM \times E \times G$ sind innerhalb der Menge D die Datenobjekte für die eigentliche Informationsrepräsentation enthalten. Da über die formale Definition keine Einschränkungen bezüglich der Struktur der Datenobjekte vorgenommen werden, ist eine Erweiterung um neue Strukturen jederzeit zulässig. Allerdings wird durch diese Erweiterbarkeit und der damit nicht möglichen Einschränkung eine klare Klassifizierung erschwert, so dass in diesem Abschnitt lediglich eine unvollständige Darstellung erfolgen kann.

Als Informationsrepräsentation bei der Annotation kommen Bilder, Audiodaten ebenso in Betracht wie etwa einfache Textnachrichten und Attribute sowie vordefinierte Datenobjekte, die bestimmte geographische Entitäten repräsentieren. Die für Annotationen verwendeten Datenobjekte lassen sich auf einer abstrakten Ebene hinsichtlich des Bedarfs an zusätzlichen Metadaten in zwei Kategorien klassifizieren. Wird beispielsweise ein Foto als Datenobjekt verwendet, das eine perspektivische Sicht für eine spätere visuelle Navigationsanweisung darstellt, so werden keine weiteren Metadaten benötigt, als bereits innerhalb der übrigen die Annotation repräsentierenden Relation enthalten sind. Andererseits bedarf beispielsweise die Annotation des Standorts einer Treppe ggf. zusätzlicher Informationen wie etwa die Anzahl der Stufen, so dass blinde Fußgänger die Möglichkeit erhalten, ihre ungefähre Position auf dem Verlauf der Treppe zu bestimmen. Entsprechend kann eine Klassifizierung hinsichtlich der Notwendigkeit des Einbezugs von zusätzlichen Metadaten in die Datenobjekte der jeweiligen Annotationen erfolgen.

4.4 Annotationsprozesse

In diesem Abschnitt wird der Prozess der Annotation durch einen Benutzer untersucht, ohne dabei detailliert auf die Struktur eines möglichen Systems einzugehen, welches in einer prototypischen Umsetzung in Kapitel 6 näher beschrieben wird. An dieser Stelle sei angemerkt, dass für den Fall, dass durch die Annotation der Datenbasis des Systems keine neue geographische Entität bzw. das zugehörige Datenobjekt hinzugefügt wird, der Benutzer eine bereits real existierende geographische Entität annotiert. Zwischen geographischen Entitäten als real existierenden Objekten und der Datenbasis besteht eine 1-zu-n-Beziehung, so dass einer geographischen Entität jeweils ein oder mehrere Datenobjekte innerhalb der Datenbasis als Repräsentation zugeordnet sind. Bei einem Fußweg als Beispiel für eine geographische Entität können dies mehrere Kanten des zugrundeliegenden Navigationsgraphen sein. Dementsprechend kann eine Annotation einer geographischen Entität zu einer Annotation mehrerer Datenobjekte innerhalb der Datenbasis führen. Die nachfolgende Diskussion erfolgt unter der Annahme, dass die Annotationen während des eigentlichen Navigationsprozesses erfolgt und der Ortsbezug somit direkt aus dem Standort, der Orientierung und der Bewegung des Benutzers ableitbar ist. Würde dagegen beispielsweise ein System für eine nachträgliche Annotation verwendet, so ließen sich die notwendigen Informationen für bestimmte streckenhafte Annotationen wie etwa der Durchschnittszeit für die Bewältigung eines Wegabschnitts nicht mehr aus der Analyse der LOM-Modalität ableiten, da diese für den Annotationsprozess nicht mehr zur Verfügung stünde.

Die multimodale Annotation geographischer Daten durch den Benutzer kann sowohl explizit als auch implizit erfolgen. Eine explizite Annotation liegt immer dann vor, wenn die Annotation durch eine direkte Systemeingabe erfolgt, welche durch eine aktive Initiierung

seitens des Benutzers gekennzeichnet ist. Beispiele für explizite Annotationen umfassen die Aufnahme von Hindernissen oder die Bewertung von Wegabschnitten durch den Benutzer. Eine implizite Annotation liegt im Gegensatz dazu immer dann vor, wenn der Benutzer die Systemeingabe nicht aktiv initiieren muss. Die von einem Benutzer für das Zurücklegen einer Wegstrecke benötigte Zeit oder aber die Anzahl der Benutzer, die eine bestimmte Wegstrecke verwendet haben, sind Beispiele für implizite Annotationen.

Als erstes Beispiel für eine explizite Annotation dient die Aufnahme eines für visuelle Navigationsanweisungen geeigneten Fotos. Der Benutzer könnte das Foto beispielsweise unter Verwendung einer in einem Navigationsgerät für Fußgänger eingebauten Kamera aufnehmen. Das Foto wäre in diesem Fall die konkrete Ausprägung des Datumsobjekts d innerhalb der Relation (d, lom, e, g) . Der Benutzerbezug ergibt sich über die dem annotierenden Benutzer zugeordnete Benutzergruppe g . Die Annotation weist einen Bezug zu der geographischen Entität e auf, die über eine Korrelation der Position der Annotation bestimmt werden kann. Die Position p der Annotation wird dabei über die Analyse der LOM-Modalität des Benutzers ermittelt und ist in der entsprechenden Relationsausprägung $lom = (p, o, t)$ enthalten. Beispiele für geographische Entitäten sind unter anderem Gehwege oder andere für Fußgänger zugängliche Bereiche. Zusätzlich muss die Orientierung der Aufnahme ermittelt werden, so dass die spätere Verwendung für eine perspektivisch korrekte visuelle Darstellung von Navigationsanweisungen ermöglicht werden kann. Die Orientierung o und damit der relative Raumbezug wird ebenfalls über die Analyse der LOM-Modalität ermittelt. Konkret werden dann die für die verschiedenen Bezüge notwendigen Informationen über die Auswertung der entsprechenden Ausprägung (d, lom, e, g) der Annotation gewonnen:

- Datumsobjekt d : das vom Benutzer aufgenommene Foto
- Benutzerbezug g : die dem Benutzer zugeordnete Benutzergruppe
- geographische Entität e : korreliert über Auswertung des Elements p aus lom , konkret ein Abschnitt eines Bürgersteigs
- Ortsbezug: Element p aus lom , konkret der Ort der Aufnahme des Fotos
- Orientierung: Element o aus lom , wird für eine perspektivisch korrekte Verwendung benötigt
- zeitlicher Bezug: Element t aus lom

Ein weiteres Beispiel für eine explizite Annotation bildet die Angabe des Untergrundzustands, der etwa für Rollstuhlfahrer ein Kriterium für die Eignung eines Wegs ist. Dabei werden der Benutzerbezug und der zeitlichen Bezug wie im vorigen Beispiel bestimmt. Das Datumsobjekt umfasst in diesem Fall jedoch eine Klassifizierung des Untergrundzustandes. Der Ortsbezug erfolgt im Gegensatz zum vorigen Beispiel nicht punktuell, sondern stre-

ckenhaft. Dabei muss der Benutzer den Beginn und das Ende der Annotation explizit angeben. Der Ortsbezug wird dann über die Auswertung der Bewegung des Benutzers als Folge zeitlich aufeinanderfolgender Ausprägungen der die LOM-Modalität beschreibenden Relation bestimmt. Ebenso erfolgt der Bezug zur zugehörigen geographischen Entität, wobei diese je nach zugrunde liegender Datenstruktur als Aggregation einzelner Datenobjekte abgebildet sein kann, wenn die Annotation beispielsweise für mehrere als einzelne Kanten gespeicherte Wegabschnitte gilt. Im Gegensatz dazu kann eine streckenhafte Annotation hinsichtlich des Bezugs ebenfalls lediglich einen Teil eines Datenobjekts umfassen, wenn sie beispielsweise nur für einen Anteil eines als einzelne Kante gespeicherten Wegabschnitts Gültigkeit besitzt. Konkret ergibt sich für die der Annotation zugehörige Relation des genannten Beispiels die folgende Ausprägung (d, lom, e, g) :

- Datumsobjekt d : Zustandsbewertung des Untergrunds
- Benutzerbezug g : die dem Benutzer zugeordnete Benutzergruppe
- geographische Entität e : korreliert über Auswertung der Elemente p_1, p_2, \dots, p_n aus lom , konkret ein zusammenhängender Teil eines oder mehrerer Bürgersteigabschnitte
- Ortsbezug: Elemente p_1, p_2, \dots, p_n aus lom
- Orientierung: wird für diese Annotation nicht benötigt
- zeitlicher Bezug: Elemente t_1, t_2, \dots, t_n aus lom

Implizite Annotationen werden im Gegensatz zu expliziten Annotationen nicht durch eine aktive Systemeingabe des Benutzers initiiert. Beispiele für implizite Annotationen umfassen die Nutzungshäufigkeit eines Wegabschnitts durch Fußgänger einer bestimmten Benutzergruppe oder aber die durchschnittlich benötigte Zeit für das Zurücklegen der entsprechenden Wegstrecke. Werden Nutzungshäufigkeit und Durchschnittszeit als Maß für die Eignung eines Wegabschnitts verwendet, so muss die Betrachtung richtungsabhängig erfolgen. So brauchen beispielsweise Rollstuhlfahrer für Bewältigung eines ansteigenden Wegs allgemein länger als in entgegengesetzter Richtung bei entsprechendem Gefälle. Für die genannten impliziten Annotationen ergibt sich somit schematisch die folgende Ausprägung (d, lom, e, g) :

- Datumsobjekt d : Attributbezeichnung
- Benutzerbezug g : die dem Benutzer zugeordnete Benutzergruppe
- geographische Entität e : korreliert über Auswertung der Elemente p_1, p_2, \dots, p_n aus lom , konkret ein Abschnitt eines Bürgersteigs
- Ortsbezug: Elemente p_1, p_2, \dots, p_n aus lom

- Orientierung: wird für diese Annotation nicht benötigt, da die Richtung der Bewegung über die Auswertung der Elemente p_1, p_2, \dots, p_n erfolgen kann
- zeitlicher Bezug: Elemente t_1, t_2, \dots, t_n aus lom , wobei aus t_1 und t_n die Zeitspanne für das Überwinden der Wegstrecke abgeleitet werden kann.

Das Datumsobjekt d ist für die beschriebenen impliziten Annotationen die Bezeichnung eines geeigneten Attributs, so dass eine entsprechende Auswertung der übrigen Annotationselemente vorgenommen werden kann. Die zu annotierende Wegstrecke und somit die zugehörige geographische Entität wird über die Auswertung der Elemente p_1, p_2, \dots, p_n bestimmt, wobei aufgrund der zu Beginn dieses Abschnitts beschriebenen 1-zu-n-Beziehung zwischen geographischer Entität und Datenobjekten eine Annotation mehrerer Datenobjekte erfolgen kann.

4.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung des Verfahrens der multimodalen Annotation geographischer Daten, welches auf der formalen Basis der neu definierten LOM-Modalität aufbaut. Die LOM-Modalität wird als Ortsmodalität eingeführt und integriert den Ort, die Orientierung und die Bewegung einer Person in einer Modalität. Über diese formale Basis kann das Verfahren der multimodalen Annotation in einen impliziten und einen expliziten Teil zerlegt werden, welche beide für die Akquisition zusätzlicher Daten Anwendung finden.

Basierend auf der in Kapitel 3 beschriebenen Anforderungsanalyse werden die für multimodale Annotationen notwendigen Bezüge definiert: der Ortsbezug, der Benutzerbezug und der temporale Bezug. Gleichzeitig erfolgt die Definition der Informationsrepräsentation, so dass beliebige Medien für Annotationen verwendet werden können. Das Verfahren der multimodalen Annotation erlaubt die Aufnahme von verschiedensten Daten, welche sich unter anderem für die Berechnung personalisierter und multikriteriell optimierter Routen anwenden lassen. Ein derartiges personalisierbares Verfahren wird im folgenden Kapitel beschrieben, welches auf Daten basiert, die durch die multimodale Annotation gewonnen werden können.

5 Personalisierte Routenberechnung

Derzeit verfügbare Navigationssysteme ermöglichen dem Benutzer nur sehr geringe Möglichkeiten, Einfluss auf die Berechnung der Route zu nehmen, da der Benutzer lediglich zwischen der Berechnung der schnellsten oder der kürzesten Route wählen kann. Eine direkte Personalisierung erfolgt nicht, so dass die Bedürfnisse des Benutzers nicht berücksichtigt werden. In diesem Kapitel werden grundlegende Konzepte für eine personalisierte Routenberechnung entwickelt, welche sich an den Anforderungen der in dieser Arbeit betrachteten Benutzergruppen orientieren. Im ersten Abschnitt werden bekannte graphentheoretische Grundlagen sowie Grundlagen aus dem Bereich der Multikriterienanalyse dargestellt. Darauf aufbauend erfolgt die Ableitung einer multikriteriellen und personalisierbaren Variante des bekannten Dijkstra-Algorithmus (Dijkstra, 1959), wobei Prinzipien aus dem Bereich der Multikriterienanalyse Anwendung finden. Für die Darstellung wurde der Dijkstra-Algorithmus gewählt, da für multikriterielle Probleme die Bildung einer Heuristik für den bei Navigationsproblemen allgemein effizienteren A*-Algorithmus nur sehr schwer möglich ist (Stewart & C., 1991). Abschließend werden Strategien zur Konsolidierung von Annotationen vorgestellt, so dass diese für die Bewertung von Teilstrecken und somit für die Berechnung von multikriteriell optimierten Routen verwendet werden können.

Eine Erweiterung bekannter Navigationsalgorithmen um Elemente der Multikriterienanalyse wurde bereits in anderen Arbeiten wie beispielsweise (Costelloe, Mooney & Winstantley, 2001), (Fernandez et al., 1999) und (Fujimura, 1996) vorgenommen wurde. Eine Gewichtung der Kriterien ist zudem in (Soltani, Tawfik & Fernando, 2002) beschrieben. Obwohl in diesem Kapitel der Aufbau eines derartigen Algorithmus beschrieben wird, bildet dieser nicht den Kern der vorliegenden Arbeit. Vielmehr liegt der Beitrag in der Integration der Personalisierung auf Basis der Benutzermodellierung sowie der Anwendung von konsolidierten Annotationsdaten für die Berechnung von Teilgewichten, welche als Basis für die Bestimmung einer optimalen Route verwendet werden. Dabei muss im Gegensatz zu den genannten Arbeiten zusätzlich eine Strategie zur Normalisierung der Kantengewichte angewendet werden, wofür die im Bereich der Multikriterienanalyse übliche Methode der linearen Skalentransformation Anwendung findet.

5.1 Theoretische Grundlagen

Im ersten Teil dieses Abschnitts erfolgt eine kurze Einführung der graphentheoretischen Grundlagen, welche für die Entwicklung des in dieser Arbeit vorgestellten Algorithmus benötigt werden. Die Darstellung ist dabei auf die unbedingt notwendigen zentralen Begriff-

lichkeiten beschränkt. Im zweiten Teil dieses Abschnitts erfolgt weiterhin eine Einführung der in dieser Arbeit verwendeten Konzepte aus dem Bereich der Multikriterienanalyse.

5.1.1 Graphen und Navigationsalgorithmen

Klassische Algorithmen zur Bestimmung eines kürzesten Wegs wie etwa der Dijkstra-Algorithmus oder der A*-Algorithmus verwenden als Datenstruktur einen gerichteten, gewichteten Graphen. Diese Algorithmen werden im Folgenden in Anlehnung an eines ihrer Hauptanwendungsgebiete auch als Navigationsalgorithmen bezeichnet. Ein gerichteter, gewichteter Graph ist durch $G = (V, E)$ gegeben, wobei die Knoten durch

$$V = \{v_i \mid i = 1, \dots, n\}$$

und die Kanten durch

$$E \subseteq V \times V = \{e_{ij} = \langle v_i, v_j \rangle \mid v_i, v_j \in V(G)\}$$

definiert werden. Jeder Kante $e_{ij} \in E$ wird ein Gewicht bzw. eine Wichtung $\omega_{ij} := \omega(e_{ij}) \in \mathbb{R}^+$ zugeordnet. Der in Abbildung 5.1 dargestellte Graph besteht aus den Knoten $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ sowie aus den Kanten $E = \{e_{13}, e_{21}, \dots, e_{45}\}$ mit den Gewichten $\omega(E) = \{\omega_{13} = 30, \omega_{21} = 12, \omega_{32} = 23, \dots, \omega_{45} = 17\}$.

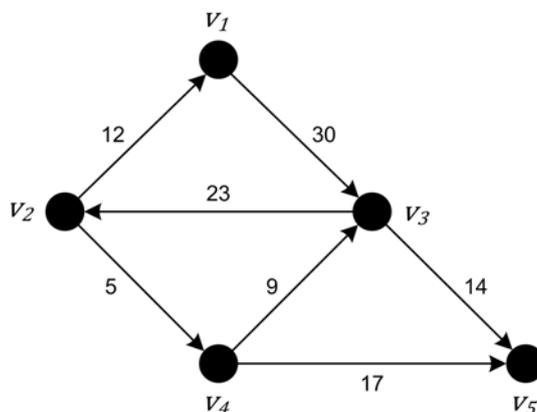


Abbildung 5.1: Beispiel für einen gerichteten, gewichteten Graphen

Ein Kantenzug $W = \langle e_{ij}, e_{jk}, \dots, e_{lm}, e_{mn} \rangle$ ist eine Verbindung zwischen einem Startknoten v_i und einem Endknoten v_n . Wird bei einem Kantenzug kein Knoten mehrfach durchlaufen, so wird der Kantenzug Weg genannt. Navigationsalgorithmen werden zur Bestimmung des kostengünstigsten Wegs zwischen einem Startknoten v_i und einem Endknoten v_n angewendet und führen zu einer Minimierung der Summe der zugehörigen Kantengewichte $\omega_{ij} + \omega_{jk} + \dots + \omega_{lm} + \omega_{mn}$. Es gilt, dass für jeden beliebigen Knoten v_m auf einem kür-

zesten Weg von v_i nach v_j der kürzeste Weg von v_i nach v_m durch den entsprechenden Teil des Gesamtweges gegeben ist. Gleiches gilt für den Weg von v_m nach v_n . Aus dieser Beziehung lässt sich die Grundidee klassischer Navigationsalgorithmen ableiten: Die Bestimmung des kürzesten Wegs von v_i nach v_n kann iterativ erfolgen, wobei jede Iteration auf der Bestimmung des kürzesten Wegs zum jeweiligen Vorgängerknoten basiert.

Zur Verdeutlichung des iterativen Vorgehens von Navigationsalgorithmen soll an dieser Stelle der Dijkstra-Algorithmus näher untersucht werden, da es sich hierbei um den gemeinhin bekanntesten Navigationsalgorithmus handelt. Der Algorithmus kann für die Bestimmung des kürzesten Wegs zwischen zwei Knoten v_i nach v_n innerhalb eines Graphen G verwendet werden. Wie von Algorithmen für die Breiten- und Tiefensuche bekannt, werden die Nachbarknoten des Startknotens sowie die daran anschließenden Nachbarknoten rekursiv betrachtet. Die besuchten Knoten werden im Gegensatz zu Algorithmen für die Breiten- und Tiefensuche jedoch priorisiert in einer Liste verwaltet, wobei die Ordnung in Abhängigkeit der vom Startknoten ausgehenden Kosten erfolgt. Für jeden betrachteten Knoten werden die Kosten zum Startknoten aus der Addition der Kosten des Vorgängerknotens und der Kosten der verbindenden Kante bestimmt. Sind die berechneten Kosten geringer als bereits bestimmte Kosten zu diesem Knoten, so werden diese durch die minimalen Kosten ersetzt. Innerhalb jedes Rekursionsschritts werden die Nachbarn des Knotens mit den aktuell geringsten Kosten betrachtet, so dass lediglich die Nachbarschaft des vielversprechendsten Knoten untersucht wird. Die jeweilige Kante zum Vorgängerknoten wird dabei von der Exploration ausgeschlossen.

Der Dijkstra-Algorithmus verwendet für die Verwaltung der Knoten eine nach aufsteigenden Kosten geordnete Liste B . In dieser Liste werden diejenigen Knoten verwaltet, für die bereits die Kosten ausgehend vom Startknoten berechnet wurden, aber noch keine Exploration der Nachfolgeknoten durchgeführt wurde. Die Liste B verwaltet somit die Fronten (Endknoten) aller aktuellen Wegekandidaten. Die Knoten werden zusammen mit der Information über den jeweiligen Vorgängerknoten und den Kosten ausgehend vom Startknoten in dieser Liste gespeichert. Aus der Liste B wird innerhalb jedes Rekursionsschrittes der Knoten mit den niedrigsten Kosten entnommen und dessen Nachbarknoten betrachtet. Dabei können prinzipiell zwei Fälle unterschieden werden:

- (1) *Neuer Nachfolgeknoten*: Der Nachfolgeknoten wurde in keinem vorangegangenen Rekursionsschritt betrachtet (es sind keine Informationen über einen Vorgängerknoten verfügbar und der Knoten ist nicht in der Liste B enthalten). Der Knoten wird somit zusammen mit der Information über seinen Vorgänger und den berechneten Kosten ausgehend vom Startknoten in der Liste B an der den Kosten entsprechenden Stelle gespeichert.

- (2) *Bereits betrachteter Nachfolgeknoten*: Da für den Nachfolgeknoten bereits Kosten und ein Vorgängerknoten bestimmt wurden, muss überprüft werden, ob der aktuelle Weg zu diesem Knoten kürzer ist als der bereits gespeicherte:
- a. Der aktuelle Weg ist kürzer: Der Nachfolgeknoten wird mit den neuen Kosten und dem neuen Vorgängerknoten an der ggf. neuen Position in der Liste *B* gespeichert.
 - b. Der vorhandene Weg ist kürzer: Der Nachfolgeknoten wird mit den ursprünglichen Werten in der Liste *B* belassen.

Wird der Zielknoten innerhalb eines Rekursionsschrittes betrachtet und ist der so bestimmte Weg am Ende des Rekursionsschritts derjenige mit den geringsten Kosten (nimmt also die erste Position in Liste *B* ein), so terminiert der Algorithmus. Wird diese Terminierungsbedingung nicht gestellt, so lassen sich mit dem Dijkstra-Algorithmus die kürzesten Wege von einem Startknoten zu allen anderen Knoten des Graphen bestimmen. Der auf der folgenden Seite in Tabelle 5.1 dargestellte Pseudocode verdeutlicht den Ablauf der Rekursion, wobei die Initialisierung nicht in der Darstellung enthalten ist.

<pre> 1 while $B \neq \emptyset$ do 2 $v_K := v_{MinCost} \in B$ 3 $B := B \setminus \{v_K\}$ 4 if $v_K == v_{Goal}$ do end 5 foreach $v_{Adj} \in v_K.Adj$ do 6 $d := v_K.dist + \omega_{K,Adj}$ 7 if $v_{Adj}.Pre == NULL$ do 8 $v_{Adj}.Pre := v_K$ 9 $v_{Adj}.Dist := d$ 10 $B := B \cup \{v_{Adj}\}$ 11 else do 12 if $d < v_{Adj}.Dist$ do 13 $B := B \setminus \{v_{Adj}\}$ 14 $v_{Adj}.Pre := v_K$ 15 $v_{Adj}.Dist := d$ 16 $B := B \cup \{v_{Adj}\}$ 17 end if 18 end if 19 end foreach 20 end while </pre>	<pre> Knoten mit geringsten Kosten aus B wählen Knoten aus B entfernen Abbruch bei Erreichen des Zielknotens Betrachtung aller Nachfolgeknoten Berechnung der Distanz für den Nachfolgeknoten Neuer Nachfolger? Initialisierung des Nachfolgeknotens Speichern des initialisierten Nachfolgeknotens Nachfolgeknoten wurde bereits betrachtet Aktuelle Kosten geringer? Nachfolgeknoten reinitialisieren Speichern des reinitialisierten Nachfolgeknotens </pre>
--	---

Tabelle 5.1: Pseudocode²⁶ für die Rekursion des Dijkstra-Algorithmus

Die obere Schranke der Laufzeit für den Dijkstra-Algorithmus liegt bei $O(|V|^2)$, kann jedoch durch geeignete Implementierungen (z. B. Verwendung eines Fibonacci-Heaps) auf $O(|E| + |V| \cdot \log|V|)$ reduziert werden (Barbehenn, 1998). Andere Algorithmen wie der A*-Algorithmus, der zusätzlich eine Heuristik für die Auswahl des vielversprechendsten Knotens verwendet, kommen hinsichtlich der Laufzeit auf eine obere Schranke von $O(|V| \cdot \log|V|)$.

Das schrittweise Vorgehen des Dijkstra-Algorithmus soll an dem in Abbildung 5.2 dargestellten Graphen veranschaulicht werden. Dieser wird später ebenfalls als Beispiel für die Entwicklung des personalisierbaren und multikriteriellen Navigationsalgorithmus dienen. Der Graph besteht aus vier Knoten, wobei zwei Wege vom Startknoten S zum Zielknoten Z führen; die Kantengewichte und damit die Kosten entsprechen der Länge des jeweils zugrundeliegenden realen Wegs.

²⁶ Der Pseudocode ist an das Skript „Kürzeste-Weg Suche mit dem Dijkstra-Algorithmus“ von M. Bernreuther (Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen) aus dem Jahr 2000/01 angelehnt.

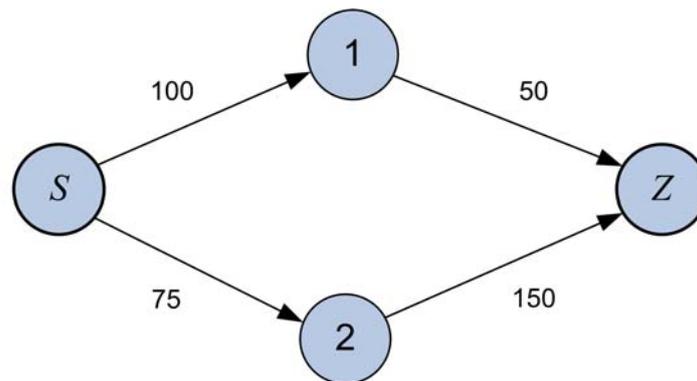


Abbildung 5.2: Einfacher Navigationsgraph

In der ersten Iteration werden alle vom Startknoten ausgehenden Kanten betrachtet (foreach-Schleife in Tabelle 5.1) und die zugehörigen Endknoten in einer Prioritätenliste zusammen mit den Informationen bezüglich des jeweiligen Vorgängerknotens (Startknoten) und der Kantenlänge als Maß für die Kosten gespeichert. Der Zustand P_1 der Prioritätenliste nach der ersten Iteration ist in der folgenden Abbildung 5.3 dargestellt.

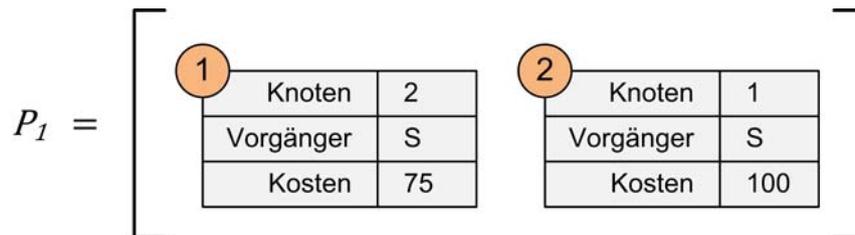


Abbildung 5.3: Prioritätenliste nach der ersten Iteration

Die Kante zu Knoten 2 ist mit den zugehörigen Kosten von 75 die aktuell vielversprechendste Alternative und wird somit an erster Stelle der Prioritätenliste platziert. In der zweiten Iteration wird dieser Knoten aus der Prioritätenliste entfernt (Zeilen 2–3 in Tabelle 5.1). Anschließend werden alle Nachfolgeknoten untersucht. Die Kosten des Wegs zum einzigen Nachfolgeknoten Z werden kalkuliert und diese in die Prioritätenliste eingefügt (Zeilen 6–10 in Tabelle 5.1), so dass sich nach der zweiten Iteration der in Abbildung 5.4 dargestellte Zustand P_2 ergibt.

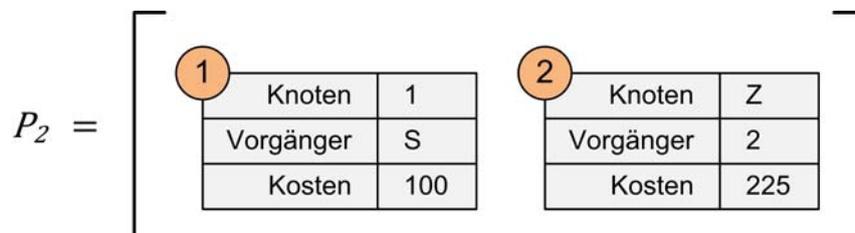


Abbildung 5.4: Prioritätenliste nach der zweiten Iteration

Obwohl bereits ein Weg vom Startknoten zum Zielknoten ermittelt wurde, existiert weiterhin ein kostengünstigerer Weg, so dass der Algorithmus nicht terminiert (siehe Terminierungsbedingung in Zeile 4 in Tabelle 5.1). In der dritten Iteration wird somit Knoten 1 aus der Prioritätenliste entfernt und dessen Nachfolgeknoten untersucht (Zielknoten Z). Da der Zielknoten bereits in der Prioritätenliste enthalten ist, wird ein Vergleich der beiden alternativen Wege durchgeführt und die Werte des kostengünstigeren in der Prioritätenliste festgehalten (Zeilen 12–16 in Tabelle 5.1), so dass sich nach der dritten Iteration der in Abbildung 5.5 dargestellte Zustand P_3 ergibt.

$$P_3 = \left[\begin{array}{c|c|c} \text{1} & & \\ \hline & \text{Knoten} & \text{Z} \\ \hline & \text{Vorgänger} & 1 \\ \hline & \text{Kosten} & 150 \end{array} \right]$$

Abbildung 5.5: Prioritätenliste nach der dritten Iteration

Da der Zielknoten (und damit der kostengünstigste Weg zum Zielknoten) am Anfang der Prioritätenliste positioniert ist, terminiert der Algorithmus zu Beginn der folgenden Iteration. Der kostengünstigste Weg kann nun durch die rekursive Abfrage der jeweiligen Vorgängerknoten ermittelt werden. Nach der kurzen Einführung der grundlegenden Konzepte von Navigationsalgorithmen erfolgt im folgenden Abschnitt eine Einführung in den Bereich der Multikriterienanalyse.

5.1.2 Multikriterienanalyse

Die Bestimmung geeigneter Wege für die Gruppe der mobilitätseingeschränkten Fußgänger erfordert die Berücksichtigung verschiedener Kriterien, die gegebenenfalls in einem Konfliktverhältnis zueinander stehen. Somit lassen sich Konzepte aus dem Bereich der Multikriterienanalyse auf das Problem der Bestimmung eines optimalen Wegs unter Berücksichtigung mehrerer Kriterien anwenden. Im englischen Sprachraum sind für den Begriff Multikriterienanalyse auch die Termini Multicriteria Decision Making (MCDM) oder synonym Multicriteria Decision Analysis (MCDA) gebräuchlich. Probleme, die mittels MCDM-Verfahren gelöst werden, beinhalten normalerweise eine Menge von Alternativen, die gegenüber oftmals widersprüchlichen und unvereinbaren Kriterien bewertet werden müssen (Malczewski, 1999). In diesem Abschnitt erfolgt eine kurze Einführung in die Prinzipien der Multikriterienanalyse, wobei die Darstellung auf für diese Arbeit relevante Konzepte beschränkt ist.

Nach (Zimmermann & Gutsche, 1991) besitzen multikriterielle Probleme unter anderem die folgenden charakteristischen Merkmale:

- (1) *Multiple Ziele*: Ein multikriterielles Problem besitzt mehrere Ziele bzw. gewünschte Eigenschaften. Diese müssen durch einen Entscheidungsträger formuliert und / oder priorisiert werden.
- (2) *Zielkonflikt*: Die Ziele und Eigenschaften multikriterieller Probleme stehen ggf. diametral zueinander. Entsprechend kann eine Verbesserung hinsichtlich eines Ziels das Ergebnis in Bezug auf ein anderes negativ beeinflussen.
- (3) *Nicht vergleichbare Dimensionen*: Oftmals werden Ziele in nicht vergleichbaren Maßstäben und Dimensionen gemessen.

In der Literatur finden sich viele Ansätze zur Strukturierung multikriterieller Probleme wie etwa in (Saaty, 1980), (Chankong & Haimes, 1983), (Kleindorfer, Kunreuther & Shoemaker, 1993) sowie (Keeney & Raiffa, 1999). Es lassen sich jedoch Gemeinsamkeiten dieser Ansätze ableiten, wobei u. a. nach (Malczewski, 1999) multikriterielle Probleme unter anderem die folgenden Elemente gemein haben:

- (1) ein oder mehrere Ziele, die ein Entscheider zu erreichen versucht,
- (2) einen oder mehrere Entscheider, die in den Entscheidungsprozess eingebunden sind und diesen durch eigene Präferenzen hinsichtlich der Kriterien beeinflussen,
- (3) eine Menge an Kriterien, die als Basis für die Evaluation von Alternativen anwendbar sind,
- (4) eine Menge an Alternativen für die Entscheidung,
- (5) den Zustand der Umwelt inklusive nicht kontrollierbarer Einflussfaktoren,
- (6) eine Menge von Ergebnissen / Konsequenzen assoziiert mit der entsprechenden Kombination aus Alternativen und Kriterien.

Die Beziehung zwischen den Elementen multikriterieller Probleme kann für den allgemeinen Fall in einer sogenannten Entscheidungsmatrix dargestellt werden (Pitz & McKillip, 1984). Die Matrix repräsentiert die Beziehung zwischen Alternativen und Kriterien in Form von Teilergebnissen, wobei in der Fachliteratur üblicherweise der Begriff Attribut anstelle von Kriterium verwendet wird. Im Kontext dieser Arbeit wird der Begriff Kriterium jedoch synonym verwendet. Die Spalten der Entscheidungsmatrix sind hierarchisch strukturiert, als übergeordnete Struktureinheit ist das zu erreichende Gesamtziel gegeben. Im Kontext dieser Arbeit ist ein solches Gesamtziel beispielsweise die Berechnung eines hinsichtlich individueller Benutzeranforderungen optimierten Wegs. Das Gesamtziel zerfällt bei den meisten Problemen in mehrere Teilziele, wie beispielsweise die Erfüllung bestimmter Sicherheitsanforderungen an die zu berechnende Route. Jedem Teilziel lassen sich wiederum mehrere

Kriterien zuordnen, die eine Bewertung verschiedener Alternativen hinsichtlich dieses Teilziels erlauben. Für blinde Fußgänger bilden beispielsweise die Vermeidung großer Kreuzungen sowie eine genügend große Anzahl an Orientierungsmerkmalen Kriterien für das Teilziel eines sicheren Wegs.

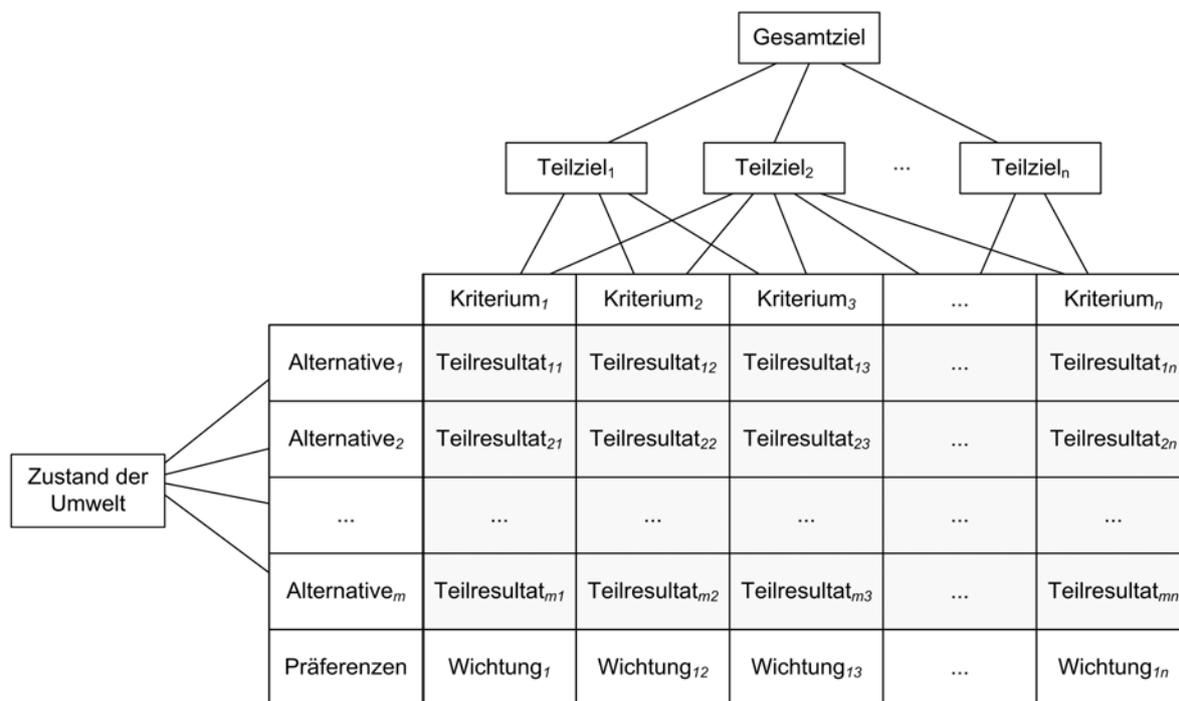


Abbildung 5.6: Entscheidungsmatrix multikriterieller Probleme²⁷

Die Zeilen der Entscheidungsmatrix repräsentieren die zu bewertenden Alternativen. Da jede Entscheidung innerhalb eines Umweltkontexts getroffen wird, haben diverse nicht beeinflussbare Umweltfaktoren Auswirkungen auf die Alternativen. Derartige Umweltfaktoren umfassen beispielsweise Wetterbedingungen wie Niederschlag oder von der Tageszeit abhängige Lichtverhältnisse. Die Teilresultate repräsentieren die Bewertung einer Alternative hinsichtlich des zugeordneten Kriteriums. Um die beste Alternative bestimmen zu können, müssen Verfahren angewendet werden, die eine Bewertung unter Berücksichtigung der einzelnen Teilresultate erlauben und diese in ihrer Gesamtheit vergleichbar machen. Weiterführende Übersichten entsprechender Verfahren sind in (Pitz & McKillip, 1984), (Kirkwood, 1997), (Goodwin & Wright, 1998) sowie (Keeney & Raiffa, 1999) zu finden. Eines der am häufigsten angewendeten Verfahren für räumliche Problemstellungen ist die einfache additive Gewichtung oder auch gewichtete Linearkombination (Malczewski, 1999). Das Verfahren basiert auf einem gewichteten Mittelwert, wobei die Gewichte durch die Präferenzen des Entscheidungsträgers beeinflusst werden. Die Gesamtbewertung einer Alternative wird aus der Addition der Kriterienwerte mit den zugeordneten Gewichtungen bestimmt, wobei die Gesamtbewertung die Grundlage für die Bestimmung der besten Alter-

²⁷ Darstellung angelehnt an (Malczewski, 1999, S. 82) und (Zimmermann & Gutsche, 1991, S. 36)

native bildet. Formal wird die Gesamtbewertung $S(A_i)$ einer Alternative A_i durch Anwendung der folgenden Formel bestimmt:

$$S(A_i) = \sum_j \omega_j x_{ij}$$

wobei x_{ij} die Bewertung der i -ten Alternative bezüglich des j -ten Kriteriums ist. Das Gewicht ω_j ist normalisiert, wobei die Bedingung $\sum \omega_j = 1$ gilt. Die Gewichte repräsentieren dabei die relative Wichtigkeit der jeweiligen Kriterien. Bevor das Verfahren der einfachen additiven Gewichtung angewendet werden kann, müssen die Skalen der verschiedenen Kriterien daher normiert werden, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Ein Beispiel für ein derartiges Normierungsverfahren ist die lineare Skalentransformation, welche sich am Maximum oder Minimum der Werte einer jeweiligen Spalte der Entscheidungsmatrix orientiert. Der normierte Wert r_{ij} für x_{ij} berechnet sich bei Orientierung am Maximum nach:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{max}}$$

wobei $x_j^{max} = \max_i(x_{ij})$ der Maximalwert der j . Spalte ist. Somit gilt $0 < r_{ij} < 1$. Je mehr sich der Wert r_{ij} dem Maximalwert 1 annähert, desto günstiger ist die Alternative hinsichtlich des entsprechenden Kriteriums zu bewerten. Bei zu minimierenden Kriterienwerten kann die folgende Formel angewendet werden:

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{x_j^{max}}$$

Die Bewertung einer Alternative ist analog umso günstiger, je weiter sich der Wert r_{ij} dem Minimalwert 0 annähert.

5.2 Multikriterielle Routenberechnung

Fußgänger und insbesondere mobilitätseingeschränkte Fußgänger stellen an die Berechnung einer geeigneten Route im Gegensatz zum bei der Einführung der graphentheoretischen Grundlagen verwendeten Beispiel weitere gegebenenfalls diametrale Kriterien, die bei einer Optimierung berücksichtigt werden müssen. In diesem Abschnitt wird der Dijkstra-Algorithmus derart modifiziert, dass multiple Kriterien bei der Berechnung einer optimalen Route Berücksichtigung finden. Die angewendeten Prinzipien lassen sich dabei direkt auf andere Navigationsalgorithmen übertragen.

Eine wichtige Eigenschaft von Navigationsalgorithmen ist die Reduzierung des Bedarfs auf lokal erschließbare Informationen. Innerhalb eines Iterationsschrittes wird der jeweils vielversprechendste Weg weiterverfolgt, ohne dass eine globale Sicht auf das zugrunde liegende Netzwerk eingenommen werden muss. Diese Beschränkung auf lokale Informationen

muss bei der Entwicklung multikriterieller Verfahren berücksichtigt werden. Durch den möglichen Konflikt diametraler Kriterien muss ein multikriterielles Verfahren zudem die Kompensation verschiedener Kriterienausprägungen ermöglichen. Eine negative Kriterienausprägung hinsichtlich einer Anforderung bzw. ein damit verbundenes hohes Teilgewicht für die Kante muss durch eine positive Ausprägung eines anderen Kriteriums ausgeglichen werden können. So kann beispielsweise eine im Vergleich zum Optimum längere Distanz einer Route durch eine höhere Sicherheitsbewertung kompensierbar sein, ohne dass ein Widerspruch zu den Anforderungen des Benutzers entsteht.

Die Berücksichtigung multipler Kriterien bei der Berechnung einer optimalen Route führt für den allgemeinen Fall dazu, dass den Kanten des zugrunde liegenden Graphen anstelle einzelner Gewichte Gewichtsvektoren zugeordnet werden. Ein Beispiel für einen derartigen Graphen ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

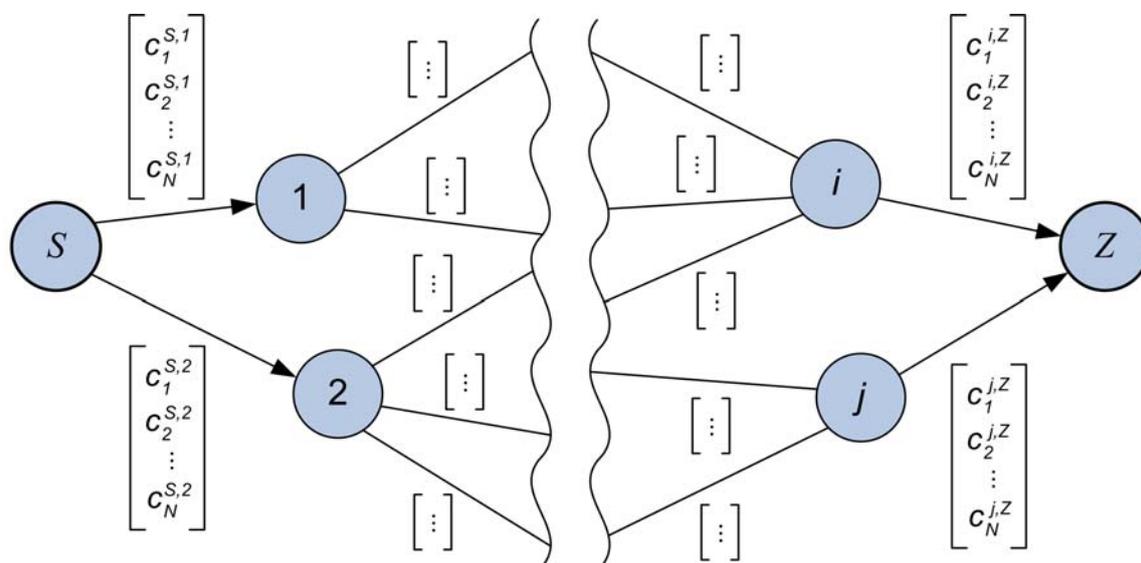


Abbildung 5.7: Graph mit Gewichtsvektoren

Die Berücksichtigung von N Kriterien führt zu N -dimensionalen Gewichtsvektoren für die Kanten des Graphen, welche die Grundlage für die Bewertung jeder Kante bilden. Für die Berücksichtigung multipler Kriterien muss der Dijkstra-Algorithmus prinzipiell an zwei Stellen modifiziert werden:

- Der Dijkstra-Algorithmus berechnet als Kosten für jeden Knoten die Distanz zum Startknoten unter Verwendung der jeweiligen Kantengewichte (Zeile 6 in Tabelle 5.1). Die Berechnung der Kosten muss derart abgewandelt werden, dass multiple Kriterien berücksichtigt werden können. Es ist daher eine geeignete Kostenfunktion anzuwenden, die eine Abbildung von Gewichtsvektoren auf Kosten ermöglicht.

- Die Datenstruktur für die Verwaltung der Knoten muss dahingehend erweitert werden, dass zusätzlich zu den Kosten auch der konsolidierte Gewichtsvektor für den Kantenzug bis zum Knoten gespeichert wird.

Als Kostenfunktion für die Berechnung der Kosten einer Kante bzw. eines Kantenzugs wird die in Abschnitt 5.1.2 beschriebene einfache additive Gewichtung angewendet. Dieser Ansatz ist vorteilhaft, da der lineare Zusammenhang zwischen den einzelnen Kriterienausprägungen erhalten und das Ergebnis für den Benutzer nachvollziehbar bleibt. Für den allgemeinen Fall wird die Kostenfunktion durch die nachfolgende Gleichung beschrieben. Dabei sei N die Anzahl der angewendeten Kriterien und ω_i das zum jeweiligen Kriterienwert c_i zugeordnete Gewicht. Seien ferner die Bedingungen $\sum \omega_i = 1$ sowie $\sum \omega_j = 1$ gegeben. Die multikriteriellen Kosten C_K eines Kantenzugs werden dann durch die folgende Formel berechnet:

$$C_K = \sum_{i=1}^N \omega_i c_i, \quad \text{wobei } c_i = \sum_{j=1}^M \omega_j r_j$$

Ein Kriterienwert c_i kann dabei selbst aus einer einfachen additiven Gewichtung von M einzelnen Kriterienwerten r_j berechnet sein. So kann beispielsweise ein Durchschnittswert für die Sicherheitsbewertung eines Kantenzuges aus gewichteten Einzelbewertungen verschiedener Benutzer bestimmt werden. Durch die Berechnung eines konsolidierten Gewichtsvektors aus den Gewichtsvektoren der einzelnen Kanten eines Kantenzuges erfolgt eine Zusammenfassung der lokal gültigen Gewichte zu Gesamtgewichten. Diese Strategie erlaubt eine effiziente Implementierung, da für jeden Nachfolgeknoten lediglich eine Konsolidierung von zwei Gewichtsvektoren durchgeführt werden muss: der für den aktuell betrachteten Kantenzug bereits konsolidierte Gewichtsvektor sowie der Gewichtsvektor der Kante zum Nachfolgeknoten.

Das Verfahren der einfachen additiven Gewichtung zur multikriteriellen Bewertung von Wegen erlaubt einen Vergleich und einen Ausgleich verschiedener Kriterien nur dann, wenn die jeweils zugrundeliegenden Wertebereiche auf ein Skalenniveau normiert sind. So wäre beispielsweise ein Vergleich bzw. eine Kompensation des Längenkriteriums durch die Sicherheitsbewertung ohne Normierung nur unzureichend möglich, da sich beide Skalenniveaus im Allgemeinen um mindestens eine Größenordnung unterscheiden. Für die Normierung der Gewichtsvektoren wird innerhalb des in dieser Arbeit dargestellten Verfahrens die in Abschnitt 5.1.2 beschriebene lineare Skalentransformation angewendet, wobei für die Zielskala das Intervall $[1 \dots 5]$ zugrunde gelegt wird. Die Grenzen dieses Intervalls ergeben sich aus dem in Abschnitt 5.3 beschriebenen Verfahren zur Personalisierung, bei dem 5-stellige Likertskalen für die Bewertung von Wegen durch Benutzer verwendet werden. Entsprechend ergibt sich für die Normierung eines Teilgewichts c_i die folgende Vorschrift:

$$\text{norm}(c_i) = 5 \cdot \frac{c_i}{c_i^{\max}}$$

Die Normierung erfolgt über den maximalen Wert c_i^{\max} des i -ten Gewichts aller zum Berechnungszeitpunkt bekannter Alternativen. Übertragen auf die Entscheidungsmatrix aus Abbildung 5.6 erfolgt somit eine Normierung der Teilresultate eines Kriteriums auf die zugrunde gelegte Skala von [1 ... 5]. Der funktionale Zusammenhang zwischen den jeweiligen Teilgewichten c_i der Gewichtsvektoren sowie der normalisierten Werte $\text{norm}(c_i)$ ist in der folgenden Abbildung 5.8 dargestellt.

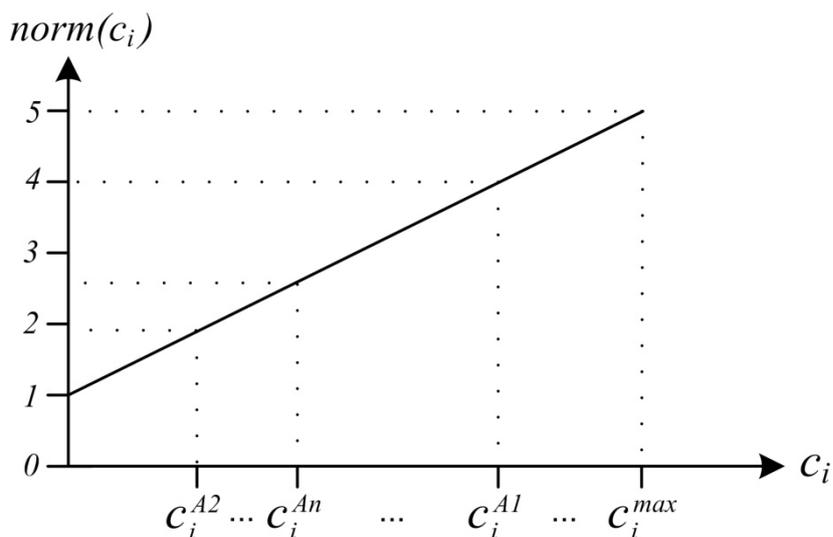


Abbildung 5.8: Normalisierung von Teilgewichten

Die zugehörigen Alternativen A_j sind durch die obere Indizierung an den jeweiligen Teilgewichten gegeben. Da durch die Normalisierung lediglich eine lineare Stauchung des Wertebereiches erfolgt, bleiben die ursprünglichen Proportionen zwischen den Teilgewichten erhalten. In Bezug auf den Dijkstra-Algorithmus sind die Alternativen durch die Elemente der Prioritätenliste und gegebenenfalls zusätzlich durch den aktuell betrachteten Nachfolgeknoten des bisher kostengünstigsten Wegs gegeben. Die Alternativen müssen in einer erweiterten Datenstruktur gespeichert werden, damit innerhalb jeder Iteration die Kosten für die erweiterten Kantenzüge bestimmt werden sowie notwendige Informationen für die Normalisierung erhalten bleiben. Die entsprechende Datenstruktur ist in der folgenden Abbildung 5.9 schematisch dargestellt.

Knoten	v
Vorgänger	$v.Pre$
Gewichte	$[c_1 \dots c_N]$
Kosten	C_K

Abbildung 5.9: Erweiterte Datenstruktur

Zusätzlich zu den für Implementierungen des Dijkstra-Algorithmus bereits benötigten Informationen wie dem Vorgängerknoten oder den kumulierten Kosten ausgehend vom Startknoten wird ein konsolidierter, nicht normalisierter Gewichtsvektor gespeichert. Dabei werden alle Teilgewichte einzeln aggregiert, wobei je nach Gewicht verschiedene Strategien für die Konsolidierung angewendet werden können. Beispielsweise werden die Längen aller Kanten des zum Knoten führenden Kantenzugs addiert, die Sicherheitsbewertung wird hingegen als einfache additive Gewichtung berechnet. Die jeweilige Gewichtung ergibt sich dabei aus dem Verhältnis der Länge der zugehörigen Kante und der Gesamtlänge des Kantenzuges.

Die beschriebenen Modifikationen führen zu einer Adaptierung des Dijkstra-Algorithmus, wobei multiple Kriterien bei der Bestimmung einer optimalen Route berücksichtigt werden. Die modifizierte Version des Dijkstra-Algorithmus ist als Pseudocode in Tabelle 5.2 dargestellt.

<pre> 1 while $B \neq \emptyset$ do 2 $v_K := v_{MinCost} \in B$ 3 $B := B \setminus \{v_K\}$ 4 if $v_K == v_{Goal}$ do end 5 foreach $v_{Adj} \in v_K.Adj$ do 6 $\vec{w}_{K,Adj} := weight(v_K, v_{Adj})$ 7 $\vec{w}_{Adj}^{cons} := cons(v_K.Wgts, \vec{w}_{K,Adj})$ 8 if $v_{Adj}.Pre \neq NULL$ do 9 $\vec{w}_{K,Adj}^{norm} = norm(\vec{w}_{Adj}^{cons}, v_{Adj}.Wgts)$ 10 $\vec{w}_{Adj}^{norm} = norm(v_{Adj}.Wgts, \vec{w}_{Adj}^{cons})$ 11 if $cost(\vec{w}_{K,Adj}^{norm}) > cost(\vec{w}_{Adj}^{norm})$ do 12 continue 13 else do 14 $B := B \setminus \{v_{Adj}\}$ 15 end if 16 end if 17 $v_{Adj}.Pre := v_K$ </pre>	<p>Knoten mit geringsten Kosten aus B wählen</p> <p>Knoten aus B entfernen</p> <p>Abbruch bei Erreichen des Zielknotens</p> <p>Betrachtung aller Nachfolgeknoten</p> <p>Gewichtsvektor der Kante zum Nachfolgeknoten</p> <p>Konsolidieren der Gewichtsvektoren</p> <p>Neuer Weg zum Nachfolgeknoten?</p> <p>Normierung für Kostenvergleich</p> <p>„alter“ Weg ist günstiger → Abbruch Iteration</p> <p>Nachfolgeknoten initialisieren</p>
---	---

18	$v_{Adj}.Wgts := \vec{\omega}_{Adj}^{cons}$	
19	$\vec{\omega}_{Adj}^{norm} := norm(\vec{\omega}_{Adj}^{cons}, B)$	Normierung zur Berechnung der Kosten
20	$v_{Adj}.Cost := cost(\vec{\omega}_{Adj}^{norm})$	
21	$B := B \cup \{v_{Adj}\}$	Speichern des Nachfolgeknotens
22	end foreach	
23	end while	

Tabelle 5.2: Pseudocode für die erweiterte Variante des Dijkstra Algorithmus

Die Struktur des Dijkstra-Algorithmus wurde aus Effizienzgründen leicht modifiziert, wobei jedoch die wesentlichen Konzepte erhalten bleiben. Der angepasste Algorithmus besteht konzeptionell aus den folgenden Teilen:

1. Für jeden Nachfolgeknoten des aktuell vielversprechendsten Endknotens v_K wird ein konsolidierter Gewichtsvektor $\vec{\omega}_{Adj}^{cons}$ bestimmt, welcher aus dem konsolidierten Gewichtsvektor des bisherigen Kantenzugs vom Startknoten bis v_K und dem Gewichtsvektor der v_K und v_{Adj} verbindenden Kante berechnet wird (Zeile 7). Die Konsolidierung erfolgt dabei je nach zugrunde liegendem Kriterium durch Addition oder durch Bildung einer einfachen additiven Gewichtung der zugehörigen Einzelgewichte.
2. Ist für den Nachfolgeknoten v_{Adj} bereits ein Vorgängerknoten vorhanden (Zeile 8), so ist bereits ein anderer Weg zu v_{Adj} bestimmt worden. Entsprechend muss überprüft werden, welcher der beiden Wege mit geringeren Kosten verbunden ist. Dazu werden die beiden konsolidierten Gewichtsvektoren $\vec{\omega}_{Adj}^{cons}$ und $v_{Adj}.Wgts$ normiert (Zeilen 9–10), so dass ein anschließender Vergleich der Kosten möglich ist (Zeile 11). Ist der bereits vorhandene Weg zu v_{Adj} kostengünstiger, so wird der neue Weg verworfen und der nächste Nachfolgeknoten betrachtet (nächste Iteration der foreach-Schleife). Andernfalls wird der bereits vorhandene aber kostenintensivere Weg aus der Prioritätenliste entfernt.
3. Wurde noch kein anderer Weg zu v_{Adj} innerhalb einer vorhergehenden Iteration gefunden bzw. stellt der aktuelle Weg den kostengünstigsten dar, wird die entsprechende Datenstruktur (siehe Abbildung 5.9) initialisiert. Für die Berechnung der Kosten, die für die Positionierung innerhalb der Prioritätenliste B benötigt werden, muss eine Normierung des konsolidierten Gewichtsvektors in Bezug auf die bereits gefundenen Wege aus B erfolgen (Zeile 19). Schließlich wird v_{Adj} der Prioritätenliste hinzugefügt.

Die Erweiterungen führen zu einer erhöhten Zeitkomplexität der vorgestellten Variante eines multikriteriellen Dijkstra-Algorithmus. Die Bestimmung des konsolidierten Gewichtsvektors erfordert eine Addition für die Berechnung der neuen Strecke zum Knoten (Länge

zum Vorgängerknoten addiert mit der Kantenlänge). Für die Bestimmung der konsolidierten Kriterienbewertungen werden pro Kriterium eine Addition, zwei Divisionen und zwei Multiplikationen benötigt. Somit werden für die Bestimmung des konsolidierten Gewichtsvektors $5 \cdot |K| + 1$ Rechenoperationen benötigt, wobei $|K|$ die Anzahl der verwendeten Kriterien ist. Beim Vergleich der Kosten zweier Knoten müssen die beiden Gewichtsvektoren normiert werden, wobei für die lineare Skalentransformation der Strecke zum Knoten eine Multiplikation und eine Division notwendig sind. Für die Bestimmung der multikriteriellen Kosten werden $|K|$ Additionen und $|K| + 1$ Multiplikationen benötigt. Für die Normierung der beiden zu vergleichenden Gewichtsvektoren werden somit $2 \cdot (2 \cdot |K| + 3)$ Operationen benötigt. Für das Einfügen in die Prioritätenliste muss der Gewichtsvektor des Knotens normiert werden, so dass für diesen Schritt ebenfalls $2 \cdot |K| + 3$ Operationen benötigt werden. Insgesamt werden für jeden erreichten Knoten somit $11 \cdot |K| + 10$ Operationen benötigt. Damit ergibt sich für den multikriteriellen Dijkstra-Algorithmus eine Zeitkomplexität von $O(|E| + |V| \cdot \log|V| + |V| \cdot (11 \cdot |K| + 10))$.

Das vorgestellte Verfahren zur Berechnung einer hinsichtlich multipler Kriterien optimalen Route soll zur weiteren Veranschaulichung an einem einfachen Beispiel veranschaulicht werden, wobei der in Abbildung 5.10 dargestellte Graph als Grundlage dient. Der Graph ist von seiner Struktur identisch mit dem in Abschnitt 5.1.1 verwendeten Beispiel.

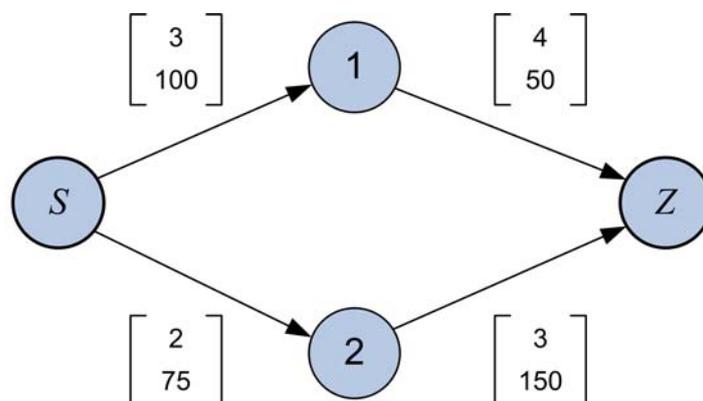


Abbildung 5.10: Navigationsgraph mit Gewichtsvektoren

Im Gegensatz zum Beispiel des einfachen Dijkstra-Algorithmus sind den Kanten des Graphen Gewichtsvektoren mit je zwei Gewichten zugeordnet. Das jeweils erste Gewicht repräsentiert die Bewertung der Kante in Bezug auf ein Kriterium, welches auf der zugrunde gelegten Skala von $[1 \dots 5]$ bewertet wird. Beispiele für derartige Kriterien bilden Sicherheitsbewertungen oder Bewertungen der Barrierefreiheit eines Wegabschnitts. Innerhalb dieses Beispiels wird angenommen, dass das erste Gewicht die Sicherheitsbewertung wiedergibt. Der zweite Eintrag ergibt sich wie im Beispiel aus dem vorigen Abschnitt aus dem Betrag der Länge des durch die Kante repräsentierten realen Wegabschnitts.

Innerhalb der ersten Iteration werden die Nachfolgeknoten des Startknotens in die Prioritätenliste aufgenommen. Im Unterschied zum Dijkstra-Algorithmus, der für die Berechnung der Kosten lediglich die bisher zurückgelegte Distanz verwendet (Zeile 6 in Tabelle 5.1), müssen für multikriterielle Verfahren die Kriterienwerte getrennt konsolidiert werden. Da die Wege zu Knoten 1 und Knoten 2 innerhalb der ersten Iteration jedoch lediglich aus einer Kante bestehen, entfällt die Konsolidierung der Gewichtsvektoren. Die multikriteriellen Kosten können somit direkt aus den Gewichtsvektoren berechnet werden. Zur Bestimmung dieser Kosten müssen die aus den Kantenlängen abgeleiteten Gewichte auf das Skalenniveau der Sicherheitsbewertung normiert werden. Die Ergebnisse der einfachen linearen Skalentransformation werden dabei mit dem Faktor 5 multipliziert, so dass der entstehende Wertebereich linear auf das Intervall $[1 \dots 5]$ abgebildet wird. Für die erste Iteration ergeben sich die folgenden normierten Teilkosten für die aus den Kantenlängen abgeleiteten Gewichte:

$$c_{S,1}^{Dist} = 5 \cdot \frac{d_{S,1}}{d_{max}} = 5 \cdot \frac{100}{100} = 5$$

$$c_{S,2}^{Dist} = 5 \cdot \frac{d_{S,2}}{d_{max}} = 5 \cdot \frac{75}{100} = 3,75$$

Der normierte Gewichtsvektor für die Kante zu Knoten 1 ist somit $(3 \mid 5)$ beziehungsweise $(2 \mid 3,75)$ für die Kante zu Knoten 2. Entsprechend berechnen sich die Kosten der beiden Kanten aus den Teilkosten $c_{S,1}^{Dist}$ und $c_{S,2}^{Dist}$ für die Länge sowie $c_{S,1}^{Sich}$ und $c_{S,2}^{Sich}$ für die Sicherheit. Für dieses Beispiel wird eine einfache Gleichgewichtung mit den zugehörigen Gewichten $\omega_i = 0,5$ verwendet, so dass alle Kriterien einen gleich großen Einfluss auf die Kosten haben. In der ersten Iteration ergeben sich die Kosten $C_{S,1}$ für die Kante zu Knoten 1 und $C_{S,2}$ für die Kante zu Knoten 2 wie folgt:

$$C_{S,1} = 0,5 \cdot c_{S,1}^{Dist} + 0,5 \cdot c_{S,1}^{Sich} = 0,5 \cdot 5 + 0,5 \cdot 3 = 4,0$$

$$C_{S,2} = 0,5 \cdot c_{S,2}^{Dist} + 0,5 \cdot c_{S,2}^{Sich} = 0,5 \cdot 3,75 + 0,5 \cdot 2 = 2,875$$

Durch die Gleichgewichtung und die vorausgehende Normierung auf ein Skalenniveau haben beide Kriterien einen gleichen Anteil an den Gesamtkosten. Die multikriteriellen Kosten für den Weg zu Knoten 2 sind mit 2,88 geringer als die multikriteriellen Kosten zu Knoten 1 mit einem Wert von 4,0. Es ergibt sich somit der in Abbildung 5.11 dargestellte Zustand P_1^{MK} für die Prioritätenliste.

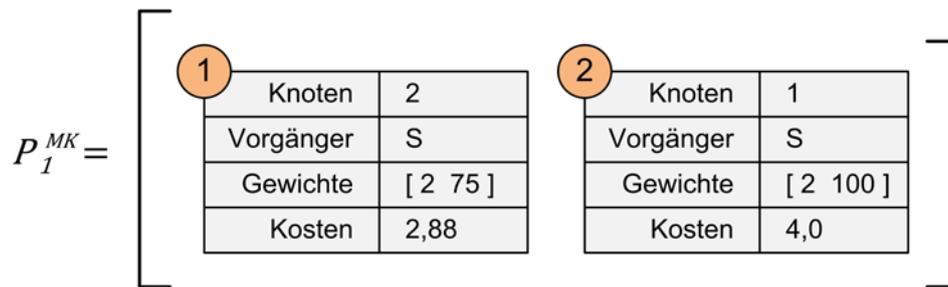


Abbildung 5.11: Zustand der multikriteriellen Prioritätenliste nach der ersten Iteration

Im Gegensatz zum klassischen Dijkstra-Algorithmus werden zusammen mit den für die Iteration berechneten Gewichten auch die bisherigen gegebenenfalls konsolidierten Gewichtsvektoren gespeichert. In der zweiten Iteration wird der Knoten mit den geringsten Kosten aus der Liste entfernt und dessen Nachfolgeknoten untersucht. Der Zielknoten Z ist der einzige Nachfolgeknoten, so dass die Gewichtsvektoren für die Kante vom Startknoten zu Knoten 2 sowie von Knoten 2 zum Zielknoten konsolidiert werden müssen, wobei für das erste Gewicht eine einfache additive Gewichtung angewendet wird. Die jeweilige Wichtung wird aus den Längenverhältnissen der zugehörigen Kanten bestimmt. Entsprechend ergibt sich für das konsolidierte Gewicht bzw. für die Teilkosten hinsichtlich des Sicherheitskriteriums:

$$c_{S,2,Z}^{Sich} = \frac{75}{225} \cdot 2 + \frac{150}{225} \cdot 3 = 2,67$$

Die Gewichte für das Längenkriterium werden bei der Konsolidierung lediglich addiert, damit dieses Gewicht innerhalb späterer Iteration weiterhin als Wichtungskriterium verfügbar ist. Der nachfolgende Normierungsschritt beinhaltet nun die Normierung der Längen der Kante zu Knoten 1 sowie des Kantenzugs vom Startknoten über Knoten 2 zum Zielknoten:

$$c_{S,1}^{Dist} = 5 \cdot \frac{d_{S,1}}{d_{max}} = 5 \cdot \frac{100}{225} = 2,22$$

$$c_{S,2,Z}^{Dist} = 5 \cdot \frac{d_{S,2,Z}}{d_{max}} = 5 \cdot \frac{225}{225} = 5$$

Entsprechend berechnen sich die Kosten $C_{S,1}$ sowie $C_{S,2,Z}$ der beiden Wege wie folgt:

$$C_{S,1} = 0,5 \cdot c_{S,1}^{Dist} + 0,5 \cdot c_{S,1}^{Sich} = 0,5 \cdot 2,22 + 0,5 \cdot 3 = 2,61$$

$$C_{S,2,Z} = 0,5 \cdot c_{S,2,Z}^{Dist} + 0,5 \cdot c_{S,2,Z}^{Sich} = 0,5 \cdot 5 + 0,5 \cdot 2,67 = 3,84$$

Die Prioritätenliste hat nach Abschluss der Iteration somit den in Abbildung 5.12 dargestellten Zustand P_2^{MK} :

$$P_2^{MK} = \left[\begin{array}{c|c|c} \textcircled{1} & \begin{array}{c|c} \text{Knoten} & 1 \\ \hline \text{Vorgänger} & S \\ \hline \text{Gewichte} & [2 \quad 75] \\ \hline \text{Kosten} & 2,61 \end{array} & \textcircled{2} & \begin{array}{c|c} \text{Knoten} & Z \\ \hline \text{Vorgänger} & 2 \\ \hline \text{Gewichte} & [2,67 \quad 225] \\ \hline \text{Kosten} & 3,84 \end{array} \end{array} \right]$$

Abbildung 5.12: Zustand der multikriteriellen Prioritätenliste nach der zweiten Iteration

Da der Weg zu Knoten 1 nun mit geringeren Kosten verbunden ist als der Weg über Knoten 2 zum Zielknoten, werden in der nächsten Iteration erneut die beschriebenen Teilschritte durchgeführt (Konsolidierung, Normierung, Kostenberechnung). Nach der letzten Iteration ergeben sich schließlich die Kosten $C_{S,1,Z} = 3,33$ für den Weg über Knoten 1 und $C_{S,2,Z} = 3,84$ für den Weg über Knoten 2. Bei der zugrunde gelegten Gleichgewichtung der Kriterien wird der kürzere Weg aufgrund der Kompensationseigenschaft des Algorithmus besser als der längere Weg bewertet, obwohl eine im Vergleich schlechtere Sicherheitsbewertung vorliegt.

5.3 Personalisierung

Bei dem im vorigen Abschnitt vorgestellten Ansatz der multikriteriellen Routenberechnung wurde eine Gleichgewichtung der Kriterien angewendet. Durch die Gleichgewichtung können jedoch abgesehen von der Auswahl der anzuwendenden Kriterien keine benutzerbezogenen Präferenzen berücksichtigt werden. Daher wird in diesem Abschnitt ein Verfahren zur Personalisierung der Routenberechnung vorgestellt, das eine Berücksichtigung individueller Präferenzen erlaubt.

5.3.1 Benutzermodellierung

Eine Personalisierung ist eng mit der Modellierung des Benutzers verknüpft. Ein Benutzermodell ist dabei nach (Wahlster & Kobsa, 1989) wie folgt definiert:

A user model is a knowledge source in a system which contains explicit assumptions on all aspects of the user that may be relevant to the behavior of the system. These assumptions must be separable by the system from the rest of the system's knowledge.

Ein Benutzermodell muss alle benötigten Informationen über einen Benutzer bereitstellen, die für die Personalisierung des jeweiligen Systems notwendig sind. So sind für die Personalisierung der Startseite eines Webshops beispielsweise Informationen über die Vorlieben des Benutzers notwendig, um so eine auf dessen Interessen abgestimmte Produktauswahl präsentieren zu können. Im Kontext der Fußgängernavigation mobilitätseingeschränkter

Benutzer werden ebenso bestimmte Informationen für die Personalisierung vor allem der Routenberechnung benötigt. Nach (Jameson, 2003) werden Systeme, welche Adaptierungen für den individuellen Benutzer vornehmen, als benutzer-adaptiv bezeichnet. In diesem Abschnitt wird das Verfahren vorgestellt, welches im Rahmen dieser Arbeit für die Aufnahme und Verwaltung des Benutzermodells verwendet wird. Die Struktur der Benutzer- und Gruppenprofile, wie sie in dieser Arbeit für die Realisierung des Benutzermodells entwickelt wurden, ist in der folgenden Abbildung 5.13 dargestellt.

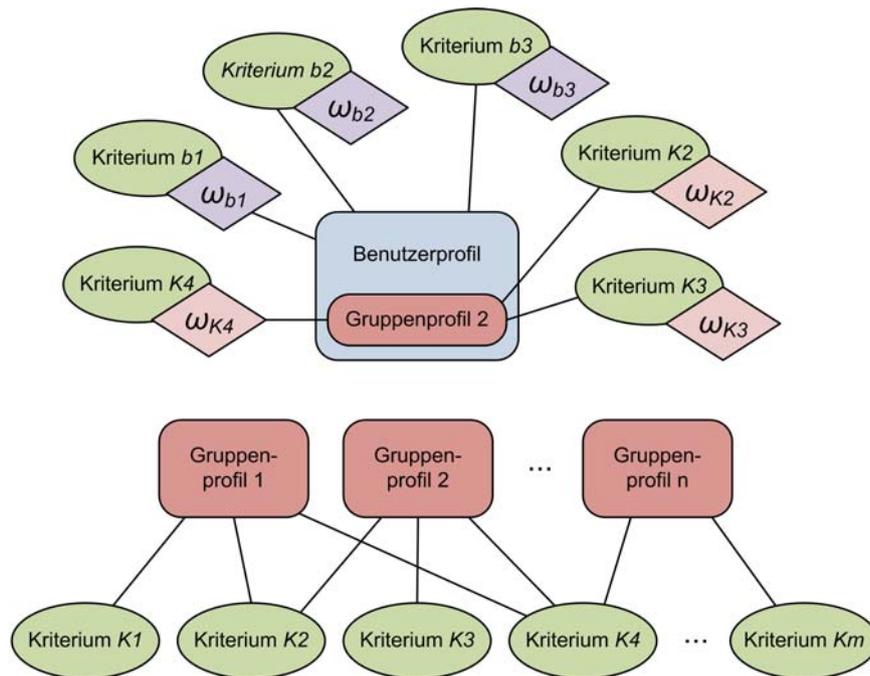


Abbildung 5.13: Struktur des Benutzermodells für die Personalisierung

Das Profil eines Benutzers ist einer der vorgegebenen Benutzergruppen und somit einem Gruppenprofil zugeordnet. Beispiele für Benutzergruppen bilden unter anderem blinde Benutzer, sehbehinderte Benutzer, Rollstuhlfahrer oder Senioren. Jedem Gruppenprofil sind mehrere Kriterien aus einem festgelegten Kriterienkatalog (Kriterium K_1 ... Kriterium K_m) zugeordnet.

Durch die Zuordnung eines Gruppenprofils zu einem Benutzerprofil werden die Kriterien des Gruppenprofils direkt dem Benutzerprofil zugewiesen, wobei diese Kriterien beispielsweise für die personalisierte Bewertung einer Route Anwendung finden. Der Benutzer kann dieser obligatorischen Vorauswahl eigene Kriterien aus einem bestehenden Kriterienkatalog hinzufügen (Kriterium b_1 ... Kriterium b_3). Diese Adaptierung ist insbesondere für die Gruppe der Senioren vorteilhaft, da aufgrund der Vielzahl möglicher Einschränkungen von Benutzern dieser Gruppe eine sehr große Anforderungsheterogenität besteht. Komplettiert wird das Benutzerprofil durch die Bewertungen ω_{K_i} der Wichtigkeit der durch das Gruppenprofil zugewiesenen Kriterien sowie durch die Bewertungen ω_{b_i} der Wichtigkeit der

durch den Benutzer zusätzlich gewählten Kriterien. Die Wichtigkeiten werden durch den Benutzer selbst angegeben, wobei die Aufnahme durch die Bereitstellung einer 5-stelligen Likertskala erfolgt, welche eine Abbildung der Werte auf das Intervall [1 ... 5] realisiert (siehe Abbildung 5.14).

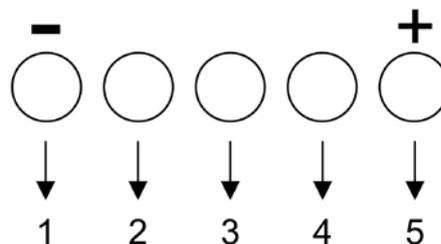


Abbildung 5.14: Abbildung der Likertskala auf Gewichtswerte

Die Abbildung erfolgt dabei derart, dass eine geringe Bewertung eines Kriteriums zu einer geringeren Gewichtung der zugehörigen Kosten führt. Eine sehr hohe Bewertung eines Kriteriums entspricht damit einer höheren Wichtigkeit für den Benutzer. Das zugehörige Verfahren für den Einbezug der durch das Nutzerprofil repräsentierten Bewertungen wird im folgenden Abschnitt 5.3.2 genauer dargestellt. Die vorgestellte Korrelation zwischen Likertskala und Skalenwert wird wie für die individuelle Gewichtung der einzelnen Kriterien ebenso für die Bewertung von Wegabschnitten und die entsprechende Abbildung auf Kosten angewendet. In Abschnitt 5.4. erfolgt dazu eine detaillierte Beschreibung von Strategien für die Konsolidierung von Annotationswerten zu Teilgewichten für die Routenberechnung. Ein Benutzer kann dabei beispielsweise die Sicherheit eines Wegs mittels der 5-stelligen Likertskala bewerten, wobei eine negative Bewertung zu höheren und eine positive Bewertung zu niedrigeren Kosten führt.

An dieser Stelle erfolgt im Vorgriff die Beschreibung der Gruppenprofile für die Gruppen der blinden Fußgänger, Rollstuhlfahrer und Senioren. Diese Benutzerprofile wurden für die in Abschnitt 0 beschriebene Evaluation eingesetzt. Jedes Gruppenprofil beinhaltet primär eine Zuordnung eines oder mehrerer Kriterien, welche zusammen mit den gegebenenfalls vom Benutzer individuell gewählten Kriterien die Basis für die Bewertung von Routen bilden. Für die Evaluation wurde die Anzahl der Kriterien jedoch auf vier beschränkt, um die Auswirkungen der Bewertungen auf die Routenberechnung für die Benutzer nachvollziehbar zu gestalten. Bei einer höheren Anzahl an Kriterien hat die Änderung der Bewertung und damit der Gewichtung eines einzelnen Kriteriums nur eine geringfügige Auswirkung auf die Routenberechnung. Es besteht somit die Gefahr, dass bei einer zu großen Anzahl an Kriterien die Routenberechnung für den Benutzer nicht mehr nachvollziehbar erscheint, so dass eine Beschränkung der Anzahl auf drei bis vier Kriterien sinnvoll ist. Die in den Gruppenprofilen enthaltenen Kriterien für die Routenberechnung der Benutzer, die an der Evaluation teilgenommen haben, sind in der folgenden Abbildung 5.15 dargestellt.

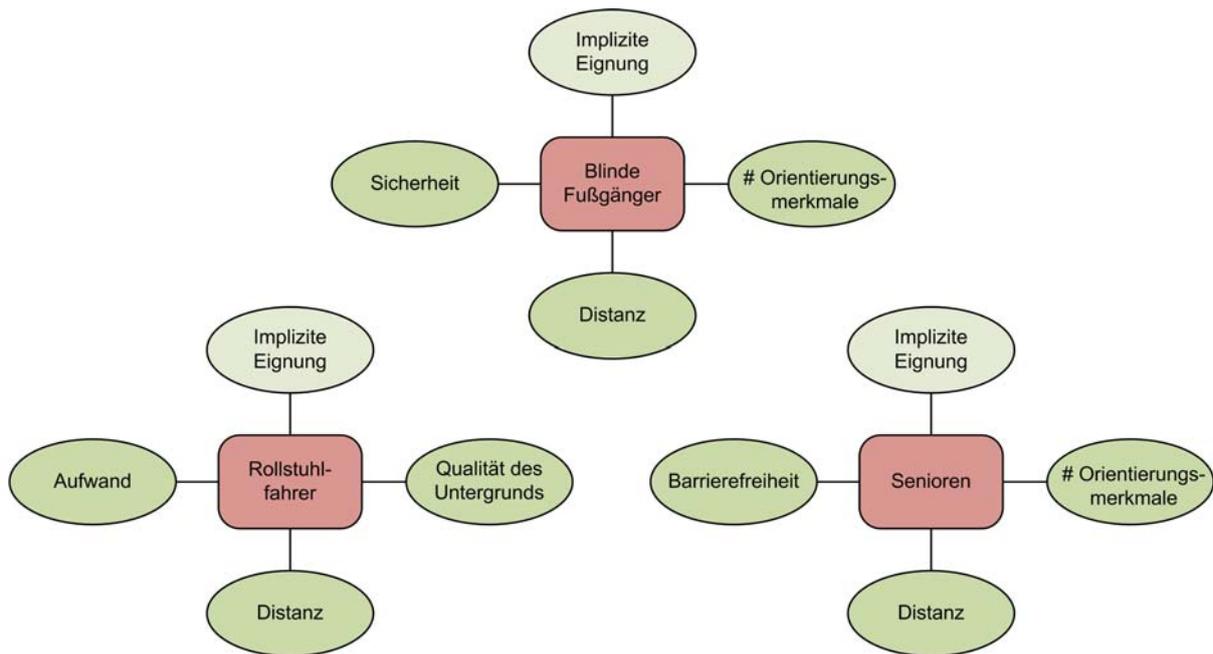


Abbildung 5.15: Gruppenprofile der evaluierten Benutzergruppen

Jedes Gruppenprofil enthält jeweils vier Kriterien, wobei allen Gruppenprofilen das Kriterium ‚Distanz‘ und ‚Implizite Eignung‘ gemein ist. Das Distanz-Kriterium ist für alle Gruppenprofile obligatorisch, da dieses unter anderem bei der Normierung Anwendung findet. Das Kriterium ‚Implizite Eignung‘ setzt sich aus den von den Benutzern des Systems akquirierten impliziten Annotationen zusammen. Es können jedoch auch explizite Annotationen mit einbezogen werden. Beispiele für implizite Annotationen umfassen die Häufigkeit, mit der ein Wegabschnitt und damit ein Teil einer Route von Benutzern der jeweiligen Gruppe frequentiert werden, sowie die durchschnittliche Geschwindigkeit für die Bewältigung dieses Wegabschnitts. Ein Beispiel für eine explizite Annotation ist der Durchschnitt der allgemeinen Bewertung für die Wegabschnitte einer Route. Das Kriterium „Implizite Annotation“ wird bei der Evaluation in Abschnitt 0 jedoch nicht berücksichtigt, da eine Akquisition einer ausreichenden Anzahl an Datensätzen von Benutzern im Vorfeld nicht möglich war. Das Kriterium ist daher in Abbildung 5.15 hell unterlegt.

Die weiteren Kriterien für die Gruppe der blinden Fußgänger bilden die Sicherheit der Route und die Anzahl der Orientierungsmerkmale. Für Rollstuhlfahrer wird das Gruppenprofil durch den zu leistenden Aufwand für die Route sowie die Güte des Untergrunds komplettiert. Eine Route mit hohem Aufwand beinhaltet beispielsweise starke und gegebenenfalls lange Anstiege. Kopfsteinpflaster oder ein sehr schlechter Zustand des Gehwegs mit vielen Kerben, Schlaglöchern und Unebenheiten haben zudem eine negative Auswirkung auf die Güte des Untergrunds und verursachen ein langsames Vorankommen von Rollstuhlfahrern. Das Gruppenprofil der Senioren beinhaltet zusätzlich zu den beiden Standardkriterien die Kriterien Barrierefreiheit und Anzahl der Orientierungsmerkmale. Wie auch für

die Gruppe der blinden Fußgänger nimmt die Anzahl der Orientierungsmerkmale für Senioren eine übergeordnete Rolle ein, da gerade für diese Personengruppe die Umsetzung von Navigationsanweisungen in eine konkrete Wegewahl oftmals problematisch ist.

5.3.2 Personalisierte Routenberechnung

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Modellierung der Benutzer mittels Benutzerprofilen bildet die Grundlage für die Personalisierung der Routenberechnung. Die nicht-personalisierte multikriterielle Berechnung einer Route erfolgt mittels einer einfachen additiven Gewichtung, wobei eine Gleichgewichtung der einzelnen Kriterien vorgenommen wird. Für die personalisierte Routenberechnung wird ebenso wie für den nichtpersonalisierten Fall die folgende Formel zur Berechnung der Kosten C_K als Grundlage verwendet:

$$C_K = \sum_{i=1}^N \omega_i c_i$$

Das hier vorgestellte Verfahren zur Personalisierung basiert auf der Anpassung der Gewichtungen ω_i der einzelnen Kriterien. Dabei wird eine Korrelation zwischen den innerhalb des jeweiligen Benutzerprofils gespeicherten Bewertungen und den Gewichten hergestellt (siehe Abbildung 5.16).

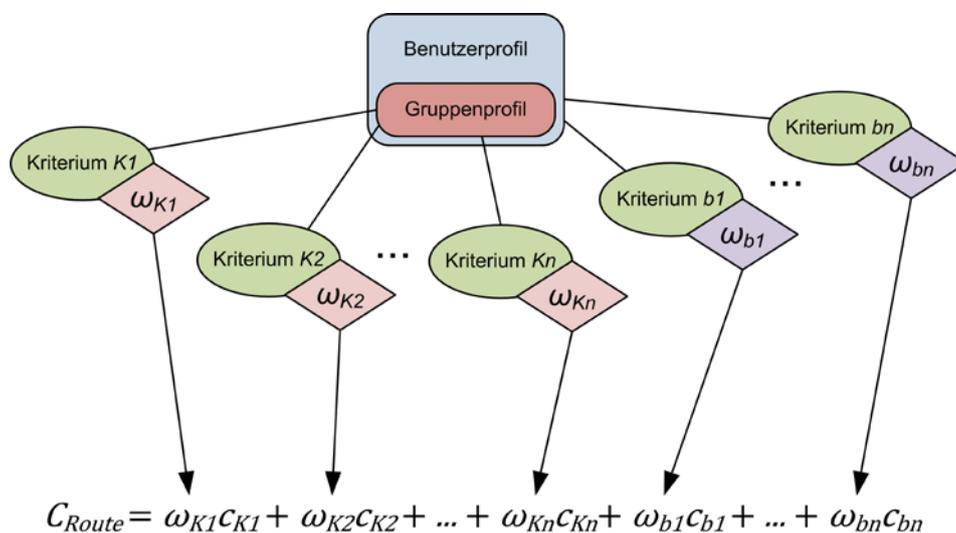


Abbildung 5.16: Korrelation zwischen Benutzerprofil und Kostenfunktion

Die Teilgewichte c_i ergeben sich dabei aus den Bewertungen der Route hinsichtlich verschiedener Kriterien wie beispielsweise der Länge oder der Bewertung bezogen auf die Sicherheit der Route (siehe dazu auch Abschnitt 5.4). Die Auswahl der Teilgewichte ω_{Ki} wird durch das Gruppenprofil vorgegeben, die Teilgewichte ω_{bi} ergeben sich aus der Auswahl zusätzlicher Kriterien durch den Benutzer. So kann $c_{Sicherheit}$ beispielsweise die Teilkosten

für die Sicherheit der Route darstellen, wobei durch das Benutzerprofil eine entsprechende Gewichtung $\omega_{\text{Sicherheit}}$ bereitgestellt wird. Bevor die unter Verwendung der 5-stelligen Likertskala aufgenommenen Bewertungen b_i eines einzelnen Benutzers für die Gewichtung der normierten Kriterienwerte verwendet werden können, müssen die Bewertungen so transformiert werden, dass die Bedingung $\sum \omega_i = 1$ erfüllt wird. Für eine Bewertung b_i ergibt sich das zugehörige Gewicht ω_i aus der nachfolgenden Formel, wobei n die Anzahl der Kriterien ist. Dabei werden sowohl die Bewertungen für die durch das Gruppenprofil vorgegebenen Kriterien als auch die Bewertungen für die vom Benutzer zusätzlich gewählten Kriterien einbezogen.

$$\omega_i = \frac{b_i}{\sum_{j=1}^n b_j}$$

Der multikriteriell gewichtete Graph aus Abschnitt 5.2 dient erneut als Grundlage für die Beispielrechnung, um die Vorteile einer Personalisierung über einen direkten Vergleich darstellen zu können. Der Übersicht halber ist der Graph in der folgenden Abbildung 5.17 erneut dargestellt.

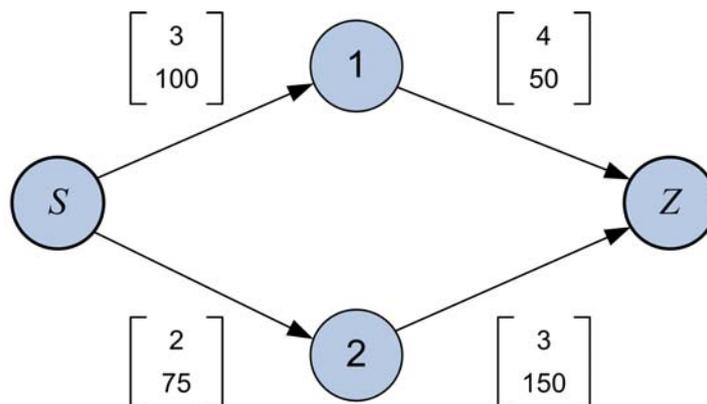


Abbildung 5.17: Graph mit multiplen Gewichten

Im Gegensatz zum Beispiel in Abschnitt 5.2 wird an dieser Stelle jedoch eine Personalisierung vorgenommen. Das zugrunde gelegte Benutzerprofil beinhaltet dabei die Bewertungen 5 für das Kriterium Sicherheit und die Bewertung 1 für das Kriterium Länge. Ein Benutzer mit diesem Profil legt sehr großen Wert auf einen sicheren Weg, auch wenn dieser länger ausfällt als die kürzeste Route. Aus dem gegebenen Benutzerprofil berechnen sich die Gewichte $\omega_{\text{Sicherheit}}$ für das Kriterium Sicherheit und ω_{Distanz} für das Kriterium Länge wie folgt:

$$\omega_{\text{Sicherheit}} = \frac{5}{5 + 1} = \frac{5}{6} = 0,83$$

$$\omega_{\text{Distanz}} = \frac{1}{5 + 1} = \frac{1}{6} = 0,17$$

Die Rundung auf die zweite Nachkommastelle hat bei den Berechnungen keinen signifikanten Einfluss auf das Endergebnis. Für den finalen Vergleich der beiden möglichen Wege über Knoten 1 und Knoten 2 ergeben sich die Kosten $C_{S,1,Z}$ und $C_{S,2,Z}$ wie folgt:

$$C_{S,1,Z} = 0,17 \cdot c_{S,2,Z}^{Distanz} + 0,83 \cdot c_{S,2,Z}^{Sicherheit} = 0,17 \cdot 3,33 + 0,83 \cdot 3,33 = 3,33$$

$$C_{S,2,Z} = 0,17 \cdot c_{S,2,Z}^{Distanz} + 0,83 \cdot c_{S,2,Z}^{Sicherheit} = 0,17 \cdot 5 + 0,83 \cdot 2,66 = 3,06$$

Aufgrund der durch das Benutzerprofil implizierten Bevorzugung des Kriteriums Sicherheit führt die korrelierte Gewichtung zu geringeren Kosten der längeren Strecke. Durch die Berücksichtigung der Präferenzen des Benutzers wird somit die höhere Distanz durch eine bessere Sicherheitsbewertung überkompensiert.

Nachdem in diesem Abschnitt das Verfahren zur Personalisierung der Routenberechnung vorgestellt wurde, erfolgt im nächsten Abschnitt die Beschreibung von Strategien zur Bewertung von Annotationen, so dass eine Konsolidierung der einzelnen Annotationswerte zu Teilgewichten realisiert werden kann.

5.4 Strategien zur Konsolidierung von Annotationen

Das Verfahren der multimodalen Annotation geographischer Daten basiert auf impliziten und expliziten Annotationen durch die Benutzer. Annotationen können zentral auf einem Server verwaltet und für die Bereitstellung zusätzlicher Informationen über die entsprechenden geographischen Entitäten verwendet werden. Damit eine derartige Bereitstellung eine direkte Anwendung für die personalisierte multikriterielle Routenberechnung finden kann, müssen einzelne Annotationen zu den in den vorigen Abschnitten eingeführten Teilgewichten c_i konsolidiert werden. So müssen beispielsweise Sicherheitsbewertungen vieler Benutzer in ein Teilgewicht $c_{Sicherheit}$ für den zugehörigen Wegabschnitt zusammengefasst werden. Änderungen der Umwelt haben einen direkten Einfluss auf die Annotationen von Benutzern. Gleichzeitig unterliegen die Annotationen auch bei gleichbleibenden Umwelteigenschaften aufgrund unterschiedlicher subjektiver Wahrnehmungen der Benutzer Schwankungen, so dass sich eine natürliche Heterogenität der Benutzerannotationen ergibt. Ferner kann nicht ausgeschlossen werden, dass Annotationen vorsätzlich falsch vorgenommen werden.

Für die Bildung einer möglichst guten Hypothese der realen Gegebenheiten werden robuste Verfahren benötigt, die eine Konsolidierung von Annotationen zu Teilgewichten erlauben, ohne dass störende Einflussfaktoren wie etwa die natürliche Heterogenität oder bewusste Falsch-Annotationen zu einem signifikant verfälschten Ergebnis führen. In diesem Abschnitt werden daher Ansätze und Strategien zur Berechnung von konsolidierten Werten für die im vorigen Abschnitt eingeführte implizite Eignung vorgestellt, welche als Basis

implizite Annotationen der Benutzer anwendet. Diese Strategien lassen sich ebenso auf die Konsolidierung von expliziten Benutzerbewertungen hinsichtlich verschiedener Kriterien wie beispielsweise Sicherheit oder Barrierefreiheit anwenden. Ein besonderer Schwerpunkt bei der Entwicklung dieser Strategien ist dabei die Robustheit der angewendeten Verfahren, sowohl bezogen auf die temporale Modellierung, die Heterogenität der Benutzer als auch hinsichtlich der Vertrauenswürdigkeit der von Benutzern akquirierten Annotationen.

Die in Abschnitt 4.2 vorgenommene formale Definition multimodaler Annotationen beinhaltet einen expliziten zeitlichen Bezug durch den Zeitpunkt des eigentlichen Annotationsvorgangs. Annotationen können als Informationen verstanden werden, die Teile der realen Umwelt beschreiben bzw. abbilden. Die Umwelt unterliegt jedoch ständigen Änderungen, so führt beispielsweise eine Baustelle durch die entstehenden räumlichen Einschränkungen und den stark erhöhten Geräuschpegel zu einer reduzierten Eignung für diverse Benutzergruppen. Allgemein führt das Vorhandensein einer Baustelle zumeist zu einer notwendigen Umgehung des Bereiches für alle Fußgänger. Die Umgehung einer Baustelle bedeutet dabei für blinde Fußgänger die Erkundung eines unbekanntes Weges, wobei durch den erhöhten Geräuschpegel die Orientierung erheblich erschwert wird. Für Rollstuhlfahrer wiederum kann die bereitgestellte Umgehung mit unüberwindbaren strukturellen Barrieren verbunden sein. Die direkte Abbildung eines durch eine Baustelle eingeschränkt zugänglichen Bereichs wird dann durch entsprechende (negative) Annotationen der Benutzer widerspiegelt. Ein geeignetes Verfahren muss unter temporalen Aspekten ältere Annotationen bei der Konsolidierung grundsätzlich geringer gewichten als jüngere, um eine möglichst gute Abbildung der aktuellen Umgebungsbedingungen zu erreichen.

Zur Illustration von Strategien zur temporalen Konsolidierung wird die folgende Situation in Bezug auf Annotationen betrachtet, welche die Bewertung der Sicherheit für den zugrunde liegenden Wegabschnitt darstellen. Es wird angenommen, dass der Wegabschnitt für die Benutzergruppe der blinden Fußgänger ein hohes Maß an Sicherheit bietet, wobei eine Änderung durch den Beginn einer Baustelle hervorgerufen wird. Der Beginn der Arbeiten an einer Baustelle verändert die Umwelteigenschaften für den Wegabschnitt und führt zu einer signifikant schlechteren Sicherheit. Nach Beendigungen der Bauarbeiten führen die baulichen Veränderungen zu einer Änderung der Sicherheit, wobei der ursprünglich sehr gute Wert jedoch nicht mehr erreicht wird. Ein Beispiel für ein derartiges Szenario bilden Verkehrsinseln, welche zunehmend mit komplett abgesenkten Bordsteinen konzipiert werden, die von blinden Fußgängern nicht mehr taktil mittels eines Blindenlangstocks ertastet werden können.

Die beschriebenen Änderungen der Sicherheit haben dabei jeweils Einfluss auf die Annotationen der Benutzer. Für die folgenden Betrachtungen ist zu beachten, dass eine hohe und damit gute Bewertung zu entsprechend niedrigen Teilkosten führt, eine Sicherheitsbewertung von 5 wird daher auf einen Teilkostenwert von 1 abgebildet. Eine Strategie für die

Konsolidierung der Annotationswerte ist eine einfache Mittelwertbildung aus den zugehörigen Teilkosten eines festgelegten zeitlichen Intervalls. Ein konsolidierter Wert beispielsweise für die Sicherheit für einen Zeitpunkt τ ergibt sich somit aus dem Mittelwert aller Teilkosten für die Sicherheit, welche innerhalb des zeitlichen Intervalls $[\tau - \Delta t, \tau]$ annotiert wurden. Sei N die Anzahl der innerhalb dieses Intervalls liegenden Annotationen, dann ergibt sich für die Gewichtung der einzelnen Teilkosten (Sicherheitswerte) der folgende in Abbildung 5.18 dargestellte Zusammenhang.

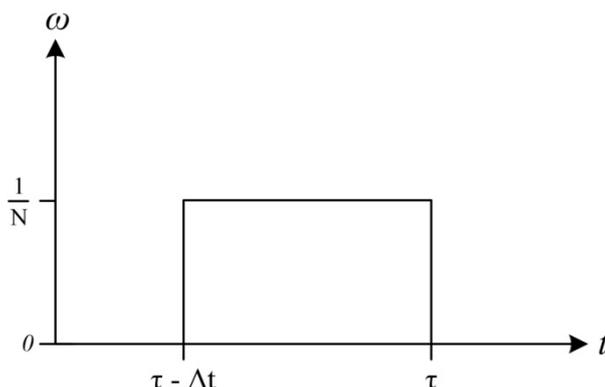


Abbildung 5.18: Gleichgewichtung der Annotationswerte

Für das angeführte Beispiel einer Baustelle ist in der folgenden Abbildung 5.19 der Zusammenhang zwischen Benutzerannotationen und konsolidierten Bewertungen dargestellt, welche in der Folge zu Teilkosten des Wegabschnitts führen. Die Teilkosten aus den Annotationen der Benutzer sind durch Kreuze dargestellt, die konsolidierten Werte für die Sicherheit zu einem Zeitpunkt t ergeben sich aus dem Wert der Funktion $\sim B_{\Delta t}$ an der zugehörigen Stelle t , der sich wie beschrieben aus dem Mittelwert der Teilkosten a_i ergibt, welche zeitlich innerhalb des Intervalls $[t - \Delta t, t]$ liegen. Der Zusammenhang wird durch die folgende Formel beschrieben, wobei N die Anzahl der im Intervall durch Benutzer vorgenommenen Annotationen und $\tau(a_i)$ der Annotationszeitpunkt von a_i ist:

$$\sim B_{\Delta t}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N |a_i|}{N}, \quad \text{wobei } \forall i: t - \Delta t \leq \tau(a_i) \leq t$$

Im dargestellten Beispiel liegt der Beginn der Baustelle bei Tag 11 und das Ende der Baustelle bei Tag 23. Für Δt wurden jeweils für die beiden Reihen ein Intervall von sieben beziehungsweise vierzehn Tagen verwendet. Zu beachten ist, dass sich das nachfolgende Beispiel auf Annotationen einer Benutzergruppe bezieht. Für die Darstellung wurden fiktive Daten verwendet, welche sich nicht auf die Ergebnisse der Evaluation beziehen. Sie ermöglichen jedoch eine plausible Abbildung der Problemstellung, welche durch die Konsolidierung der Annotationswerte gegeben ist.

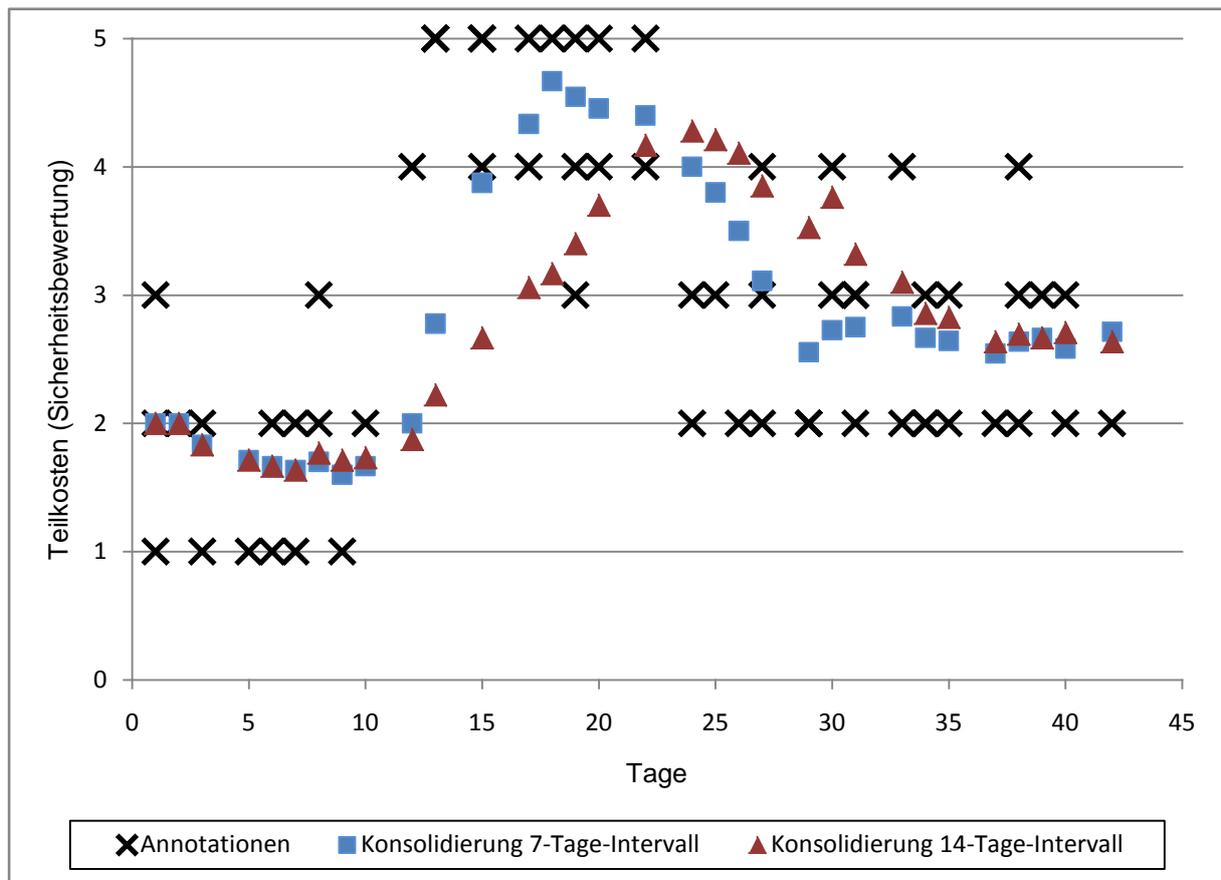


Abbildung 5.19: Zusammenhang zwischen Annotationen und konsolidierter Bewertung

Vor dem Start der Bautätigkeiten liegen die Teilkosten für die Annotationen der Benutzer im Mittel geringfügig unterhalb des Wertes 2, so dass von einem Bereich mit guter Sicherheit für die betreffenden Benutzer ausgegangen werden kann. Nach Beginn der Bautätigkeit ergeben sich aufgrund der Beeinträchtigung durch die Baustelle signifikant schlechtere Sicherheitsbewertungen, so dass die konsolidierten Teilkosten für die Sicherheit innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne stark ansteigen. Nach Beendigung der Bautätigkeiten erfolgt dann eine schrittweise Verbesserung der konsolidierten Sicherheitsbewertung. Aufgrund der baulichen Änderungen wird das vorhergehende Niveau jedoch nicht mehr erreicht.

Die im obigen Beispiel verwendete einfache Strategie, bei der sich der aktuelle Wert für die Sicherheitsbewertung aus dem (gleichgewichteten) Mittelwert der Teilkosten der Annotationswerte innerhalb eines festgelegten Intervalls berechnet, zeigt eine gute Robustheit gegenüber Annotationen, die stark vom Mittelwert abweichen. Nachteilig ist hingegen das „Nachlaufen“ des Mittelwerts bei Änderungen der Umwelteigenschaften, wobei erst nach einer bestimmten Zeitspanne ein Wert erreicht wird, der die geänderten Bedingungen widerspiegelt. Der Effekt des Nachlaufens ist bei einem kurzen Intervall geringer, da Änderungen innerhalb der Annotationswerte einen größeren Einfluss auf die Mittelwertbildung haben. Bei der Verwendung von kurzen Intervallen haben jedoch vorsätzlich falsche Annotationen

beziehungsweise sogenannte Ausreißer einen größeren Einfluss, da diese nur durch eine geringere Anzahl von Annotationen ausgeglichen werden können, welche die Umgebungseigenschaften besser wiedergeben.

Das Verfahren der Gleichgewichtung über ein vorher festgelegtes Intervall besitzt je nach Aufkommen der Annotationen Schwächen, beispielsweise wenn innerhalb des Intervalls Ausreißer einen hohen Einfluss erlangen oder Umgebungseigenschaften erst nach einer Verzögerung im konsolidierten Wert abgebildet werden. Das Konsolidierungsverfahren muss somit dahingehend verbessert werden, dass stark vom Mittelwert abweichende Annotationen weiterhin keinen signifikanten Einfluss erlangen und andererseits sich ändernde Umweltgegebenheiten schneller durch den konsolidierten Wert der Annotationen abgebildet werden. Um eine schnellere Anpassung an sich ändernde Umwelteigenschaften zu gewährleisten, muss beim Einbezug von zeitlich älteren Annotationen eine stärkere Gewichtung aktuellerer Annotationen erfolgen. In Abbildung 5.20 sind zwei Beispiele für derartige Strategien zur Bestimmung geeigneter Gewichtungen dargestellt, wobei weiterhin die Bedingung $\sum_{i=1}^N \omega_i = 1$ erfüllt sein muss.

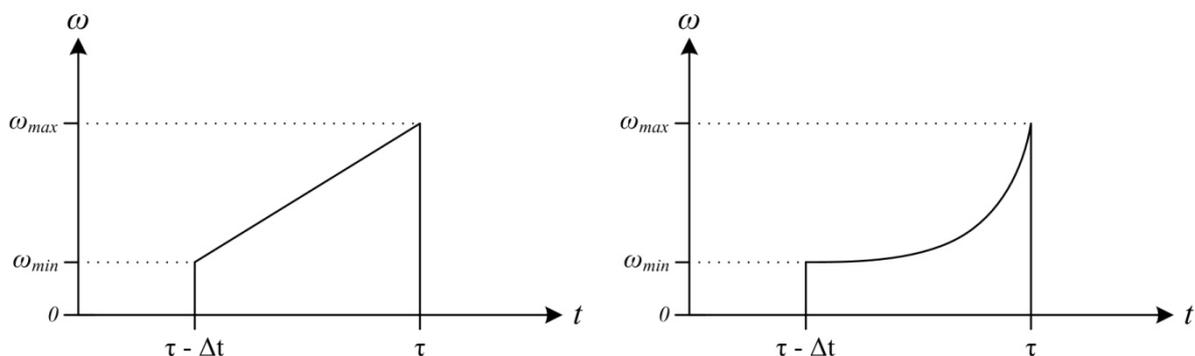


Abbildung 5.20: Höhergewichtung aktuellerer Annotationswerte

Das erste Beispiel zeigt eine lineare Höhergewichtung der Annotation beginnend mit einer Gewichtung ω_{min} für Annotationen, die zum Zeitpunkt $\tau - \Delta t$ aufgenommen wurden, und linear steigend bis zur Gewichtung ω_{max} für aktuellere Annotationen. Im zweiten Beispiel erfolgt eine Steigerung der Gewichtung aktuellerer Annotationen zwar später als im ersten Beispiel, dafür werden aktuellere Annotationen jedoch deutlich stärker gewichtet als ältere, wobei sich ein exponentieller Zusammenhang ergibt. Bei der zweiten Strategie haben stark vom Mittelwert abweichende Annotationen im Bereich der hohen Gewichtung einen stärkeren Einfluss auf den konsolidierten Wert als im ersten Beispiel. Dem gegenüber erfolgt eine deutlich schnellere Angleichung des konsolidierten Wertes an sich ändernde Umgebungseigenschaften.

Vorsätzlich falsche Annotationen können bei der Verwendung von Benutzerdaten nicht ausgeschlossen werden, so dass Verfahren notwendig sind, die eine robuste Konsolidierung der Annotationen sowie die Kompensation stark vom Mittelwert abweichender Werte erlau-

ben. (Holone, Misund & Holmstedt, 2007) schlagen hinsichtlich der Aktualität die Verwendung der jeweils letzten Annotation beziehungsweise letzten Bewertung vor. Die Autoren beziehen sich dabei auf Erfahrungen aus anderen Ansätzen für die kollaborative Informationsgewinnung wie beispielsweise auf Wikipedia²⁸, wo es bei Unstimmigkeiten zwischen den Autoren eines Artikels zu sogenannten „Edit Wars“ kommt. Die jeweils letzte Änderung hat dabei Bestand, ohne dass vorherige Modifikationen mit in das Ergebnis einfließen müssen. Dieses Konzept ist für eine Anwendung auf Verfahren zur Annotation geographischer Daten jedoch nicht geeignet. Insbesondere der direkte Einfluss auf die Routenberechnung bedingt, dass bewusst falsche Annotationen zu keiner Zeit einen dominierenden Einfluss erlangen dürfen. Es sind folglich Strategien zu entwickeln, welche lokal stark abweichende Annotationswerte geringer innerhalb des Konsolidierungsprozesses gewichten. Derartige Strategien basieren prinzipiell auf der Annahme, dass sich Änderungen der Umgebungseigenschaften in einer stetigen Tendenz in Bezug auf die Annotationswerte der Benutzer auswirken. Einzelne stark abweichende Werte können daher mit einem vergleichbar geringen Aufwand erkannt werden.

Weiterführende Ansätze können den Einbezug verschiedener Kriterien bei der Bewertung von Annotationen beinhalten. So sind die Kriterien für die Bewertung von Wegabschnitten nicht vollständig unabhängig voneinander. Eine Verschlechterung der Sicherheit kann mit einer gleichzeitigen Verschlechterung der Barrierefreiheit einhergehen. Zu beachten ist jedoch, dass dieser Zusammenhang nicht immer gegeben ist. Das angeführte Beispiel der Umgehung einer Baustelle würde einen solchen Zusammenhang bedingen. Eine Verschlechterung der Sicherheit durch bauliche Maßnahmen an einer Fußgängerinsel führen jedoch nicht zwingend zu einer Verschlechterung der Barrierefreiheit. Werden Änderungen weiterer Kriterien betrachtet, so kann gegebenenfalls eine bessere Hypothese gebildet werden, ob diese aufgrund veränderter Umwelteigenschaften hervorgerufen werden. Der Einbezug mehrerer Kriterien bei der Bewertung von Annotationen bildet entsprechend einen multimodalen Ansatz für die Konsolidierung.

Einen weiteren Ansatz für die Gewichtung von Annotationswerten bei der Konsolidierung bildet der Einbezug eines Maßes für die Vertrauenswürdigkeit der Annotation bzw. des annotierenden Benutzers. So können bei der Akquisition von Annotationsdaten Benutzer in zwei Kategorien unterteilt werden: professionelle Annotationslieferanten und ‚normale‘ Benutzer, die als Anwender eines Navigationssystems zusätzliche Daten liefern. Professionelle Annotationslieferanten können dabei beispielsweise Mitarbeiter städtischer Einrichtungen sein, die spezifische Daten für die genannten Zielgruppen erheben. Diesen Daten kommt somit eine deutlich höhere Vertrauenswürdigkeit zu, als Annotationen, welche von normalen Benutzern erhoben werden. Zudem kann von einer genaueren Positionierung bei den professionellen Annotationen ausgegangen werden. Bei normalen Benutzern eines An-

²⁸ Wikipedia Startseite: <http://www.wikipedia.org>

notationsdienstes sind verschiedene Abstufungen der Vertrauenswürdigkeit denkbar, wobei der jeweilige Wert adaptiv aus dem Vergleich der Annotationen mit dem konsolidierten Wert berechnet werden könnte. Bei Merkmalsannotationen kann ebenso ein Vergleich mit bereits existenten Annotationen anderer Nutzer für eine Aussage über die Vertrauenswürdigkeit der Annotation und damit indirekt über die Vertrauenswürdigkeit des annotierenden Benutzers herangezogen werden. Die beschriebenen Ansätze können für weiterführende Verfahren zur Konsolidierung und Bewertung von Annotationsdaten verwendet werden, wobei eine detaillierte Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgt.

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird nach einer kurzen Darstellung der theoretischen Grundlagen aus den Bereichen Graphentheorie und Multikriterienanalyse ein Verfahren für die multikriterielle Routenberechnung entwickelt. Das Verfahren basiert auf einer Verknüpfung von Ansätzen aus der Multikriterienanalyse mit dem Dijkstra-Algorithmus. Das Verfahren wird im zweiten Teil des Kapitels erweitert, so dass eine Personalisierung durch den jeweiligen Benutzer ermöglicht wird. Durch diese Personalisierung, welche aus einer Kombination eines Gruppenprofils (Grobprofil) sowie benutzerspezifischen Präferenzen (Feinprofil) zusammensetzt, können die Bedürfnisse verschiedener Benutzer bei der Routenberechnung berücksichtigt werden.

Im letzten Teil des Kapitels werden Strategien für die Konsolidierung von Annotationen vorgestellt. Diese Strategien erlauben eine Zusammenführung von Bewertungen der Benutzer zu Teilgewichten innerhalb des zugrundeliegenden Navigationsgraphen. Dabei werden Ansätze für Strategien diskutiert, welche einerseits die Abbildung von Änderungen der Umwelt erlauben und andererseits robust gegenüber vorsätzlich falschen Bewertungen sind. Durch die Verfahren zur Konsolidierung von Annotationen wird der Kreis zwischen initialer Aufnahme und finaler Verwendung der Annotationen der Benutzer geschlossen.

6 Systemarchitektur

In diesem Kapitel wird eine konzeptionelle Systemarchitektur vorgestellt, die zur Realisierung eines Systems zur Verwaltung und Akquisition multimodaler Annotationen sowie der Bereitstellung darauf aufbauender Dienste geeignet ist. Das Grundkonzept für den Systementwurf bildet dabei eine Client-Server-Architektur, die eine zentrale Verwaltung der von den Benutzern akquirierten Daten sowie deren Konsolidierung und weitere Bereitstellung für die Benutzer ermöglicht. Dabei erfolgt eine Verteilung der Fachlogik zum Teil auf die Clientseite, so dass Anforderungen an den Datenschutz entsprochen werden kann.

Die Grundlage für die zentralen Anwendungsfälle des Clients bilden die normalen Funktionalitäten eines Navigationssystems wie etwa die Eingabe von Start- und Zielpunkt oder die Berechnung einer Route. Zusätzlich müssen weitere Anwendungsfälle berücksichtigt werden, so dass Annotationen durch den Benutzer vorgenommen werden können und eine personalisierte Zielführung bereitgestellt werden kann:

- Eingabe von Annotationen,
- Eingabe von Benutzerpräferenzen,
- Übermittlung neuer Annotationsdaten,
- Aktualisierung der Geo- und Annotationsdaten.

Die Anwendungsfälle des Clients bedingen weitere Anwendungsfälle auf Seiten des Servers, so dass insbesondere die Übermittlung neuer Annotationsdaten sowie die Aktualisierung mit Geo- und Annotationsdaten durchgeführt werden können. Zusätzlich müssen auf der Serverseite Annotationen konsolidiert werden, um für verschiedene Benutzer geeignete Kantengewichte bereitstellen zu können. Nachfolgend sind die wesentlichen Anwendungsfälle des Servers aufgeführt:

- Übernahme von Annotationsdaten,
- Konsolidierung von Annotationsdaten,
- Bereitstellung von personalisierten Geo- und Annotationsdaten.

Die genannten Anwendungsfälle erfordern die Bereitstellung geeigneter Komponenten sowie einer Infrastruktur für die Bereitstellung der für die Realisierung benötigten Dienste. Die zentralen Komponenten der Serverseite werden im folgenden Abschnitt 6.1 dargestellt, während die Darstellung der zentralen Komponenten der Clientseite in Abschnitt 6.2 erfolgt. Dieser allgemeinen Darstellung der Systemarchitektur schließt sich eine kurze Diskussion des datenschutzrechtlichen Kontextes sowie Aspekten der Datensicherheit in Ab-

schnitt 6.3 an. Abschließend wird die in dieser Arbeit entwickelte Simulationsumgebung in Abschnitt 6.4 vorgestellt, für die Teile der Serverseite implementiert wurden. Eine prototypische Implementierung des Clientsystems wurde für die Evaluation durchgeführt, deren konkrete Umsetzung in Kapitel 7.2 detailliert beschrieben ist.

6.1 Zentrale Komponenten der Serverseite

Um durch Benutzer erhobene Annotationsdaten verfügbar zu machen und zu konsolidieren, muss eine zentrale Verwaltung dieser Daten auf einem Server erfolgen. Die Daten auf dem Server werden anderen Benutzern zur Verfügung gestellt, die diese unter der Berücksichtigung der eigenen Anforderungen für die Berechnung optimaler Routen verwenden können. Abbildung 6.1 zeigt das Schichtenmodell der Serverseite mit den wichtigsten Komponenten, wobei eine Beschränkung auf Komponenten erfolgt, die einen direkten Zusammenhang mit der Realisierung von Annotationsdiensten aufweisen.

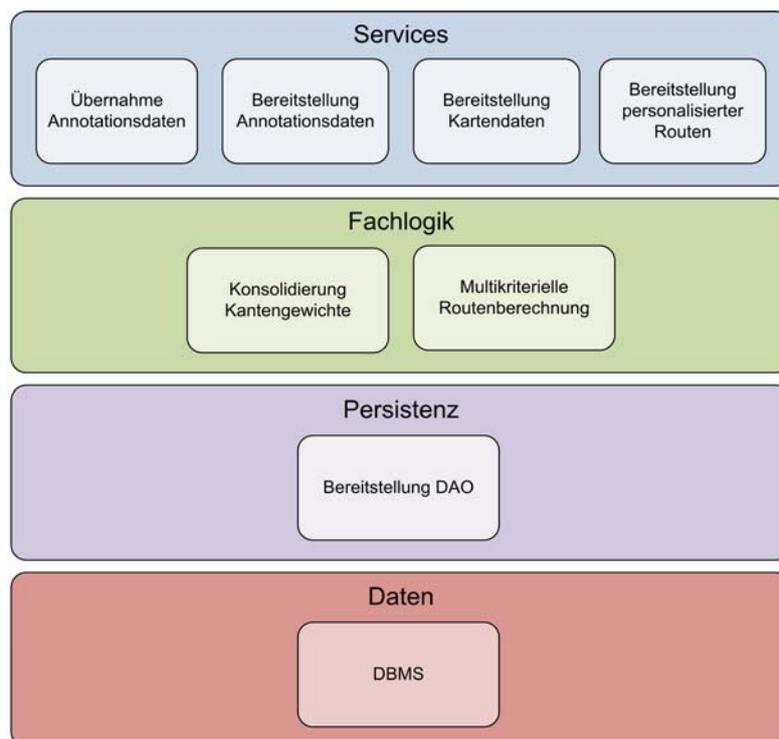


Abbildung 6.1: Schichtenmodell der Serverseite

Der Annotationsserver muss eine Reihe von Diensten bereitstellen, um die geforderten Anwendungsfälle abdecken zu können. Die Dienste werden in der folgenden Aufstellung detailliert beschrieben. Bei den Diensten müssen aufgrund der Verwendung von Gruppenprofilen (Grobprofilen) oder Benutzerprofilen (Feinprofilen) der Anwender datenschutzrechtliche Vorgaben berücksichtigt werden, die in Abschnitt 6.3 detailliert diskutiert werden.

- *Übernahme von Annotationsdaten:* Dieser Dienst ermöglicht Benutzern die Übertragung von eigenständig erhobenen impliziten und expliziten Annotationen an den Server. Die Annotationsdaten sind dabei je nach Dienstkonfiguration mit dem Gruppenprofil oder dem Benutzerprofil des Benutzers verknüpft.
- *Bereitstellung von Annotationsdaten:* Dieser Dienst stellt Benutzern Annotationsdaten für bereits auf dem Client vorhandenes Kartenmaterial bereit. Die Annotationsdaten werden je nach Dienstkonfiguration anhand des Gruppenprofils oder Benutzerprofils des Benutzers auf dem Server ausgewählt, so dass die Annotationsdaten den Anforderungen des Benutzers entsprechen. Die bereitgestellten Daten können vom Clientsystem für die Routenberechnung und Zielführung verwendet werden. Bei der Bereitstellung von Annotationsdaten müssen je nach Zielsystem unterschiedliche Zielformate berücksichtigt werden. Sollen die Annotationsdaten in Anwendungen von Drittanbietern integriert werden, so müssen gegebenenfalls offene sowie auch proprietäre Datenformate unterstützt werden. Das von Kartenanbietern und Systementwicklern verwendete Bezugssystem WGS84 erlaubt eine einheitliche geographische Referenzierung und somit die Bildung eines einheitlichen Ortsbezugs. Die Herstellung eines einheitlichen Bezugs zu den in den verschiedenen Kartenformaten unterschiedlich repräsentierten geographischen Entitäten ist jedoch nur sehr schwer realisierbar. Ein Ansatz ist der Entwurf eines Zwischenformats mit Transformationsregeln, so dass die Bildung der notwendigen Bezüge zwischen Annotationsdaten und Kartendaten von Drittanbietern durchgängig ermöglicht wird.
- *Bereitstellung von Kartendaten:* Dieser Dienst stellt den Benutzern aktualisierte geographische Basisdaten bereit, so dass die Kartendaten auf dem Clientsystem auf den aktuellen Stand gebracht werden können. Dabei handelt es sich lediglich um Basisdaten ohne die eigentlichen Annotationen, so dass beispielsweise bauliche Änderungen in den Datenbestand von Clientsystemen integriert werden können.
- *Bereitstellung personalisierter Routen:* Dieser Dienst stellt Clientsystemen die Infrastruktur des Servers für die Berechnung personalisierter Routen bereit. Der Dienst kann insbesondere von Clientsystemen in Anspruch genommen werden, deren eigene Rechenleistung für die Berechnung nicht ausreichend ist. Je nach Geschäftsmodell kann die personalisierte Routenberechnung durch ausschließliche Verlagerung auf die Serverseite auch als kostenpflichtiger Zusatzdienst angeboten werden. Für die Verwendung dieses Dienstes muss das Clientsystem die notwendigen Benutzerpräferenzen übermitteln, so dass die Personalisierung durchgeführt werden kann.

Die Fachlogik ist unterhalb der Dienst-Schicht angeordnet und bildet die eigentlichen Geschäftsprozesse ab. Eine wesentliche Komponente dieser Schicht stellt Funktionen zur Konsolidierung von Annotationsdaten zu multiplen Kantengewichten bereit. Die Auswahl der Datensätze erfolgt dabei auf Anfrage über den zugehörigen Dienst zumindest auf Ebene der

Benutzergruppe personalisiert, so dass nur Daten Verwendung finden, die einen Bezug zur Benutzergruppe des anfragenden Benutzers haben. Die Konsolidierung von Annotationsdaten ist Grundlage für die Bereitstellung von Diensten zur Aktualisierung von geographischen Daten, da die Gewichte als Attribute innerhalb der geographischen Datenbasis für die Routenberechnung benötigt werden.

Sowohl Fachlogik als auch die bereitgestellten Dienste setzen auf einer Persistenzschicht auf, die eine Abstraktionsebene oberhalb des Datenbank-Management-Systems (DBMS) bildet. Die Persistenzschicht stellt Objekte für den Datenzugriff (DAOs) bereit, durch welche eine Synchronisierung der Daten innerhalb der eigentlichen Anwendung mit dem vom DBMS verwalteten Datenbestand realisiert wird. Durch die Bereitstellung der Persistenzschicht, die über wohldefinierte Schnittstellen den Datenzugriff steuert, erfolgt eine Abstrahierung des eigentlichen Datenmodells. Für die Verwaltung der Daten lassen sich daher prinzipiell verschiedene Datenbank-Management-Systeme einsetzen.

6.2 Zentrale Komponenten der Clientseite

Das Clientsystem muss dem Benutzer alle notwendigen Funktionen eines konventionellen Navigationssystems bereitstellen. Innerhalb dieser Diskussion erfolgt jedoch eine Konzentration auf Komponenten, die für die Realisierung des Verfahrens zur multimodalen Annotation benötigt werden. Das zugehörige Schichtenmodell ist in Abbildung 6.2 auf der folgenden Seite dargestellt.

Für die Funktionen zur Eingabe der Annotationen, Benutzerpräferenzen sowie für die Steuerung des Datenabgleichs mit dem Server muss das Clientsystem eine geeignete Benutzungsschnittstelle zur Verfügung stellen, welche die jeweiligen besonderen Anforderungen der in dieser Arbeit betrachteten Benutzergruppen an die Informationszugänglichkeit und Bedienbarkeit erfüllt. Eine prototypische Umsetzung der Benutzungsschnittstelle erfolgte im Rahmen der Entwicklung der Evaluationsumgebung, eine detaillierte Beschreibung ist in Abschnitt 6.4 zu finden.

Unterhalb der Präsentationsschicht werden Komponenten für die Fachlogik bereitgestellt. Diese umfassen die Aktualisierung von Geo- und Annotationsdaten, wobei eine Aktualisierung unter Berücksichtigung des Benutzer- bzw. Gruppenprofils erfolgen muss. Eine weitere Komponente ist für die Übermittlung der Annotationsdaten an den Server zuständig. Die Datenübermittlung sollte durch den Benutzer autorisiert werden, da die Aufnahme impliziter Annotationen durch Analyse der LOM-Modalität des Benutzers erfolgt und somit für diesen nicht transparent ist. Weiterhin muss eine Komponente für die multikriterielle Routenberechnung bereitgestellt werden, welche die Berechnung von Routen auf Basis der Benutzerpräferenzen und vom Server bereitgestellten multikriteriellen Gewichte erlaubt.

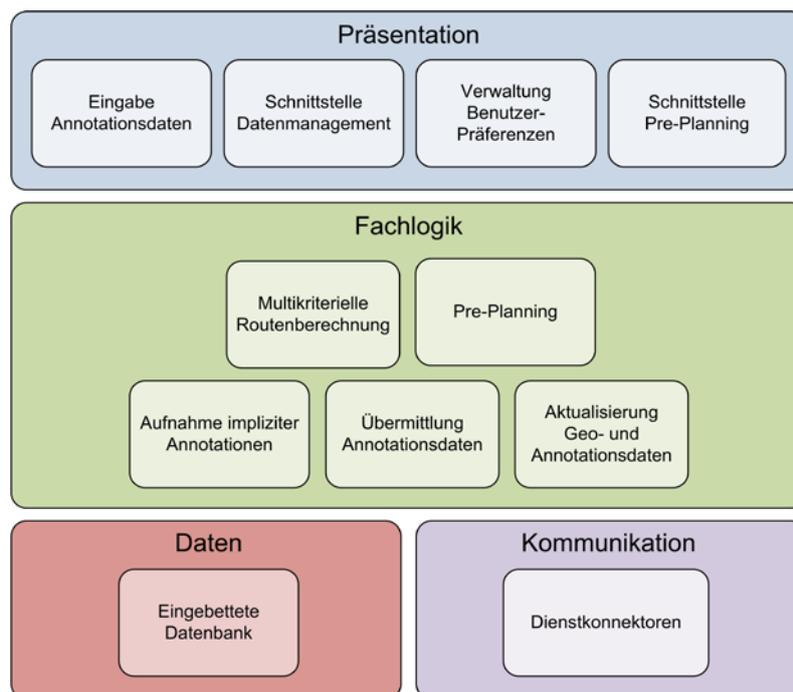


Abbildung 6.2: Schichtenmodell des Clientsystems

Prototypische Implementierungen von Navigationssystemen für blinde Benutzer wie etwa das MOBIC-System oder aber kommerzielle Produkte wie Trekker ermöglichen dem Benutzer über sogenannte Pre-Planning-Systeme die Planung und Erkundung einer Route vor Reiseantritt. Obwohl eine derartige Komponente außerhalb des Schwerpunkts dieser Arbeit liegt, ist sie dennoch ein wichtiger Bestandteil eines gesamtheitlichen Systemkonzeptes. Gerade blinde und sehbehinderte Menschen sowie Senioren profitieren sehr stark von der Möglichkeit, sich im Voraus mit einer für sie unbekanntem Route vertraut zu machen. Eine derartige Komponente muss jedoch zusätzliche Funktionalitäten zur Auswahl von Annotationen bereitstellen, so dass beispielsweise ein blinder Benutzer für ihn geeignete Orientierungsmerkmale selbständig auswählen kann.

Als Grundlage für die Kommunikation muss eine Komponente zur Verfügung stehen, die als Kommunikationsendpunkt für die Integration der vom Server bereitgestellten Dienste verwendet werden kann. Für die Verwaltung lokaler Daten wird zudem eine Datenbank benötigt, wobei für mobile Geräte wie Smartphones oder PDA eingebettete Datenbanken Anwendung finden.

6.3 Datenschutzrechtliche Aspekte

Bei einer Umsetzung des in diesem Kapitel vorgestellten konzeptionellen Systementwurfs müssen datenschutzrechtliche Aspekte sowie Aspekte der Datensicherheit Berücksichtigung

finden. Ein Grundkonzept von Annotationsdiensten besteht in der Akquisition von Daten, die durch die Benutzer bereitgestellt werden und mit der jeweils zugehörigen Benutzergruppe des Benutzers verknüpft sind. Um aber beispielsweise weitergehende Aussagen über die gelieferten Daten wie etwa deren potentielle Vertrauenswürdigkeit ableiten zu können, ist eine Verknüpfung mit einem Benutzerprofil vorteilhaft. In diesem Fall lassen sich Annotationsdaten zudem wesentlich feiner den jeweiligen Anforderungen anderer Benutzer zuordnen. Obwohl beim derzeitigen Systementwurf lediglich eine Verknüpfung mit dem Gruppenprofil des Benutzers vorgesehen ist, erfolgt an dieser Stelle eine kurze Diskussion der datenschutzrechtlichen Problemstellung für den Fall einer Verknüpfung der Annotationsdaten mit Benutzerprofilen.

Nach dem Grundsatz der Datensparsamkeit und Datenvermeidung dürfen lediglich diejenigen personenbezogenen Daten gesammelt werden, die für die Erbringung eines Dienstes unbedingt notwendig sind. Die Verarbeitung jeglicher personenbezogener Daten setzt somit eine direkte Erforderlichkeit voraus. Die Begriffe Datensparsamkeit und Datenvermeidung sind in Deutschland als Ziel der Gestaltung und Auswahl von Datenverarbeitungssystemen in §3 des Bundesdatenschutzgesetzes (BDSG)²⁹ festgeschrieben.

Die Problemstellung in Bezug auf das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren ergibt sich aus der Anforderung, dass von Benutzern gelieferte Annotationen mit einem Benutzerprofil verknüpft werden müssen, um eine höhere Dienstgüte zu realisieren. Die Verknüpfung personenbezogener Daten muss unter dem Gesichtspunkt der Datensparsamkeit und Datenvermeidung erfolgen. Zugleich müssen die personenbezogenen Daten derart verarbeitet werden, dass die personenbezogenen Daten nicht für die Ableitung dienstfremder Ergebnisse wie beispielsweise der Erstellung von Bewegungsprofilen oder zu Werbezwecken missbräuchlich verwendet werden können. Ein Schutz vor missbräuchlicher Verwendung der personenbezogenen Daten muss durch geeignete Maßnahmen innerhalb der Systemarchitektur und der Infrastruktur für die Datenbereitstellung gewährleistet werden.

Eine geeignete Maßnahme bilden Verfahren zur Pseudonymisierung personenbezogener Daten. Nach (Pfitzmann & Köhntopp, 2000) können Pseudonyme nach ihrem jeweiligen Grad der Anonymität klassifiziert werden. Den geringsten Grad ermöglicht dabei die Verwendung sogenannter Personenpseudonyme, welche lediglich die Substitution des realen Namens des Benutzers durch eine frei wählbare eindeutige Repräsentation erlauben. Den höchsten Grad der Anonymität erlauben dagegen sogenannte Transaktionspseudonyme, welche lediglich für die Dauer einer Transaktion gültig sind und von Transaktion zu Transaktion unterschiedlich sind. Obwohl das Transaktionspseudonym den höchsten Grad an Anonymität bietet, ist es für einen Annotationsdienst nicht anwendbar, da eine längerfristige Verknüpfung der Daten mit einem Benutzerprofil notwendig ist. Daher muss für die Pseudonymisierung der Benutzerprofile ein Personenpseudonym angewendet werden.

²⁹ Aktuelle Fassung des BDSG: http://bundesrecht.juris.de/bdsg_1990/

Personenpseudonyme erlauben eine relativ einfache Auflösung des Pseudonyms und damit die Wiederherstellung des realen Namens des Benutzers. Es sind daher geeignete technische Maßnahmen zu ergreifen, die eine Auflösung des Pseudonyms verhindern. Entsprechende Sicherheitsvorkehrungen können dabei die folgenden Maßnahmen umfassen:

- Physikalisch getrennte Speicherung der pseudonymisierten Daten sowie der zur Auflösung des Pseudonyms notwendigen Daten,
- Implementierung von internen Dienstschnittstellen, die lediglich den Zugriff auf einen der beiden Datensätze erlauben und
- Sicherstellung von Zugriffsrestriktionen, so dass kein Prozessbeteiligter Berechtigungen für den Zugriff auf beide Datensätze zugewiesen bekommt.

Die genannten Maßnahmen stellen lediglich grundlegende Ansätze dar, wobei ein tragfähiges Datenschutzkonzept eine detailliertere Erarbeitung der Anforderungen als auch durchzuführenden Maßnahmen bedingt. Ein derartiges Datenschutzkonzept muss für den Aufbau eines Annotationsdienstes erarbeitet und umgesetzt werden, wobei eine Auditierung / Zertifizierung angestrebt werden sollte, welche etwa vom Unabhängigen Landeszentrum für Datenschutz Schleswig-Holstein³⁰ angeboten werden.

6.4 Prototypische Implementierung zur Simulation

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Teile der Systemarchitektur für Simulationszwecke implementiert, wobei jedoch für die Realisierung der Simulation eine teilweise Verschiebung einzelner Komponenten von der Client- auf die Serverseite erfolgte. Die Simulationsumgebung erlaubt dabei die Evaluierung von Algorithmen für die personalisierte multikriterielle Routenberechnung und dient als Grundlage für Benutzersimulationen, welche jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht worden sind.

Für die Simulationsumgebung wurden Stadtplandaten vom Dresdner Vermessungsamt beschafft, die den Bereich des Campus der Technischen Universität sowie die direkte Umgebung des Hauptbahnhofs umfassen. Da geographische Daten von den Vermessungsämtern in Sachsen im Bezugssystem RD83 georeferenziert werden, erfolgte eine Umwandlung der Koordinaten in das Bezugssystem WGS84, welches für die GPS-basierte Positionierung verwendet wird. Unter Verwendung der GIS-Software Esri ArcGIS, welche die Bearbeitung georeferenzierter Daten erlaubt, wurde ein Navigationsgraph manuell über die Straßenkarte gelegt, so dass unter Verwendung von Skripten der georeferenzierte Graph in eine relationale Datenstruktur überführt werden konnte. Abbildung 6.3 zeigt die Visualisierung der Straßenkarte mit aufgebrachtem Navigationsgraphen innerhalb der ArcGIS-Anwendung.

³⁰ Unabhängiges Landeszentrum für Datenschutz SH: <https://www.datenschutzzentrum.de/index.htm>



Abbildung 6.3: Georeferenzierte Straßenkarte mit überlagerndem Navigationsgraphen

Der so gewonnene Navigationsgraph für das Universitätsgelände und den Bereich um den Hauptbahnhof dient als Datenbasis für die Simulationsumgebung. Die konkrete Systemarchitektur der Simulationsumgebung ist in der folgenden Abbildung 6.4 dargestellt. Für die Datenverwaltung wird eine relationale Datenbank eingesetzt, wobei für die konkrete Implementierung ein MySQL-Datenbankserver verwendet wurde. Innerhalb des Datenbankschemas werden alle von der Simulationsumgebung benötigten Daten wie etwa Gruppenprofile, Benutzerprofile, geographischen Daten und Annotationsdaten verwaltet. Der Zugriff auf die Daten erfolgt unter Einsatz des für Java-Umgebungen entwickelten ORM-Frameworks (object/relational mapping) Hibernate in der Version 3.2.5. Hibernate erlaubt die Abbildung von objektbasierten Datenmodellen auf relationale, SQL-basierte Modelle bzw. Schemata. Dabei erfolgt eine klare Trennung zwischen der Spezifikation der Abbildung zwischen Objekt- und relationalem Modell sowie der eigentlichen Fachlogik.

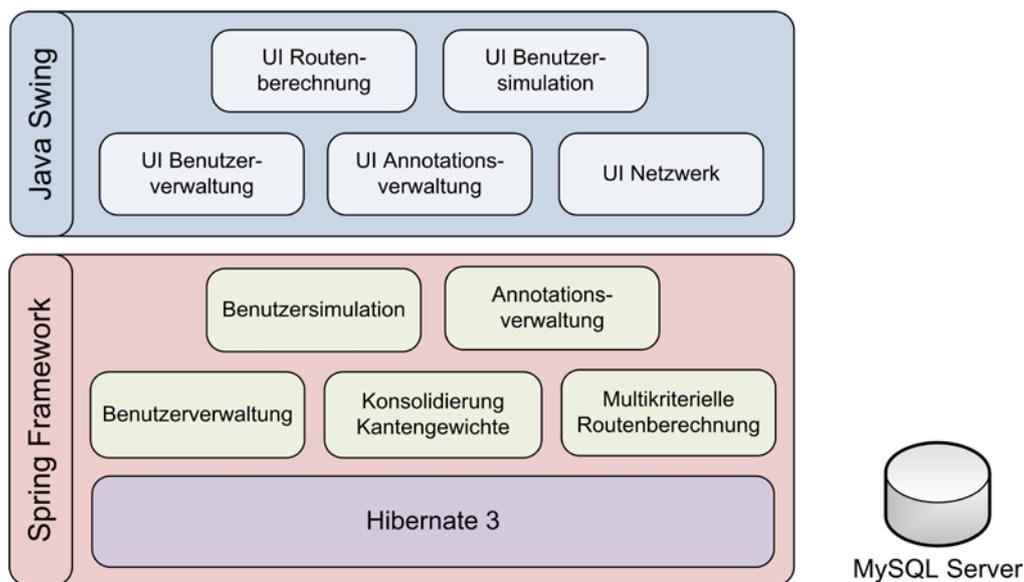


Abbildung 6.4: Architektur der Simulationsanwendung

Sämtliche Komponenten der Fachlogik sowie das Hibernate Framework werden durch den sogenannten IoC-Container des Spring Frameworks³¹ verwaltet und miteinander verbunden. Spring ist ein Java/J2EE-Framework, welches mittels der Bereitstellung formalisierter Methoden die Verknüpfung von einzelnen Java-Komponenten zu vollständigen Applikationen erlaubt. Dabei werden die Prinzipien ‚Inversion of Control‘ bzw. ‚Dependency Injection‘³² direkt umgesetzt, so dass die Entwicklung von Applikationen über eine lose Verknüpfung unabhängiger Komponenten ermöglicht wird. Durch das Spring Framework wird der Austausch einzelner Komponenten durch neue Implementierungen erheblich erleichtert, solange die jeweiligen Schnittstellen beibehalten werden. Die Implementierung der Benutzungsschnittstelle basiert auf der API Java Swing. Für die Implementierung der Anzeige des Navigationsgraphen sowie der Editierfunktionalität für die Annotationen wurde das Apache Batik SVG Toolkit³³ verwendet, welches eine API für die Verarbeitung und Darstellung von SVG-Dokumenten bereitstellt. Das in Abbildung 6.5 dargestellte Bildschirmfoto zeigt die MDI-Benutzungsschnittstelle der Simulationsumgebung mit einer Auswahl der wichtigsten Fenster.

³¹ Spring Framework: <http://www.springframework.org>

³² Weiterführende Informationen zu den Konzepten Inversion of Control (IoC) und Dependency Injection sind u.a. auf der Webseite von Martin Fowler zu finden, der beide Begrifflichkeiten erstmals zusammen verwendete: <http://martinfowler.com/articles/injection.html>

³³ Apache Batik Software: <http://xmlgraphics.apache.org/batik/>

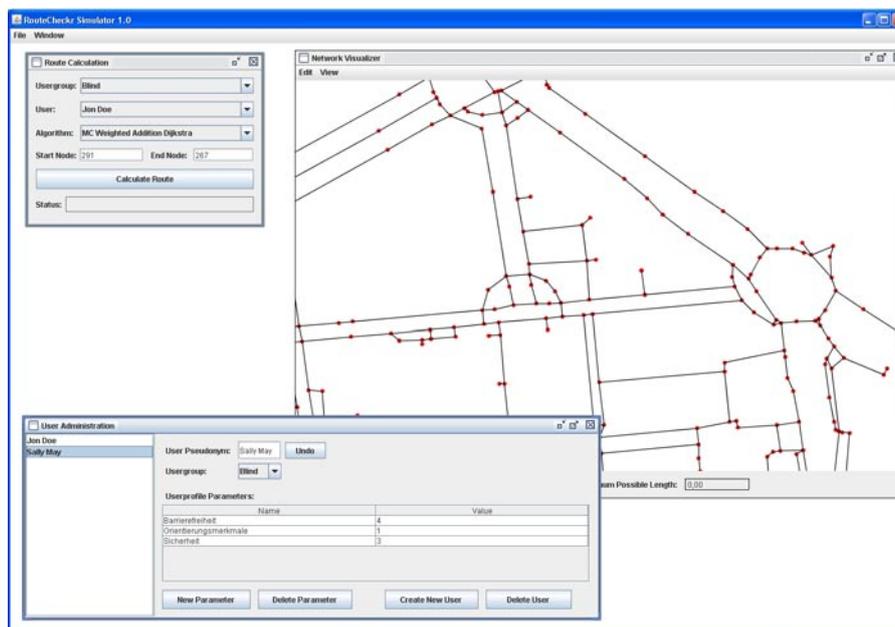


Abbildung 6.5: Bildschirmfoto der Simulationsumgebung

Innerhalb der Simulationsumgebung werden die folgenden Komponenten bereitgestellt:

- *Benutzersimulation*: Die Simulation bietet Schnittstellen für die Implementierung von Benutzersimulationen. Im Rahmen einer angrenzenden Arbeit³⁴ wurde eine erste Implementierung einer solchen Komponente vorgenommen, welche die Simulation des Annotationsverhaltens von Benutzern ermöglicht. Dabei können den Benutzern Profile zugeordnet werden, die als Grundlage für das Annotationsverhalten während des Ablaufens einer vorher festgelegten Route dienen. Dabei können unter anderem Parameter wie Stimmung, Fortbewegungsgeschwindigkeit oder aber auch Erfahrung im Umgang mit einem Navigationsgerät beeinflusst werden.
- *Annotationsverwaltung*: Die Komponente Annotationsverwaltung erlaubt das manuelle Editieren von Annotationen über die Schnittstelle zum Rendern des Navigationsgraphen. Es können dabei Knoten und Kanten ausgewählt werden, deren Annotationen modifiziert bzw. für die neue Annotationen angelegt werden können. Zusätzlich wird ein Dialog bereitgestellt, der es ermöglicht, alle Kanten oder Knoten mit einer Annotation zu versehen. So können für den gesamten Navigationsgraphen Standardannotationen eingefügt werden, so dass eine Initialisierung für bestimmte Annotationen wie beispielsweise der Sicherheitsbewertung durchgeführt werden kann.
- *Benutzerverwaltung*: Die Komponente zur Benutzerverwaltung ermöglicht das Anlegen sowie die Modifikation von Benutzerprofilen, welche die Grundlage für die personalisierte Routenberechnung bilden. Jedes Benutzerprofil besteht aus einer Menge

³⁴ Jens Voegler: Simulation von Annotationsprozessen und -verwertungen für die multimodale Annotation geographischer Daten, Diplomarbeit am Institut für Angewandte Informatik, Technische Universität Dresden, 2008

von Parametern, wobei der Wert jedes Parameters frei definiert werden kann. Damit die Parameter von multikriteriellen Algorithmen verwendet werden können, müssen bestimmte Namenskonventionen eingehalten werden, so dass die Parameter den Algorithmen innerhalb des Simulationssystems bereitgestellt werden können.

- *Konsolidierung der Kantengewichte*: Diese Komponente konsolidiert die Annotationswerte zu Teilgewichten, so dass diese multikriteriellen Algorithmen bereitgestellt werden können. Die Komponente kann daher als Teil der Komponente für die Berechnung multikriterieller Routen gesehen werden, wurde jedoch als allein stehende Komponente definiert, um eine leichte Austauschbarkeit der Implementierung und damit eine einfache Simulation verschiedener Konsolidierungsstrategien zu ermöglichen (siehe Abschnitt 5.4).
- *Multikriterielle Routenberechnung*: Die Komponente der multikriteriellen Routenberechnung ermöglicht die Evaluation von multikriteriellen Routingalgorithmen. Bisher wurde der Dijkstra-Algorithmus in der in Abschnitt 5.2 vorgestellten multikriteriellen Erweiterung implementiert und getestet. Für die Berechnung der Route lassen sich Start- und Endknoten, der Benutzer und damit das Benutzerprofil sowie der zu verwendende Algorithmus wählen. Das Ergebnis wird innerhalb des Fensters zur Darstellung des Navigationsgraphen durch Einfärbung der berechneten Route visualisiert.

Die Simulationsumgebung selbst ist modular gestaltet, so dass die Integration weiterer Komponenten mit geringem Aufwand realisierbar ist. Insbesondere für den Bereich der Benutzersimulation sowie der Evaluation von Routingalgorithmen bietet die Plattform ein gutes Grundgerüst, so dass weiterführende Arbeiten auf der entwickelten Software aufsetzen können.

6.5 Performance-Analyse und Skalierbarkeit

In diesem Abschnitt erfolgt eine Performance-Analyse des in Kapitel 5 vorgestellten multikriteriellen Routingalgorithmus sowie eine Betrachtung der Skalierbarkeit der in Abschnitt 6.1 beschriebenen serverseitigen Komponenten.

Für die Analyse des Routing-Algorithmus wurde das ebenfalls für die Evaluation eingesetzte Smartphone Xda Trion verwendet. Es verfügt über eine Samsung-CPU mit einer Taktrate von 400 MHz sowie 64 MB DDR SDRAM und wird mit dem Betriebssystem Windows Mobile 6 betrieben. Die Algorithmen wurden unter Verwendung des Microsoft .NET Compact Frameworks in der Version 3.5 implementiert. Für die Messung der Performance wurde ein Netzwerk in einer Größe generiert, dass bei der Routenberechnung

die Exploration anliegender Knoten nicht durch die Größe des Netzwerks eingeschränkt wurde. Die nachfolgende Abbildung 6.6 zeigt die Struktur der generierten Netzwerke.

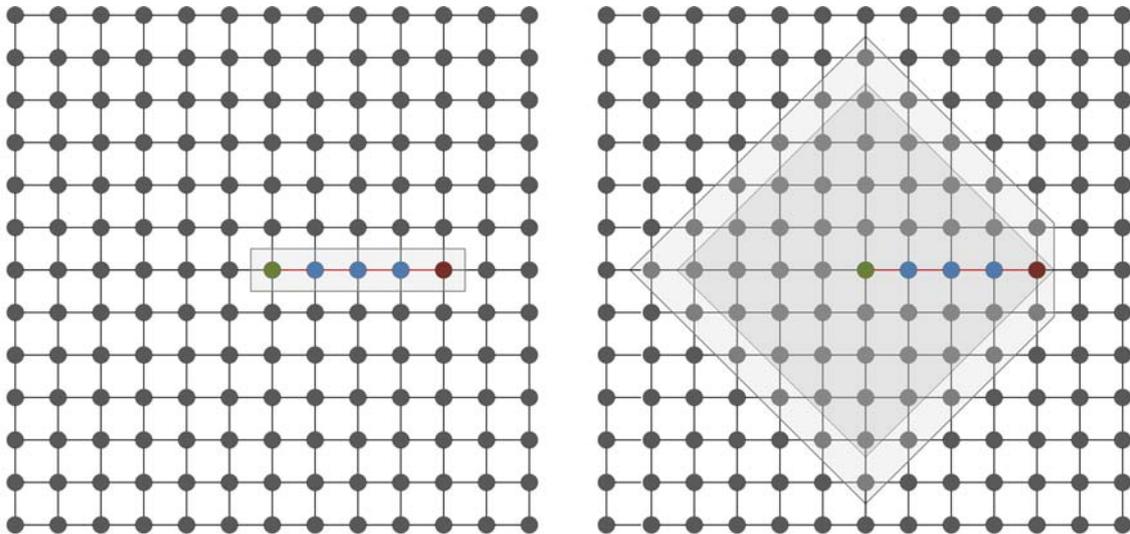


Abbildung 6.6: Struktur des generierten Netzwerks

Das verwendete Netzwerk bildet die Blockstruktur vieler Städte bzw. Stadtteile wie etwa Manhattan nach. Gleichzeitig werden durch die gewählte Struktur reale Szenarien abgebildet, da je Knoten im Mittel nicht mehr als vier Verzweigungen innerhalb von Navigationsgraphen bestehen sollten. Um für die Performance-Analyse ein Szenario zu erreichen, welches einen laufzeitmäßig möglichst schlechten Fall abbildet, wurden alle Kantengewichte gleich gewählt. Bei der Durchführung der Performance-Analyse wurde als Startknoten jeweils der direkt in der Mitte des Netzwerks liegende Knoten gewählt. Der Endknoten ergab sich durch einen entsprechend der jeweiligen Vorgabe entfernt liegenden Knoten. Ein solcher Weg ist im linken Teil der Abbildung für eine Weglänge von 4 Knoten exemplarisch hervorgehoben. Durch das beschriebene Vorgehen werden durch den Algorithmus aufgrund der gleichen Kantengewichte alle Knoten exploriert, welche sich in einem Abstand von bis zu vier Knoten vom Ausgangspunkt befinden. Dieser Zusammenhang ist durch den inneren der beiden hervorgehobenen Bereiche im rechten Teil der Abbildung visualisiert. Diese Knoten können innerhalb des Algorithmus weiter exploriert werden, wobei die im äußeren Bereich befindlichen Knoten je nach Verlauf des Algorithmus in die Prioritätenliste aufgenommen werden können. Eine weitere Exploration dieser Knoten erfolgt jedoch nicht, da die zugehörigen Kosten diejenigen zum Zielknoten übersteigen.

Die Performance-Analyse wurde jeweils für eine Implementierung des ursprünglichen Dijkstra-Algorithmus sowie für die in dieser Arbeit vorgestellte multikriterielle Variante durchgeführt. Beim ursprünglichen Dijkstra-Algorithmus wird lediglich ein Vergleich der Distanz durchgeführt, bei der multikriteriellen Variante müssen dagegen zusätzlich Normalisierungsschritte sowie Berechnungen der multikriteriellen Kosten erfolgen. Für die Analyse wurden Testläufe für Weglängen zwischen vier und zwanzig Knoten jeweils in Zweier-

schritten durchgeführt. Eine Strecke von zwanzig Knoten (entsprechend Verzweigungen) weist dabei innerhalb von Innenstädten üblicherweise zwischen drei und fünf Kilometer Länge auf. Die Anzahl der dabei innerhalb der Algorithmen erreichten Knoten sowie die Anzahl der jeweils notwendigen Iterationen ist in der folgenden Abbildung 6.7 dargestellt. Die dargestellten Werte gelten dabei sowohl für die ursprüngliche als auch für multikriterielle Variante des Dijkstra-Algorithmus.

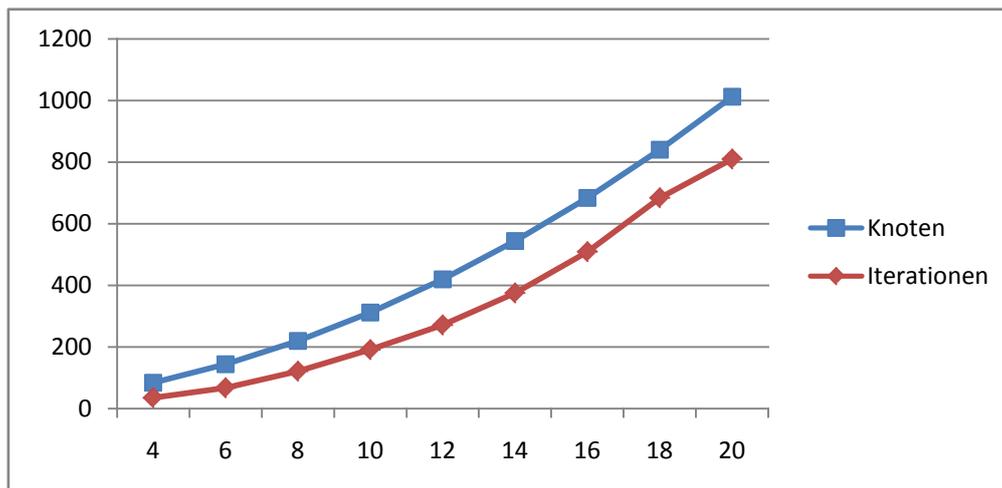


Abbildung 6.7: Anzahl der Knoten und Iterationen in Abhängigkeit von der Länge des Weges

Die Anzahl der Iterationen liegt jeweils leicht unterhalb der Anzahl der erreichten Knoten, da in jeder Iteration die ausgehenden Kanten des kostengünstigsten Knotens exploriert werden. Ist der kostengünstigste Knoten jedoch der Endknoten, so terminiert der Algorithmus, ohne für die noch in der Prioritätenliste befindlichen Knoten eine Iteration durchgeführt zu haben. Aus der Abbildung wird deutlich, dass zwischen der Länge der Route und der benötigten Anzahl der Iterationen ein nichtlinearer Zusammenhang besteht. Dieses Ergebnis ist aufgrund der in Abschnitt 5.2 für den Algorithmus bestimmten Zeitkomplexität erwartungskonform.

Für die Messung der Laufzeit der Algorithmen wurden für jede Weglänge zehn Durchläufe durchgeführt und anschließend der Mittelwert für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse der Messungen sind für den Dijkstra-Algorithmus sowie dessen multikriterielle Variante (MK-Dijkstra) in der folgenden Abbildung 6.8 dargestellt. Die Laufzeit für die Berechnung eines zwanzig Abschnitte langen Weges liegt auf dem verwendeten Endgerät bei etwa neun Sekunden. Der Wert kann als akzeptabel angesehen werden, da eine durch zwanzig Knoten modellierte Strecke etwa drei bis fünf Kilometer lang ist. Innerhalb des hier verwendeten Szenarios wird für die Berechnung der Wege die theoretisch mögliche Anzahl an Knoten durch die Algorithmen exploriert, so dass die gemessenen Laufzeiten nahe dem Maximalwert liegen. Für reale Szenarien kann jedoch von einer Verbesserung der Laufzeit ausgegangen werden, da viele Wegabschnitte aufgrund ihrer ungünstigen Bewertungen erst

in einer deutlich späteren Iteration exploriert werden sollten. In der Folge sinkt somit auch die Gesamtzahl der notwendigen Iterationen. Ein Zeitaufwand von bis zu zwanzig Sekunden erscheint zudem für die Fußgängernavigation akzeptabel, soweit das System dem Benutzer geeignete Rückmeldungen über den Berechnungsfortschritt bereitstellt. Systeme für die Fahrzeugnavigation benötigen je nach Länge der Route einen ähnlichen Zeitaufwand für die initiale Berechnung, so dass die genannten Werte für Benutzer erwartungskonform sind.

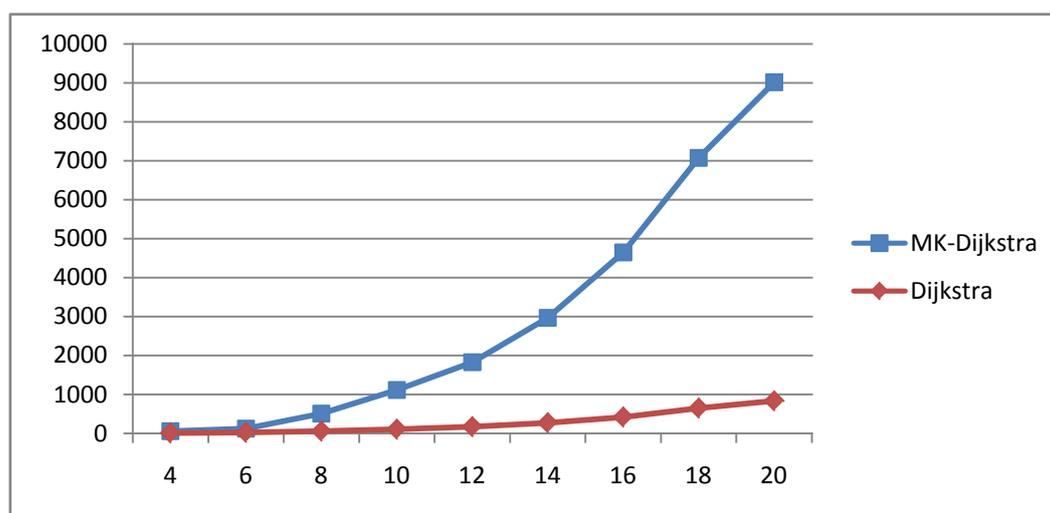


Abbildung 6.8: Laufzeit der Algorithmen in Abhängigkeit von der Weglänge

Bei der in Abschnitt 6.1 beschriebenen Client-Server-Architektur muss die Skalierungsproblematik in wesentlichen Teilen auf der Serverseite behandelt werden. Probleme können immer dann auftreten, wenn sehr viele Clientsysteme vom Server bereitgestellte Dienste in Anspruch nehmen, so dass es zu einer nicht tolerierbaren Latenz bei der Bearbeitung der Anfragen kommt. Bei der Verwendung einer Service-Orientierten Infrastruktur (SOI) können hierbei allgemein sogenannte Scale-Up-Ansätze, also die Erweiterung der bereitgestellten Serverleistung, oder aber sogenannte Scale-Out-Ansätze, entsprechend die Verteilung der Last innerhalb eines Clusters, für die Lösung derartiger Probleme angewendet werden. Bei der Skalierung müssen die in Abschnitt 6.1 beschriebenen Dienste sowie deren Umsetzung betrachtet werden. Eine grundsätzliche Architektur für die Realisierung einer Lastverteilung und die Gewährleistung der Datenkonsistenz ist in der folgenden Abbildung 6.9 dargestellt.

Nach der Übernahme von Annotationsdaten müssen diese zentral auf einem Serversystem abgelegt und mit den bereits bestehenden Daten konsolidiert werden. Die Übernahme der Daten stellt in Bezug auf die Skalierbarkeit ein weniger kritisches Problem dar, da hier klassische Strategien zur Lastverteilung angewendet werden können. Die eingehenden Daten müssen jedoch nach der Übernahme zentral verwaltet werden, um die Konsistenz des Datenbestandes zu wahren.

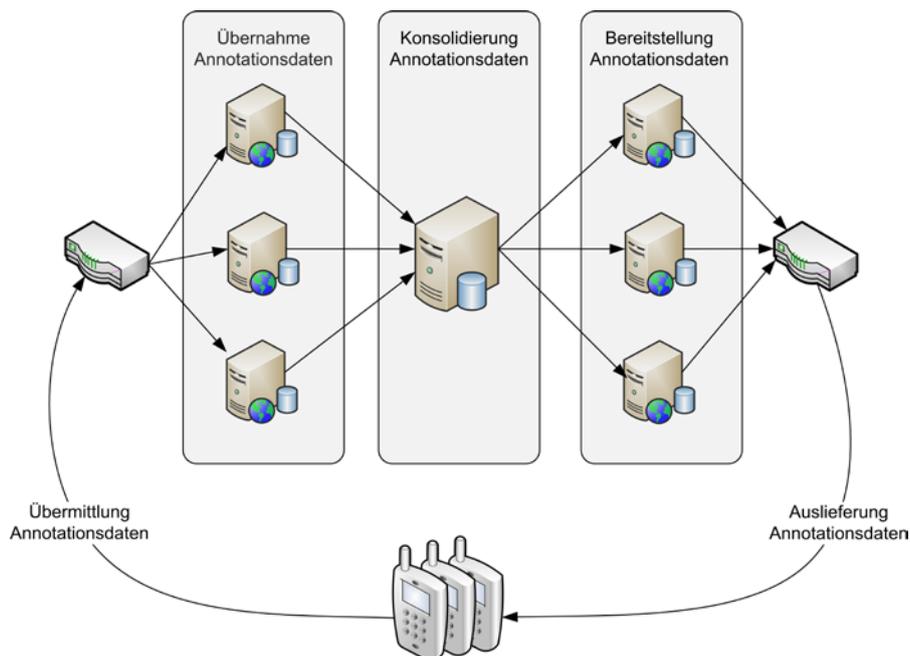


Abbildung 6.9: Architektur für Lastverteilung und Datenkonsistenz

Bei der Bereitstellung von Annotationsdaten sollten möglichst aktuelle Daten vorgehalten werden. Die fortwährend von den Benutzern akquiriert Annotationsdaten müssen mit den bereits bestehenden konsolidiert werden. Ein Ansatz besteht in der Konsolidierung der Annotationsdaten zum Zeitpunkt einer Anfrage durch einen Benutzer, um die jeweils aktuellsten Daten ausliefern zu können. Der Rechenaufwand kann durch die Verwendung von Caching effizient gestaltet werden, falls eine neue Berechnung nur dann erfolgt, wenn neue Annotationsdaten konsolidiert werden müssen. Dieser Ansatz ermöglicht jedoch keine konsistente Replikation der Daten auf mehrere Server, um eine Lastverteilung bei einem hohen Aufkommen an Anfragen zu begegnen. Eine Strategie besteht in der Aufteilung der Konsolidierung und Bereitstellung auf verschiedene Serversysteme. Die übernommenen Daten werden auf einem separaten System direkt nach Empfang mit den bereits bestehenden Daten konsolidiert, wobei durch die zentrale Zusammenführung die Konsistenz der Daten garantiert werden kann. In regelmäßigen Abständen werden die Ergebnisse dann an die für die Bereitstellung der Daten verantwortlichen Systeme übertragen, so dass wiederum klassische Verfahren der Lastverteilung Anwendung finden können.

Die Bereitstellung von Kartendaten ermöglicht Benutzern von Navigationssystemen die Aktualisierung des eigenen Kartenbestands. Da die Kartendaten von den Annotationsdaten getrennt verwaltet werden, können bei starken Anfrageaufkommen ebenfalls Replikationen der Daten auf mehrere Server erfolgen. Zudem unterliegen Kartendaten deutlich weniger Änderungen als Annotationsdaten, da sie nicht aufgrund benutzergetriebener Eingaben angepasst werden müssen. Die Bereitstellung personalisierter Routen erfordert je nach Anfrageaufkommen einen hohen Rechenaufwand. Auch für diesen Dienst sind möglichst aktuelle

Annotationsdaten erforderlich. Eine Replikation dieses Dienstes kann ebenfalls genau dann erfolgen, wenn ebenso wie für die anderen Dienste in regelmäßigen Abständen aktuelle konsolidierte Annotationsdaten aus dem zentralen Datenbestand übernommen werden.

6.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine konzeptionelle Systemarchitektur für die Realisierung eines Annotationsdienstes vorgestellt und diskutiert. Innerhalb einer klassischen Client-Server-Architektur wurden die notwendigen Komponenten der Serverseite und der Clientseite behandelt. Es erfolgte zudem eine Betrachtung von Problemstellungen bezüglich der Skalierung der beschriebenen Dienste. Die Architektur wurde im weiteren Verlauf kurz hinsichtlich datenschutzrechtlicher Aspekte untersucht.

Innerhalb der Arbeit wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, welche für die Evaluation von multikriteriellen Routing-Algorithmen sowie für die Benutzersimulation verwendet werden kann. Die Simulationsumgebung ist komponentenbasiert und lässt sich aufgrund ihrer Architektur leicht erweitern, so dass eine Grundlage für weiterführende Arbeiten besteht. Abschließend erfolgte eine Analyse der Performance des in Kapitel 5 vorgestellten multikriteriellen Routing-Algorithmus auf einem handelsüblichen mobilen Endgerät.

Die Laufzeitmessung des in dieser Arbeit beschriebenen multikriteriellen Algorithmus ist für Fußgängeranwendungen akzeptabel, bei denen übliche Wegstrecken von etwa fünf Kilometer Länge nicht überschritten werden. Die dargestellten Werte beziehen sich zudem auf ein Szenario, welches einen sehr schlechten Verlauf der Algorithmen hinsichtlich der Anzahl der explorierten Knoten erlaubt, so dass für reale Szenarien ein signifikanter Laufzeitgewinn angenommen werden kann.

7 Evaluation

In diesem Kapitel wird die durchgeführte Evaluation von Annotationsprozessen beschrieben, die unter Einbezug von Benutzern aus den Gruppen der blinden und sehbehinderten Fußgänger, Rollstuhlfahrer und Senioren stattfand. Grundlage der Evaluation bildet dabei ein speziell entwickeltes Navigationssystem, welches um zusätzlich Funktionen zur Annotation geographischer Daten erweitert wurde (siehe dazu Abschnitt 7.2). Die Ziele der innerhalb des Kontexts dieser Arbeit durchgeführten Evaluation sind nachfolgend zusammengefasst:

1. die Ableitung von allgemeinen Aussagen über das Annotationsverhalten von Benutzern der genannten Benutzergruppen sowie die Überprüfung der Hypothese, dass Benutzer vorwiegend für sich selbst annotieren und Annotationen vorwiegend negative Eigenschaften einer Route abbilden,
2. der Nachweis, dass innerhalb der definierten Benutzergruppen ein homogenes Annotationsverhalten besteht,
3. die Überprüfung der Hypothese, dass zwischen den Annotationen der gebildeten Benutzergruppen und der Gruppe der nicht-mobilitätseingeschränkten Benutzer ein signifikanter Unterschied besteht,
4. der Nachweis, dass die entwickelten Benutzungsschnittstellen für die Aufnahme expliziter Annotationen geeignet sind.

Zu Beginn dieses Kapitels werden theoretische Grundlagen vorgestellt, aus denen sich die in dieser Arbeit angewandte Evaluationsmethodik ableitet. Darauf folgend wird das für die Evaluation entwickelte System vorgestellt. Der Beschreibung des Versuchsaufbaus sowie der Versuchsdurchführung folgt abschließend die Darstellung und die Analyse der gewonnenen Daten.

7.1 Wizard-of-Oz-Evaluation ortsbasierter Dienste

Klassische Evaluationstechniken lassen sich primär in zwei Kategorien einteilen: auf theoretischen Modellen basierende Techniken, die für die Ableitung von Vorhersagen verwendet werden können, sowie Evaluationstechniken, die auf Daten aus Experimenten unter Einbezug von Benutzern basieren. Beispiele für Evaluationstechniken der ersten Kategorie sind unter anderem GOMS – Goals, Operators, Methods, and Selection Rules (Card, Morgan & Newell, 1983) und verwandte Modelle wie etwa CCT – Cognitive Complexity

Theory (Kieras & Polson, 1999) sowie theoretische Modelle wie beispielsweise ICS – Interacting Cognitive Subsystems (Barnard, 1987) oder die Methode des Cognitive Walkthrough (Lewis et al., 1990). Bei diesen Methoden wird weder eine Systemimplementierung vorausgesetzt noch erfordern diese den Einbezug von Benutzern. Theoretische Modelle und Techniken erlauben die Evaluation von Systemen bzw. deren Benutzungsschnittstelle in einem frühen Entwicklungsstadium mit einem im Vergleich zur experimentbasierten Evaluation geringeren Aufwand. Diese Verfahren basieren auf theoretischen Modellen, wobei jeweils bestimmte Hypothesen zugrunde gelegt werden. In vielen Fällen werden zu evaluierende Interaktionen jedoch nicht durch das theoretische Modell abgebildet, so dass keine präzisen und verlässlichen Aussagen aus der Evaluation abgeleitet werden können.

Experimentelle Evaluationstechniken basieren auf Daten aus Versuchen mit Benutzern, die bestimmte Aufgaben unter Verwendung physischer Objekte wie beispielsweise papierbasierten Szenarien, Mock-Ups, Systemprototypen oder Wizard-of-Oz-Systemen ausführen. Gerade die Wizard-of-Oz-Methodik, welche erstmals in (Gould, Conti & Hovanyecz, 1983) beschrieben wird, erlaubt bei komplexen Systemen eine Evaluation in frühen Phasen der Entwicklung. Sehr aufwendig zu implementierende Komponenten eines Systems werden dabei durch einen oder mehrere sogenannte menschliche „Wizards“ simuliert. Im Gegensatz zu anderen Evaluationsmethodiken muss dabei keine Reduktion des zu testenden Systems bzw. eine Einschränkung auf wesentliche Komponenten vorgenommen werden. Die generelle Struktur von Wizard-of-Oz-basierten Versuchsaufbauten mit einem Versuchsleiter ist in der folgenden Abbildung 7.1 dargestellt.

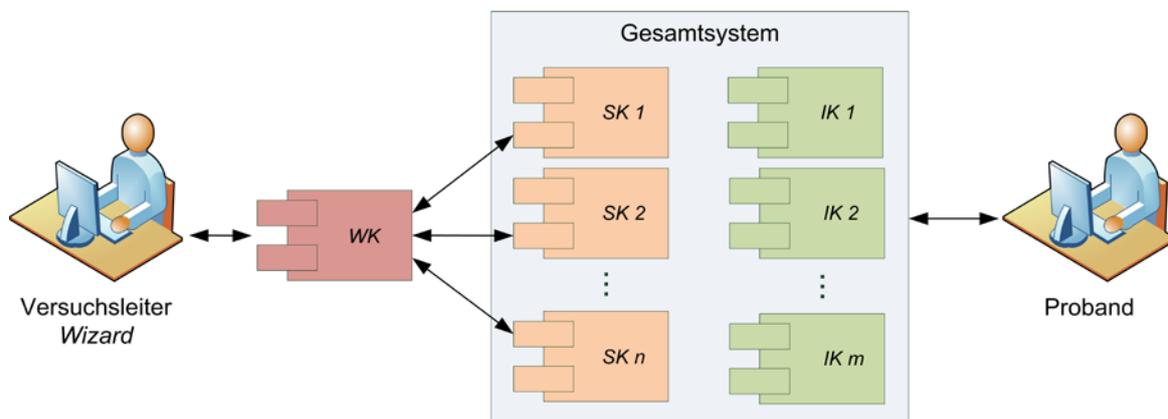


Abbildung 7.1: Generelle Struktur von Wizard-of-Oz-Versuchsaufbauten

Das zu evaluierende Gesamtsystem besteht aus bereits vollständig implementierten Komponenten (*IK 1* bis *IK m*) sowie aus nicht oder nur unvollständig implementierten Komponenten (*SK 1* bis *SK n*), die durch einen oder mehrere Versuchsleiter („Wizards“) simuliert werden. Die Versuchsleiter erhalten dabei Unterstützung durch speziell für die Simulation implementierte Komponenten (*WK*), die nicht Teil des zu entwickelnden Gesamtsystems sind. Diese Komponenten stellen den Versuchsleitern meist eine Benutzungsschnittstelle

bereit, um passende Ausgaben für die Eingaben des Benutzers zu generieren. Der Proband interagiert während des gesamten Versuchs mit einem für ihn vollständig wirkenden System und sollte vor und während des Versuchs keine Kenntnis über die Simulation erlangen, da sich die Kommunikation von Menschen mit Computern von der mit anderen Menschen unterscheidet (Amalberti, Carbonell & Falzon, 1993). Menschen tendieren im Vergleich zur zwischenmenschlichen Kommunikation bei der Kommunikation mit Computersystemen dazu, Vereinfachungen vorzunehmen und zu akzeptieren. Evaluationen können daher auf einfachen Ein- und Ausgaben basieren, ohne dass Benutzer daraus direkt die Unvollständigkeit des Systems ableiten.

Besonders häufig werden bei der Evaluation von Systemen Komponenten simuliert, welche die Logik für die Verarbeitung der Benutzereingaben sowie die Generierung der Ausgaben implementieren. So wurden Wizard-of-Oz-Versuchsaufbauten oftmals für die Evaluation sprachbasierter Dialogsysteme verwendet (Fraser & Gilbert, 1991). Die Methodik wurde ebenfalls für die Evaluation von anderen Systemklassen wie etwa multimodalen Systemen (Salber & Coutaz, 1993) und (Maulsby, Greenberg & Mander, 1993) oder Groupware-Systemen (White & Lutters, 2003) angewendet.

Einen weiteren Anwendungsbereich bilden mobile und ortsbasierte Dienste, für die diese Evaluationstechnik ebenfalls adaptiert wurde. So wird in (Reilly et al., 2005) die Evaluation eines mobilen Dienstes für eine gruppenbasierte Navigation mittels eines Wizard-of-Oz-Verfahrens beschrieben. Dabei wird die Lokalisierung der Probanden durch Versuchsleiter simuliert, indem Positionsnachrichten mittels einer Bluetooth-Verbindung an das Endgerät des Probanden übermittelt werden. Obwohl auf diese Weise die Genauigkeit der Lokalisierung im Vergleich zu GPS-basierten Lösungen deutlich verbessert werden konnte, stellte sich die verwendete Kommunikationstechnik als unzureichend heraus, da die Bluetooth-Verbindung bei zu großen Entfernungen zwischen Versuchsleiter und Proband abbrach. Dieser Fall trat mehrmals auf, zum Beispiel dann, wenn Probanden versuchten, eine auf rot umschaltende Ampel durch Laufen noch zu überqueren. Die beschriebenen Probleme führten zudem dazu, dass die zugehörigen Datensätze für die Auswertung nicht verwendet werden konnten.

Eine weitere Anwendung wird in (Bernhaupt et al., 2007) beschrieben, wo ein ähnlicher Versuchsaufbau verwendet wurde. Dabei wurde das Spiel „Capture the Flag“ auf Tablet-PCs implementiert. Die Lokalisierung wurde durch Versuchsleiter simuliert, wobei als Kommunikationsinfrastruktur das Wireless-LAN des als Spielfläche dienenden Universitätscampus diente. Im Gegensatz zur Bluetooth-basierten Kommunikation berichten die Autoren nicht von durch die Kommunikationstechnik verursachten Problemen. (Liu et al., 2006) beschreiben in ihrer Arbeit den Aufbau für die Evaluation eines Navigationssystems für den Innenbereich. Der Aufbau unterscheidet sich von den beiden vorher beschriebenen dahingehend, dass ein Versuchsleiter Lokalisierungsinformationen an einen weiteren Ver-

suchsleiter übermittelt, der seinerseits aufgrund der Lokalisierung die entsprechenden Ereignisse auf dem Navigationssystem des Probanden auslöst. Wie im vorigen Fall wurde auch bei dieser Evaluation für die Kommunikation ein Wireless-LAN verwendet. Allen angeführten Beispielen ist gemein, dass bei der Adaptierung von Wizard-Of-Oz-Konzepten für die Evaluation mobiler Dienste der verwendeten Kommunikationstechnik eine kritische Rolle zukommt. Die Verwendung einer verlässlichen Kommunikationstechnik wurde entsprechend bei der im folgenden Abschnitt beschriebenen Entwicklung des Evaluationsprototypen berücksichtigt.

7.2 Prototyp

In diesem Abschnitt erfolgt die Beschreibung des Prototyps, welcher für die Evaluation des Verfahrens der multimodalen Annotation entwickelt wurde. Im ersten Teil des Abschnitts wird der für die Benutzergruppen der Senioren, Rollstuhlfahrer und Sehbehinderten entwickelte Systemteil beschrieben, gefolgt von der Beschreibung der für die Gruppe der blinden Benutzer entwickelten Komponenten. Für die letztgenannte Gruppe wurden dabei die wesentlichen Konzepte aus den Systemteilen der übrigen Benutzergruppen übernommen, es erfolgt jedoch aufgrund der spezifischen Anforderungen eine Anpassung der Benutzungsschnittstelle. Der für die Evaluation entwickelte Prototyp ist prinzipiell dem Aufbau eines Navigationssystems nachempfunden, wobei jedoch keine klassische kartenbasierte Darstellung implementiert wurde. Die Navigationsanweisungen werden stattdessen bild- und textbasiert sowie mittels Audioausgabe bereitgestellt. Der Prototyp wurde auf Basis des Microsoft .NET Compact Frameworks in der Version 3.5 implementiert und auf einem Xda Smartphone mit dem Betriebssystem Windows Mobile 6 ausgeführt.

Das Prinzip der realisierten Zielführung basiert auf einer kontinuierlichen Ausgabe von Navigationsanweisungen jeweils an Positionen, an denen eine Entscheidung hinsichtlich der Fortführung der Route von den Benutzern getroffen werden muss. Die Navigationsanweisungen werden für die Benutzergruppen der Senioren und Rollstuhlfahrer anhand perspektivisch korrekter Fotos zusammen mit einer Audio- und einer optionalen Textausgabe dargestellt. Die Fotos wurden dabei mit Pfeilsymbole angereichert, um den Benutzern die Entscheidung über die fortzuführende Route zu erleichtern. Die Dialoge zur Zielführung ermöglichen den Probanden zudem das Senden einer Nachricht, um Hilfe durch den Versuchsleiter anzufordern. Der Prototyp verfügt zusätzlich zu den Dialogen für die Zielführung um weitere Dialoge, welche die Benutzer für die Eingabe von Annotationen verwenden können und welche je nach Benutzergruppe drei Kriterien für die Bewertung eines Wegabschnitts sowie eine Liste von Orientierungsmerkmalen zur Auswahl bieten. Die folgende Abbildung 7.2 zeigt je ein Beispiel für die verwendeten bild- und textbasierten Navigationsanweisungen in der oberen Reihe. In der unteren Reihe sind von links nach rechts

das Menü zur Auswahl der Annotationen, der Dialog für die Bewertung des Kriteriums Sicherheit und der Dialog für die Auswahl von Umgebungsmerkmalen dargestellt.



Abbildung 7.2: Dialoge des Prototyps für Senioren und Rollstuhlfahrer

Von den Dialogen für die Zielführung gelangt der Benutzer jeweils zum Annotationsmenü, welches die Auswahl der Dialoge zum Bewerten der verschiedenen Kriterien bzw. zur Eingabe der Orientierungsmerkmale erlaubt. Unabhängig vom durch den Benutzer herbeigeführten Systemzustand kann das System durch externe Ereignisse in den Annotationsdialog sowie in den bildbasierten Dialog zur Zielführung gelangen. Die für den Prototyp verwendete Dialogstruktur ist in Abbildung 7.3 graphisch dargestellt. Die externen Ereignisse werden vom Versuchsleiter über ein eigenes Endgerät ausgelöst und simulieren die Systemkomponente zur Lokalisierung des Probanden und damit das Erreichen der jeweiligen Posi-

tionen P_N bzw. P_A . Die Komponente für die Lokalisierung wurde simuliert, da die Genauigkeit der Lokalisierung für die Fußgängernavigation mobilitätseingeschränkter Benutzer eine kritische Größe darstellt und der geforderte enge Toleranzbereich mit den verfügbaren Standardsensoren sowie einem vertretbaren Entwicklungsaufwand nicht realisierbar ist. Wird durch den Versuchsleiter eine Position P_A an das System des Benutzers übermittelt, wird dieser durch Vibrieren und Audioausgabe zur Annotation aufgefordert. Bei Übermittlung einer Position P_N wird der Benutzer durch Vibration und Audioausgabe auf die neue Navigationsanweisung aufmerksam gemacht.

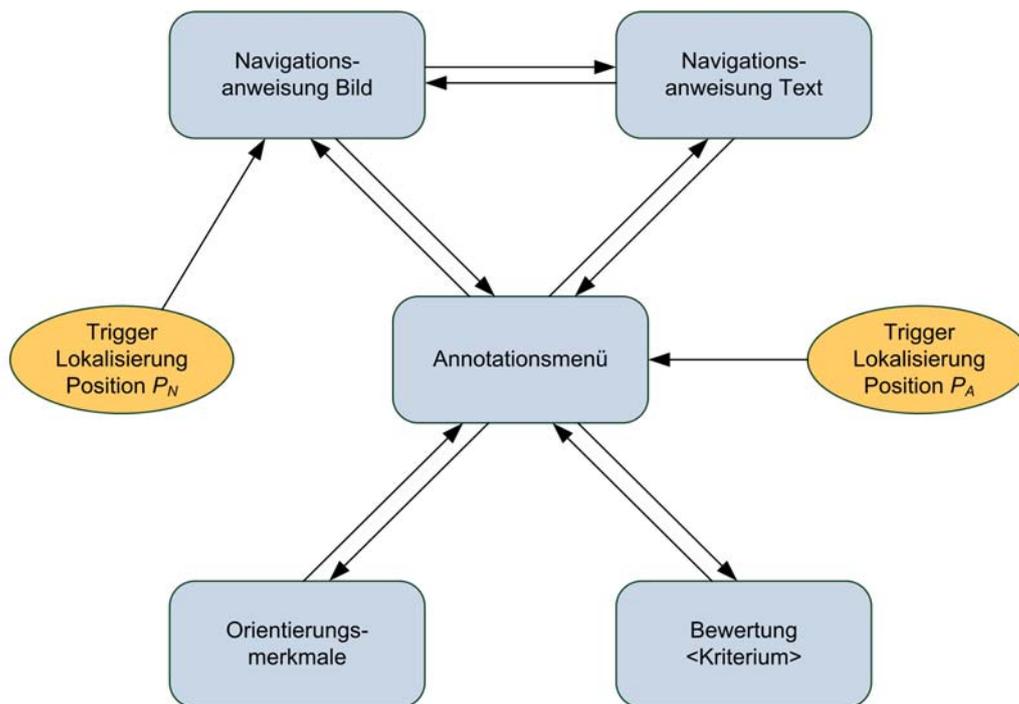


Abbildung 7.3: Dialogstruktur des Prototyps

Unterhalb der Präsentationsschicht befinden sich die Komponenten der Fachlogik, welche sich jedoch auf die Verarbeitung der Benutzereingaben sowie die Verarbeitung der Ereignisse beschränken, die durch die extern durchgeführte Lokalisierung des Benutzers ausgelöst werden. Für die Aufzeichnung der Bedienung sowie der Annotationen der Probanden kann das Versuchssystem über einen initialen Dialog konfiguriert werden, welcher die Eingabe einer Benutzerkennung, der Benutzergruppe sowie die Festlegung der Teststrecke erlaubt. Der Konfigurationsdialog ist für den Probanden vor und während der Versuchsdurchführung nicht sichtbar und wird lediglich vor Beginn des Versuchs vom Versuchsleiter bedient, so dass der Eindruck eines voll funktionsfähigen konventionellen Navigationssystems erhalten bleibt. Abbildung 7.4 zeigt die Komponenten des Versuchssystems.

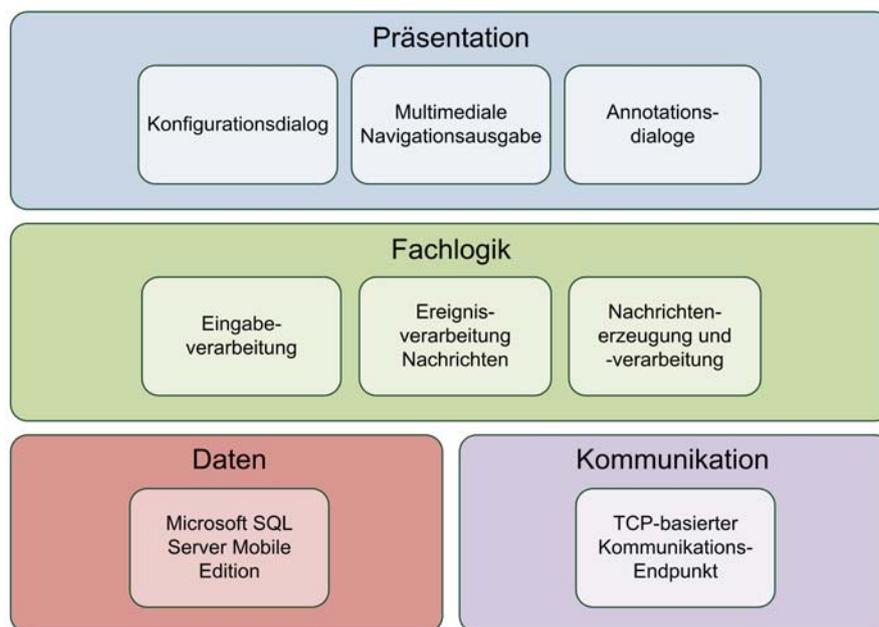


Abbildung 7.4: Komponenten des Versuchssystems

Alle Eingaben sowie die Dialogwechsel des Benutzers werden in einer mobilen Datenbank zusammen mit der Benutzererkennung und einem Zeitstempel gespeichert. Als Datenbank wurde der Server der Edition Microsoft SQL Mobile³⁵ verwendet, welcher den Betrieb einer relationalen Datenbank unter dem Betriebssystem Windows Mobile ermöglicht. Zusätzlich verfügt der Prototyp über eine Komponente zur Verarbeitung der vom Versuchsleiter übermittelten Nachrichten. Nach Auswertung der Nachrichten werden die zugehörigen Ereignisse an die Komponenten der Fachlogik weitergegeben. Die Kommunikationskomponente wird zudem für die Übermittlung von Nachrichten an das System des Versuchsleiters verwendet, so dass dieser zu jedem Zeitpunkt über den Zustand des Prototyps beziehungsweise über den aktuell vom Benutzer verwendeten Dialog informiert ist.

Für die Benutzergruppe der blinden und sehbehinderten Benutzer wurde eine spezielle Benutzungsschnittstelle entwickelt. Das verwendete Smartphone verfügt über einen berührungsempfindlichen Bildschirm als Eingabeschnittstelle. Die vorhandenen Tasten auf der Vorderseite des Geräts sind aufgrund einer globalen Funktionsvorbelegung für die Realisierung der Eingabetechnik ungeeignet, so dass die in (Sánchez & Maureira, 2006) beschriebene gestenbasierte Interaktionstechnik adaptiert wurde. Das verwendete Smartphone verfügt am Rand des berührungsempfindlichen Bildschirms über eine taktil wahrnehmbare Kante, die als Leitlinie für die Eingabe der Gesten dient. Die Gesten bestehen dabei prinzipiell aus dem Abfahren einer oder mehrerer Kanten beziehungsweise dem Abfahren der jeweiligen Ecken des Bildschirms. Die folgende Abbildung 7.5 verdeutlicht das Prinzip der angewendeten gestenbasierten Eingabetechnik.

³⁵ Microsoft SQL Server Mobile Edition: <http://msdn.microsoft.com/de-de/sqlserver/aa336364.aspx>

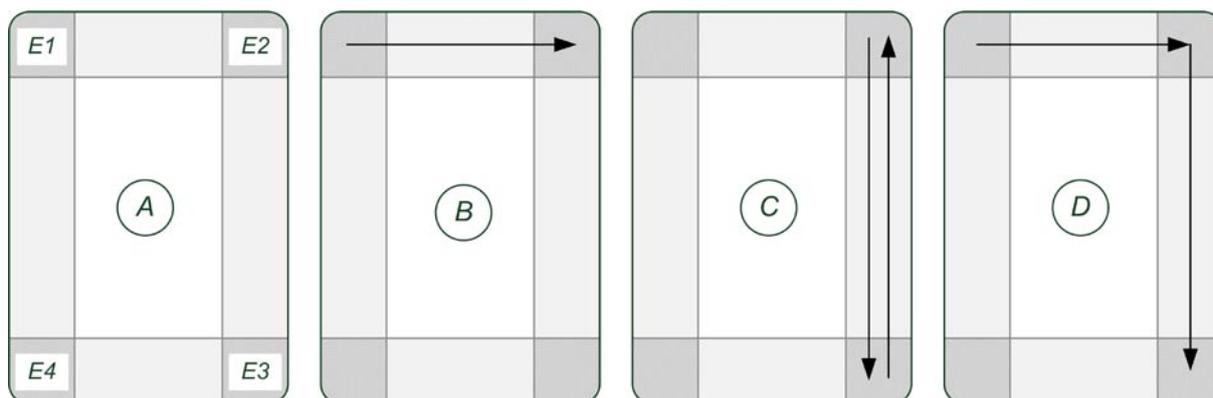


Abbildung 7.5: Konzept der gestenbasierten Eingabe

Abbildungsteil A zeigt schematisch den Bildschirm des Smartphones sowie die Randbereiche, welche für die Gesten mit dem Finger abgefahren werden müssen. Der Benutzer kann sich jeweils an den Kanten des Bildschirms orientieren. Die Gesten werden durch die Reihenfolge der Ecken definiert, die der Benutzer nacheinander durch das Bewegen des Fingers auf dem Bildschirm erreicht. Der Bereich der Ecken, der dabei vom Finger des Benutzers berührt werden muss, ist in der obigen Abbildung dunkelgrau abgesetzt.

Abbildungsteil B zeigt ein Beispiel für eine einfache Geste, welche entlang der oberen Kante des Bildschirms von links nach rechts führt und dabei durch die Eckenreihenfolge ($E1, E2$) definiert ist. Gesten dieses Typs lassen sich durch zwei benachbarte Ecken definieren. Abbildungsteil C zeigt eine Geste welche durch Abfahren der rechten Kante und nachfolgendes entgegengesetztes Abfahren derselben Kante definiert ist ($E2, E3, E2$). Der zugehörige Gestentyp ist wiederum durch zwei benachbarte Ecken definiert, wobei jedoch die Ecke für den Start der Geste gleichzeitig die Ecke für deren Beendigung ist. Abbildungsteil D zeigt schließlich ein Beispiel für den Gestentyp, bei dem zwei Kanten nacheinander abgefahren werden und welcher somit durch drei verschiedene Ecken definiert ist, für diesen Fall die Folge ($E1, E2, E3$). Prinzipiell lassen sich unter Anwendung der vorgestellten Methoden eine Vielzahl Gesten definieren. Für eine intuitive Eingabe wurde die Interaktionstechnik auf die in Abbildung 7.5 dargestellten Gestentypen beschränkt. Dabei wurden jeweils keine Unterscheidungen der beiden kurzen bzw. der beiden langen Kanten vorgenommen, so dass die Gesten beliebig auf den Kanten durchgeführt werden können. Bei den Gestentypen der Abbildungsteile C und D ist kann zudem die Startecke vom Benutzer frei gewählt werden.

Die Dialogstruktur für die blinden und sehbehinderten Benutzer wurde unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen dieser Benutzergruppen entworfen. Die Ausgabe erfolgt akustisch und beginnt nach einem initiierten Vibrationsalarm. Navigationsanweisungen und Dialogereignisse werden unter Verwendung einer Sprachausgabe für den Benutzer zugänglich gemacht. Die Ausgabe wurde dabei durch vorbereitete Sprachdateien anstelle einer Sprachsynthese realisiert. Dies hat keine einschränkende Wirkung auf das

Dialog für die Auswahl von Orientierungsmerkmalen. Innerhalb dieser Dialoge erfolgt die Navigation ebenfalls über die Richtungsgesten an den langen Kanten. Für die Auswahl und das Speichern einer Annotation muss die Richtungsgeste an der kurzen Kante nach Aufforderung wiederholt werden. Bei der Bewertung von Kriterien gelangt der Benutzer nach Eingabe der Annotation wieder in das Hauptmenü, nach dem Speichern eines Orientierungsmerkmals verbleibt der Benutzer im Menü, so dass weitere Orientierungsmerkmale eingegeben werden können. Durch zweimaliges Ausführen der Richtungsgeste nach links gelangt der Benutzer aus den Annotationsmenüs direkt zurück in das Hauptmenü. Die Audioausgabe wurde für alle Dialoge derart implementiert, dass eine weitere Eingabe während der Sprachwiedergabe zu einem Abbruch der Ausgabe führt, so dass keine Überschneidung mit der durch die neue Eingabe hervorgerufenen Ausgabe erfolgt. Den Benutzern wird somit eine effiziente Bedienung der Benutzungsschnittstelle ermöglicht.

Zusätzlich zu den Gesten, welche die direkte Interaktion mit den Dialogen ermöglichen, hat der Benutzer die Möglichkeit, sich über die Eingabe spezieller Gesten die letzte Navigationsanweisung, die letzte Audioausgabe sowie den Namen des aktuellen Dialogs ausgeben zu lassen. Für die Ausgabe der letzten Navigationsanweisung sowie der letzten Audioausgabe wurden die Gestentypen aus Abbildung 7.5 Teil C verwendet, den Namen des aktuellen Menüs erhält der Benutzer durch Eingabe des Gestentyps aus Abbildung 7.5 Teil D. Nachdem in diesem Abschnitt der verwendete Prototyp beschrieben wurde, werden im folgenden Abschnitt der zugehörige Versuchsaufbau sowie die Durchführung der Evaluation dargestellt.

7.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau für die Evaluation des Annotationsverhaltens orientiert sich an den Konzepten der klassischen Wizard-of-Oz-Evaluationsmethodik, welche für die Anwendung auf mobile Szenarien adaptiert wurde. Der konzeptionelle Versuchsaufbau für die durchgeführte Evaluation ist in der folgenden Abbildung 7.7 dargestellt.

Die Probanden wurden mit dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Endgerät ausgerüstet, auf dem die zu evaluierende Navigationsanwendung inklusive der Annotationsfunktionalität installiert wurde. Der Versuchsleiter befand sich während des gesamten Versuchs etwa zwanzig bis dreißig Meter hinter dem jeweiligen Probanden und konnte unter Verwendung eines eigenen mobilen Endgeräts die Ausgabe des Navigationssystems auf dem Endgerät des Probanden steuern. Erreichte ein Proband eine vorher festgelegte Position, wurde durch den Versuchsleiter die zugehörige Navigationsanweisung ausgelöst. Zudem erhielt der Versuchsleiter Informationen über den aktuellen Dialogzustand, welchen das System des Probanden aufwies.

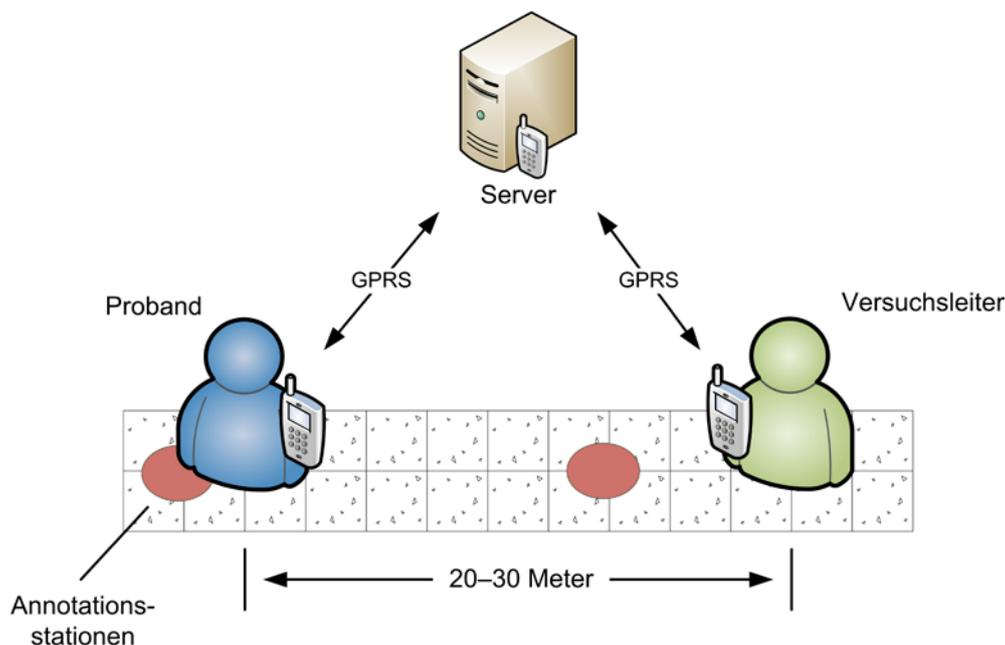


Abbildung 7.7: Versuchsaufbau des Benutzertests

Da die Entfernung zwischen den Endgeräten für eine Bluetooth-Verbindung zu groß ist und je nach Verlauf des Versuchs variieren kann, wurde für die Kommunikation ein GPRS-Kanal verwendet. Da mobile Endgeräte über diesen Kanal jedoch nicht die Rolle eines Servers einnehmen können, wurde ein zentraler Server implementiert, der die Nachrichten zwischen den beiden Endgeräten transparent weiterleitet. Der Versuchsleiter kann dabei Navigationsanweisungen, die Aufforderung zum Annotieren sowie eine Warnung auslösen. Die Versuchsdurchführung wurde durch einen zweiten Versuchsleiter gefilmt, so dass das Verhalten der Probanden sowie die Reaktionen auf die Ereignisse des Navigationsgerätes dokumentiert werden konnten.

Die implementierten Annotationsdialoge ermöglichten den Gruppen der Rollstuhlfahrer und Senioren die Bewertung hinsichtlich der Kriterien Sicherheit, Barrierefreiheit und Aufwand. Probanden der Gruppe Sehgeschädigter konnten Bewertung hinsichtlich der Kriterien Sicherheit, Barrierefreiheit und der Eignung in Bezug auf die Orientierung vornehmen. Alle Benutzergruppen konnten zudem Umgebungsmerkmale aufnehmen. Die Liste der Umgebungsmerkmale enthält einige Merkmale, welche nicht für die Annotation an allen Annotationsstationen geeignet sind, so dass vorsätzliche Falschannotationen zumindest für die Umgebungsmerkmale detektiert werden können.

Für die Evaluation wurden zwei verschiedenen Strecken zwischen einem Start- und einem Zielpunkt auf dem Gelände der Technischen Universität Dresden ausgewählt. Die Strecken unterscheiden sich dabei in der Länge des Weges sowie in der Komplexität der Navigation. Beide Strecken sind in Abbildung 7.8 visualisiert, wobei die Positionen hervorgehoben sind, an denen die Aufforderung zur Annotation durch den Versuchsleiter erfolgte.



Abbildung 7.8: Testrouten für die Evaluation (Quelle Kartendaten: OpenStreetMap-Projekt)

Als Startpunkt für beide Routen wurde eine Bushaltestelle an der Münchner Straße gewählt, der Endpunkt ist durch das Informationsgebäude der Technischen Universität Dresden gegeben. Die Routen verfügen über jeweils fünf festgelegte sogenannte Annotationsstationen, an denen die Probanden aufgefordert werden, eine oder mehrere Annotationen vorzunehmen. Dieses Vorgehen ermöglicht einen späteren Vergleich des Annotationsverhaltens zwischen Probanden einer Benutzergruppe, da für alle Probanden die Orte der Annotationen übereinstimmen. Den Probanden wurde explizit freigestellt, welche Annotationen sie an den Annotationsstationen vornehmen. Dieses Vorgehen ermöglicht die Aufnahme eines natürlicheren Annotationsverhaltens, ein Vergleich zwischen den Benutzergruppen wird jedoch erschwert, da die erhobenen Daten gegebenenfalls nicht ausreichend sind.

Die Route Helmholtz (Länge 830 Meter) ist für die Probanden einfacher zu navigieren, da sie hauptsächlich gerade die Helmholtzstraße entlang führt und weniger Navigationsentscheidungen beinhaltet. Diese Route weist auf dem Abschnitt der Helmholtzstraße eine gut wahrnehmbare Steigung auf. Die Route Campus (Länge 790 Meter) führt quer durch das Universitätsgelände, wobei mehrere ausschließlich für Fußgänger begehbare Wege enthalten sind. Der Bereich um die Annotationsstation 5 dieser Route kann ausschließlich über eine Treppe passiert werden, so dass Rollstuhlfahrer hier einer unüberwindbaren Barriere gegenüberstehen. Das Navigationssystem berechnet nach durchgeführter Annotation daher für diese Benutzergruppe eine neue Route, welche die Rollstuhlfahrer über eine Alternativstrecke auf den letzten Teil der Route Helmholtz führt. Die Länge der Route Campus beträgt für die Gruppe der Rollstuhlfahrer 1230 Meter.

Die Annotationsstationen beider Routen wurden derart gewählt, dass eine Bewertung der jeweiligen Stelle mit mindestens einem Kriterium sowie die Angabe von Umgebungsmerkmalen möglich sind. Die nachfolgende Abbildung 7.9 zeigt die fünf Annotationsstationen der Route Campus. Die Positionen, an welchen den Benutzern die Aufforderungen zur Annotation übermittelt wurden, sind in den jeweiligen Abbildungen durch einen Pfeil markiert.



Abbildung 7.9: Annotationsstationen der Route Campus

Die Stationen der Route Campus sind so gewählt, dass eine Annotation mit mehreren Umgebungsmerkmalen sowie eine Bewertung mit mindestens einem Kriterium für Benutzer aller drei Gruppen möglich sind. Bei Annotationsstation 1 kann als Umgebungsmerkmal beispielsweise der Briefkasten, der lose Bodenbelag oder die Bordsteinkante annotiert werden. Annotationsstation 3 ist unter anderem durch das Kopfsteinpflaster sowie besondere Geräusche durch die Wasseraufbereitungsanlage links im Bild gekennzeichnet. Annotationsstation 4 kann aufgrund des sehr unebenen Bodenbelags von Rollstuhlfahrern bezüglich des Kriteriums Barrierefreiheit bewertet werden. Ebenso ermöglicht die Treppe bei Annotationsstation 5 eine Bewertung hinsichtlich des Aufwands von Benutzern der Gruppe der Senioren. In der folgenden Abbildung 7.10 sind die Annotationsstationen für die Route Helmholtz dargestellt. Ebenso wie die Stationen für die Route Campus wurde auch diese derart gewählt, dass für jede Station Merkmalsannotationen und Bewertungen möglich sind.



Abbildung 7.10: Annotationsstationen der Route Helmholtz

Annotationsstation 2 der Route Helmholtz ist unter anderem durch den nicht vollständig abgesenkten Bordstein sowie Kopfsteinpflaster als Bodenbelag gekennzeichnet. Der Bordstein stellt für Rollstuhlfahrer ein Hindernis dar, so dass eine Bewertung hinsichtlich der Barrierefreiheit möglich ist. Die Annotationsstation ist durch die Steigung des Weges, das Kopfsteinpflaster sowie die Rasenkante an der linken Gehwegseite gekennzeichnet. Bewer-

tet werden kann der Weg an dieser Station von Benutzern der Gruppe der Rollstuhlfahrer und Senioren beispielsweise bezüglich des Aufwands.

Im Vorfeld der Versuchsdurchführung wurde den Probanden ein einseitiger Fragebogen zugesandt, in dem demographische Daten zusammen mit Aussagen über die Erfahrung der Probanden mit Navigationssystemen sowie ihren Vorlieben hinsichtlich der Wegewahl erhoben wurden. Gleichzeitig erfolgte die Zusendung einer kurzen Anleitung für die Bedienung des Navigationsgerätes. Direkt vor Durchführung des eigentlichen Versuches erfolgte eine ausführliche Einweisung der Probanden in die Bedienung des Navigationsgeräts. Diese Einführung nahm durchschnittlich etwa 30 Minuten je Proband in Anspruch. Dabei wurde darauf hingewiesen, dass es sich um ein speziell angepasstes Navigationsgerät mit Zusatzfunktionen für die Aufnahme zusätzlicher geographischer Daten handelt. Den Probanden wurde der Prototyp dabei so präsentiert, als handle es sich um ein vollständiges Navigationssystem, welches lediglich um einige Zusatzfunktionen erweitert wurde. Die Probanden wurden zudem darauf hingewiesen, dass bei nicht lösbaren Problemen der Versuchsleiter um Hilfe gebeten werden könnte. Dieses Angebot richtete sich insbesondere an die blinden Versuchsteilnehmer, da je nach Mobilität das Überqueren von nicht bekannten Straßen ohne speziell ausgestattete Signalanlagen eine potentielle Gefahrenquelle darstellt.

Die beiden Routen wurden nacheinander mit den Probanden abgelaufen, wobei jede Route gleichmäßig jeweils als erstes beziehungsweise als zweites ausgewählt worden ist, so dass ein systematischer Fehler durch Lerneffekte während der Versuchsdurchführung minimiert wurde. Nach Ende des Versuches wurde ein abschließendes strukturiertes Interview durchgeführt, welches ebenso wie die Versuchsdurchführung aufgezeichnet wurde. Innerhalb dieser Interviews wurden die Probanden nach ihrem direkten Eindruck in Bezug auf das Navigationssystem sowie in Bezug auf die zurückgelegten Routen befragt. Ein weiteres Ziel der Befragung lag in der eigenen Einschätzung des Annotationsverhaltens durch die Probanden.

Die Teilnehmer der Evaluation wurden über verschiedene Verbände und E-Mail-Verteiler rekrutiert. Die Probanden erhielten für die Teilnahme keine Entschädigung, unter den teilnehmenden Personen erfolgte jedoch eine Verlosung von fünf Buchgutscheinen. Die Anzahl der Probanden je Benutzergruppe sowie eine Aufstellung des Alters ist in der folgenden Tabelle 7.1 dargestellt.

	Senioren	Rollstuhlfahrer / Gehbehinderte	Sehgeschädigte
Anzahl (m/w)	9 (4 / 5)	6 (2 / 4)	10 (6 / 4)
Alter	68 – 78 (\bar{x} 72,3)	19 – 71 (\bar{x} 41,7)	20 – 31 (\bar{x} 26,7)

Tabelle 7.1: Demographische Daten der Probanden

Aus der Gruppe der Rollstuhlfahrer verwendeten fünf Probanden einen Elektrorollstuhl, während einer der Probanden gehbehindert war. Die Gehbehinderung wirkte für die Fortbewegung beeinträchtigend, jedoch konnte die Probandin die Treppe innerhalb der Route Campus selbständig überwinden. Die Gruppe der Sehgeschädigten enthält sechs blinde sowie vier sehbehinderte Teilnehmer. Alle sehbehinderten Teilnehmer verwendeten einen Blindenlangstock bei der Fortbewegung, verfügten aber über einen Sehrest, welcher zumindest das Erfassen von Umrissen erlaubte. Die verschiedenen Anforderungen der Teilnehmer aus den Gruppen der Rollstuhlfahrer und der Sehgeschädigten wurde bei der im folgenden Abschnitt beschriebenen Auswertung und Analyse berücksichtigt, soweit dies erforderlich war. Soweit nicht anders gekennzeichnet, erfolgt die Auswertung jedoch ohne eigenständige Betrachtung der gehbehinderten Probandin bzw. der sehbehinderten Teilnehmer. Die beiden Strecken waren den Probanden größtenteils unbekannt. Innerhalb der Gruppe der Rollstuhlfahrer war die Route Campus lediglich einem Teilnehmer vollständig und einem teilweise bekannt, die Route Helmholtz war einem Probanden bekannt. Bei den Sehgeschädigten war die Route Campus einem Probanden teilweise bekannt, die Route Helmholtz kannten zwei Teilnehmer vollständig sowie ebenfalls zwei Teilnehmer teilweise. Da die Senioren hauptsächlich aus einer von der TU Dresden speziell durchgeführten Ringvorlesung rekrutiert wurden, kannten vier Probanden die Route Campus teilweise und einer der Probanden vollständig. Die Route Helmholtz war zwei Probanden vollständig und fünf Probanden teilweise bekannt.

7.4 Ergebnisse und Analyse

In diesem Abschnitt erfolgt die Vorstellung und Analyse der Evaluationsergebnisse. Die Analyse orientiert sich dabei strukturell an den in der Einleitung dieses Kapitels beschriebenen Fragestellungen. Grundlage für die Auswertung bilden die durch das Testsystem aufgezeichneten quantitativen Daten sowie die qualitative Auswertung der Befragungen. Die Daten der Evaluation wurden in einer gemeinsamen Datenbank zusammengeführt und anonymisiert ausgewertet. Es erfolgt lediglich eine besondere Berücksichtigung der gehbehinderten Probandin innerhalb der Gruppe der Rollstuhlfahrer sowie der sehbehinderten Teilnehmer innerhalb der Gruppe der Sehgeschädigten, soweit dies aufgrund der aufgenommenen Daten notwendig erschien. Ansonsten erfolgt keine separate Erwähnung dieser Probanden. Zu beachten ist, dass die aufgenommenen Daten keinen direkten statistischen Vergleich zwischen den Gruppen der mobilitäteingeschränkten Benutzer zulassen, so dass lediglich ein Abgleich mit der Kontrollgruppe durchgeführt werden konnte.

7.4.1 Allgemeines Annotationsverhalten der Benutzer

Eine Aufstellung des Annotationsverhaltens ist für die drei Benutzergruppen in der folgenden Tabelle 7.2 enthalten. Die Darstellung zeigt die Häufigkeit der Annotationen der Probanden innerhalb der jeweiligen Benutzergruppe. Die genannten Werte beziehen sich auf die Summe, welche aus den Annotationen beider Routen abgeleitet wurde. Es erfolgt eine Unterteilung in die drei Kategorien *G* (gesamt – alle Annotationen), *B* (Bewertungen nach Kriterien) und *M* (Merkmale). Die Durchschnittswerte sind auf die erste Nachkommastelle gerundet.

	Senioren (n = 9)			Rollstuhlfahrer (n = 6)			Sehgeschädigte (n = 10)		
	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>M</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>M</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>M</i>
# Annotationen	299,0	104,0	195,0	277,0	147,0	130,0	393,0	198,0	195,0
# Annotationen / Proband	33,2	11,6	21,7	46,2	24,5	21,7	39,3	19,8	19,5
# Annotationen (Stationen)	227,0	77,0	150,0	191,0	104,0	87,0	267,0	132,0	135,0
# Annot. (Stat.) / Proband	25,2	8,6	16,7	31,8	17,3	14,5	26,7	13,2	13,5
# freie Annotationen	72,0	27,0	45,0	86,0	43,0	43,0	126,0	66,0	60,0
# freie Annot. / Proband	8,0	3,0	5,0	14,3	7,2	7,2	12,6	6,6	6,0

Tabelle 7.2: Absolute und relative Anzahl der Annotationen über die gesamte Evaluation

Die angeführten Werte erlauben erste Rückschlüsse auf das Annotationsverhalten der Probanden der drei Benutzergruppen. Werden die Annotationszahlen verglichen, so fällt auf, dass die Gruppe der Senioren im Durchschnitt am wenigsten und die Gruppe der Rollstuhlfahrer im Durchschnitt am häufigsten Annotationen vorgenommen haben. Die Anzahl der annotierten Bewertungen und Merkmale variiert jedoch sehr stark zwischen den Teilnehmern der drei Benutzergruppen. So ergeben sich für die Anzahl der Annotationen für die Gruppe der Senioren eine Standardabweichung von 18,28 (Minimum: 11, Maximum: 70), für die der Rollstuhlfahrer von 18,35 (Minimum: 21, Maximum: 64) und für die der Sehgeschädigte von 11,60 (Minimum: 20, Maximum: 53). Die Verteilung der verschiedenen Bewertungen für die drei Benutzergruppen ist auf der folgenden Seite in Abbildung 7.11 dargestellt.

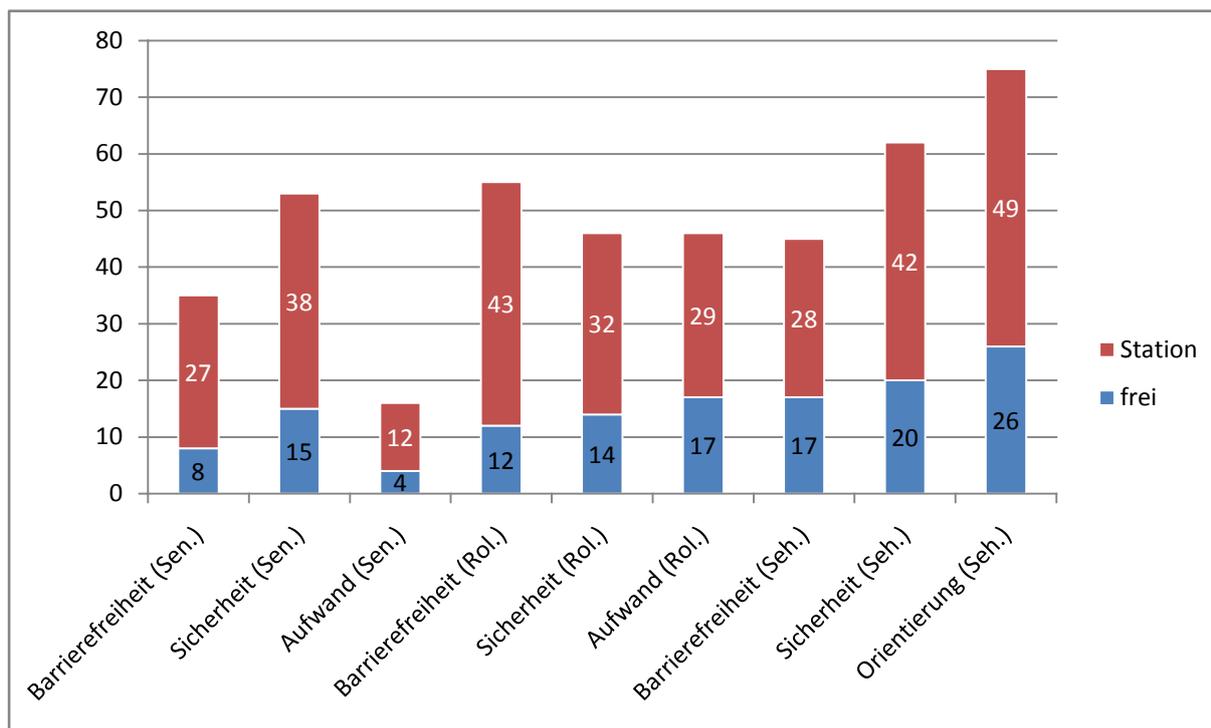


Abbildung 7.11: Verteilung der Bewertungen nach Kriterien und Nutzergruppen

Senioren bewerten die Wegabschnitte am häufigsten hinsichtlich des Kriteriums Sicherheit, gefolgt vom Kriterium Barrierefreiheit. Das Kriterium Aufwand nimmt bei den Bewertungen lediglich eine untergeordnete Rolle ein, obwohl dieses Ergebnis aufgrund der Analyse der Benutzergruppe nicht zu erwarten war. Begründet werden kann dieses Ergebnis durch die Auswahl der teilnehmenden Senioren, welche zwar einen relativ hohen Altersdurchschnitt von 72,3 Jahren aufwiesen, jedoch motorisch nicht in ihrer Mobilität eingeschränkt waren. Das Kriterium Aufwand erscheint für die an der Evaluation beteiligten Senioren somit weniger wichtig für die Bewertung eines Weges, sollte jedoch für die Gruppe der Senioren im Allgemeinen beibehalten werden. Das Verhältnis zwischen freien Bewertungen und Bewertungen an den Annotationsstationen unterscheidet sich bei den Senioren für die drei Kriterien nur geringfügig.

Bei den Rollstuhlfahrern wurde das Kriterium Barrierefreiheit am häufigsten für die Bewertung von Wegabschnitten verwendet, was mit der weiter unten beschriebenen Verteilung der von den Rollstuhlfahrern für die Annotation verwendeten Merkmale konsistent ist. Die Kriterien Sicherheit und Aufwand wurden nahezu gleich häufig verwendet. Dies ist insbesondere deshalb auffällig, da alle Rollstuhlfahrer über einen Elektrorollstuhl verfügten und somit der Aufwand eine untergeordnete Rolle spielen müsste. Die gehbehinderte Probandin nahm dabei keine signifikant vom Durchschnitt abweichende Anzahl von Bewertungen hinsichtlich des Kriteriums Aufwand vor. Beim Verhältnis von freien zu nach Aufforderung durchgeführten Annotationen ist auffällig, dass die Barrierefreiheit im Vergleich deutlich

weniger frei bewertet wurde als die Kriterien Sicherheit und Aufwand. Aufgrund der Verteilung kann geschlussfolgert werden, dass alle drei Kriterien für die Bewertung eines Weges herangezogen werden sollten.

Die Kriterien Barrierefreiheit, Sicherheit und Orientierung wurden von den sehgeschädigten Teilnehmern jeweils häufig für die Bewertung von Wegabschnitten verwendet, wobei jedoch das Kriterium Barrierefreiheit im Vergleich weniger verwendet wurde. Auffällig ist die häufige Verwendung des Kriteriums Orientierung, welches Aufschluss darüber gibt, wie gut sich der Benutzer anhand der vorherrschenden Umwelteigenschaften orientieren kann. Aufgrund der Anforderungsanalyse wurde eine höhere Verwendung des Kriteriums Barrierefreiheit und insbesondere des Kriteriums Sicherheit erwartet. Das Verhältnis zwischen freien und an Stationen vorgenommenen Annotationen ist für alle drei Kriterien nahezu identisch. Ebenso wie bei der Gruppe der Rollstuhlfahrer kann auch für die Gruppe der Sehgeschädigten davon ausgegangen werden, dass ein Weg hinsichtlich der drei vorgegebenen Kriterien zu bewerten ist.

Werden die Annotationen für die Umgebungsmerkmale betrachtet, so fällt eine große Anzahl bei der Gruppe der Rollstuhlfahrer auf. Dies ist auf ein überdurchschnittliches Vorkommen von Barrieren zurückzuführen. Dieses Vorkommen ist durch das Vorhandensein vieler Bordsteine bei den gewählten Routen zu erklären, welche für die Rollstuhlfahrer zu überwinden waren. Einen weiteren Grund stellen die über weite Strecken schlechten Straßenverhältnisse dar. An einigen Stellen mussten Rollstuhlfahrer einen Umweg vornehmen, um eine geeignete Stelle für das Passieren des Bordsteines zu finden. Die Höhe passierbarer Bordsteine war dabei vom jeweiligen Typ des Elektrorollstuhls abhängig.

Die Einschätzung bezüglich des Annotationsverhaltens bei Umgebungsmerkmalen wird durch Analyse der durch die Gruppe der Rollstuhlfahrer annotierten Merkmale unterstützt (siehe dazu auch die folgende Tabelle 7.3 auf Seite 129). So entfielen von den 139 Merkmalsannotationen dieser Benutzergruppe je 28 (20,14 %) auf die Merkmale ‚nicht abgesenkter Bordstein‘ und ‚Kopfsteinpflaster‘, 20 (14,39 %) auf das Merkmal ‚Steigung‘ und 16 (11,51 %) auf das Merkmal ‚Ausfahrt‘. Diese Merkmale entsprechen damit etwa 66 % der annotierten in diesem Bereich. Probanden der Gruppe der Rollstuhlfahrer haben zudem im Verhältnis am meisten frei und somit ohne Aufforderung nach Erreichen einer Annotationsstation annotiert. So erfolgten bei Teilnehmern dieser Gruppe durchschnittlich 31,05 % der annotierten Merkmale ohne vorherige Aufforderung, bei Senioren belief sich der Anteil auf 24,08 % und bei sehgeschädigten Probanden auf 30,76 %. Insgesamt ist der Anteil der freien Annotationen als hoch zu bewerten, da für die Probanden zum Zeitpunkt der Evaluation das Navigationssystem neuartig war und das Konzept der Annotation erstmalig angewendet wurde. Das Verhalten der Probanden zu Annotationen von Umgebungsmerkmalen lässt sich anhand der folgenden Tabelle 7.3 analysieren, welche die am häufigsten annotierten Merkmale für die drei Benutzergruppen zusammenfasst. Bei der durchgeführten Aus-

wertung wurde keine Trennung zwischen der gehbehinderten Probandin und der Gruppe der Rollstuhlfahrer sowie den sehbehinderten und blinden Teilnehmern vorgenommen. Die Gruppe der Senioren hatte insgesamt 14 Merkmale zur Auswahl, die Gruppe der Rollstuhlfahrer 17 und die Gruppe Sehgeschädigter 15.

Senioren (n = 9)		Rollstuhlfahrer (n = 6)		Sehgeschädigte (n = 10)	
Merkmal	Anzahl	Merkmal	Anzahl	Merkmal	Anzahl
Ausfahrt	32 (16,4 %)	nicht abgesenkter Bordstein	28 (20,1 %)	Kopfsteinpflaster	55 (28,2 %)
Kopfsteinpflaster	31 (15,9 %)	Kopfsteinpflaster	28 (20,1 %)	Rasenkante	30 (15,4 %)
Steigung	31 (15,9 %)	Steigung	20 (14,4 %)	Geräusch	19 (9,8 %)
Straßenschild	26 (13,3 %)	Ausfahrt	16 (11,5 %)	loser Bodenbelag	17 (8,7 %)
Treppe	14 (7,2 %)	abgesenkter Bordstein	8 (5,8 %)	Treppe	16 (8,2 %)
Stufen	13 (6,7 %)	loser Bodenbelag	8 (5,8 %)	asphaltierter Bodenbelag	15 (7,7 %)
loser Bodenbelag	10 (5,1 %)	Stufen	8 (5,8 %)	Bordstein	14 (7,2 %)
				Mauer	11 (5,6 %)

Tabelle 7.3: Häufig annotierte Merkmale

Die Verteilung der genannten Orientierungsmerkmale entspricht den Ergebnissen der in Kapitel 3 dargestellten Anforderungsanalyse. So annotierten Senioren vorwiegend Ausfahrten, Kopfsteinpflaster, Steigungen und Straßenschilder als markante Merkmale. Probanden aus der Benutzergruppe der Senioren konzentrierten sich bei der Annotation überwiegend auf Merkmale, die für eine Orientierung herangezogen werden können, wobei innerhalb der Befragungen oftmals angegeben wurde, dass als Orientierungsmerkmal auch Gebäude als Annotation vorhanden sein sollten.

Probanden der Benutzergruppe der Rollstuhlfahrer annotierten vorwiegend Umweltmerkmale, die einen negativen Einfluss auf die strukturelle Zugänglichkeit des Weges aufweisen. So wurden nicht abgesenkte Bordsteine und Kopfsteinpflaster am häufigsten annotiert, gefolgt von Steigungen und Ausfahrten. Mit acht Nennungen folgt mit abgesenkten Bordsteinen erst sehr spät ein für die strukturelle Zugänglichkeit positives Merkmal. Sehgeschädigte Probanden annotierten Kopfsteinpflaster und Rasenkanten am häufigsten, gefolgt von Geräuschen und losen Bodenbelägen, Treppen und asphaltierten Bodenbelägen. Alle diese Merkmale haben gemein, dass sie für die Orientierung taktil oder akustisch wahr-

nehmbar sind. Im Gegensatz zu den Rollstuhlfahrern werden von der Gruppe der Sehgeschädigten somit Merkmale für die Orientierung und weniger in Bezug auf eine strukturelle Zugänglichkeit annotiert.

Die Probanden wurden innerhalb der Befragung nach ihrem Annotationsverhalten befragt, ohne dass ein direkter Einbezug der im ersten Teil dieses Abschnitts diskutierten quantitativen Daten erfolgte. Den Probanden wurde die Frage gestellt, ob sie im täglichen Gebrauch eines solchen Systems primär für sich selbst annotieren oder dabei auch andere Benutzer bedenken würden, so dass Annotationen diese ebenfalls unterstützen könnten. Die Anzahl der Nennungen der Probanden bei dieser Befragung ist in der folgenden Abbildung 7.12 dargestellt.

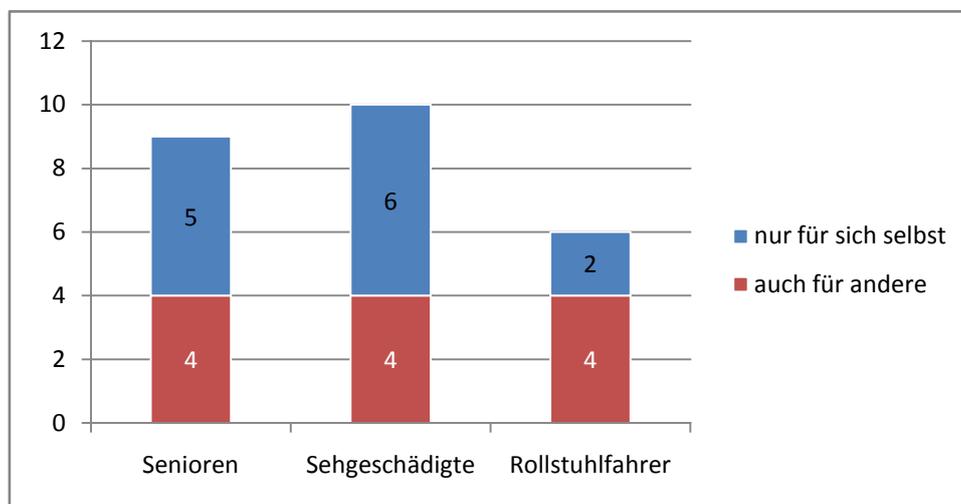


Abbildung 7.12: Annotationsverhalten mit und ohne Einbezug anderer Benutzer

Innerhalb der Gruppe der Senioren ergibt sich ein ausgewogenes Bild, so würden fünf der neun Probanden ausschließlich für sich selbst annotieren, während vier der Teilnehmer angaben, auch die Bedürfnisse anderer Benutzer in den Annotationen zu berücksichtigen. Bei den Sehgeschädigten würde die Mehrzahl (6) ausschließlich für sich selbst Annotationen aufnehmen, während vier der Teilnehmer auch andere Benutzer bedenken würden. Bei der Gruppe der Rollstuhlfahrer würde die Mehrzahl der Probanden (4) auch andere Benutzer bedenken, während lediglich zwei Teilnehmer ausschließlich für sich selbst annotieren würden. Die erhobenen Daten ergeben lediglich für die Gruppe der Sehgeschädigten, dass überwiegend ohne die Berücksichtigung anderer Benutzer des Systems annotiert werden würde. Innerhalb dieser Evaluation sind jedoch keine Aussagen darüber möglich, ob sich das Annotationsverhalten ändert, wenn Benutzer im Vorfeld von den Daten anderer Anwender profitieren und so die Notwendigkeit eigener Annotationen erfahren. Von Interesse ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Fragestellung, ob Benutzer dazu bereit wären, ihnen bereits bekannte Strecken zu annotieren, um so anderen Anwendern einen besseren Zugang zu diesen Gebieten zu ermöglichen.

Eine weitere Fragestellung innerhalb der strukturierten Interviews betraf die Bewertungen der Wegabschnitte nach den bereitgestellten Kriterien. Die Probanden wurden gefragt, ob sie im täglichen Gebrauch eines solchen Systems eher positiv oder negativ annotieren würden. Die Anzahl der Nennungen der Befragung ist in der folgenden Abbildung 7.13 dargestellt.

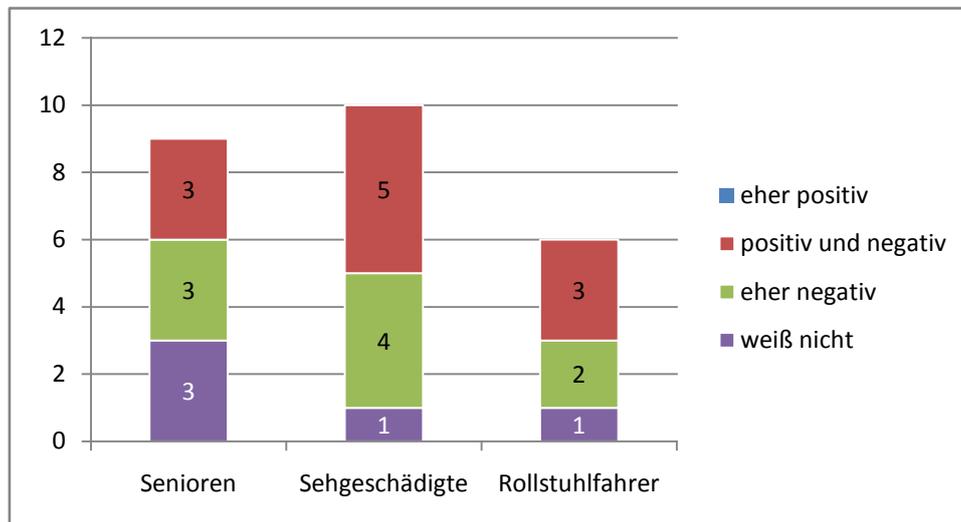


Abbildung 7.13: Präferenzen zu positiven und negativen Bewertungen

Es besteht innerhalb aller drei Gruppen ein nahezu ausgeglichenes Verhältnis zwischen den Teilnehmern, welche eher negative bzw. sowohl negative als auch positive Eigenschaften eines Weges annotieren würden. Bei den Gruppen der Rollstuhlfahrer und der Sehgeschädigten konnte jeweils ein Teilnehmer zu dieser Frage keine Angaben machen. Bei den Senioren konnten dagegen drei Probanden keine Angaben machen. Von keinem Probanden wurde angegeben, dass eher positive Bewertungen vorgenommen werden würden. Es kann somit geschlossen werden, dass vornehmlich negative Umwelteigenschaften für die Annotation herangezogen werden, auch wenn zusätzlich in geringerem Umfang positive Eigenschaften bedacht werden. Im Gegensatz zu schlecht geeigneten sollten gut geeignete Wegabschnitte somit insgesamt weniger Bewertungen aufweisen.

7.4.2 Homogenität der Benutzergruppen

Durch die Aufforderung zur Annotation an den vorher festgelegten Stationen ist eine Untersuchung der aufgenommenen Daten auf Homogenität innerhalb jeder Benutzergruppe möglich, da die Annotationen hinsichtlich des Ortes miteinander korrelieren. Die innerhalb der Evaluation aufgenommenen Daten wurden für jede der Annotationsstationen separat ausgewertet, um einen Vergleich zwischen den Probanden innerhalb der Benutzergruppen zu ermöglichen. Die Homogenität wird in diesem Abschnitt vornehmlich bezüglich der Bewertung unter Verwendung der vorgegebenen Kriterien untersucht. Es ist allerdings zu beach-

ten, dass aufgrund der Versuchsdurchführung an jeder Annotationsstation lediglich eine allgemeine Aufforderung zur Annotation erfolgte. Daher konnte nicht gewährleistet werden, dass die Probanden an jeder Station eine Bewertung mit allen Kriterien vornahm beziehungsweise überhaupt Bewertungen annotierten. Gleichzeitig stellt dieses Vorgehen jedoch sicher, dass die Bewertungen nur die von den Probanden an den jeweiligen Stationen als notwendig erachteten Kriterien beinhalten. Die Datenbasis, welche für Aussagen bezüglich der Homogenität verwendet werden kann, ist somit geringer, als dies mit der verfügbaren Anzahl an Probanden theoretisch möglich gewesen wäre.

Die folgenden Tabellen zeigen die Bewertungen der drei Benutzergruppen an den Annotationsstationen. Dabei wurde nur jene Datenreihen betrachtet, die aus mindestens vier Bewertungen bestehen, da ansonsten Analysen bezüglich der Homogenität der Bewertungen wenig Aussagekraft aufweisen. So wird für die Gruppe der Senioren für das Kriterium Aufwand keine Auswertung vorgenommen, da an keiner der Annotationsstationen eine ausreichende Anzahl an Bewertungen aufgenommen wurde. In der ersten Spalte wird das jeweilige Kriterium zusammen mit der Annotationsstation genannt, wobei *C* die Route Campus und *H* die Route Helmholtz bezeichnet. In der Spalte Datenreihe sind die annotierten Werte angegeben, gefolgt von der Spalte für den Mittelwert und die Standardabweichung.

Die nachfolgend angeführten Daten erlauben eine Analyse der Bewertungen der Benutzergruppen bezüglich der Abweichung vom Mittelwert sowie bezüglich der aufgenommenen Datenreihe. Eine Standardabweichung von unter 1,0 wird in der folgenden Auswertung als Indiz dafür gewertet, dass ein homogenes Annotationsverhalten innerhalb der Benutzergruppe vorliegt. Beispielsweise würden bei einem Mittelwert von 3,0 die Annotationswerte von 2 und 4 innerhalb der geforderten Standardabweichung liegen. Dabei liegt die Bewertung eines Kriteriums mit einer Abweichung von einem Skalenwert innerhalb einer annehmbaren Toleranz, welche durch die subjektive Wahrnehmung der Probanden begründet werden kann. Die folgende Tabelle 7.4 beinhaltet die Datenreihen für die Gruppe der Senioren.

Kriterium (Station)	Datenreihe	Mittelwert	Standardabweichung
Barrierefreiheit (C2)	2, 3, 5, 3	3,25	1,258
Barrierefreiheit (C4)	1, 3, 2, 2	2,00	0,816
Barrierefreiheit (C5)	1, 3, 1, 1	1,50	1,000
Barrierefreiheit (H5)	3, 5, 4, 4	4,00	0,816
Sicherheit (C2)	2, 3, 4, 4	3,25	0,957
Sicherheit (C4)	3, 2, 1, 3, 4, 2, 1	2,29	1,113

Sicherheit (<i>H1</i>)	4, 2, 3, 3, 4	3,20	0,837
Sicherheit (<i>H2</i>)	4, 4, 3, 2, 4	3,40	0,894
Sicherheit (<i>H5</i>)	5, 4, 5, 5, 5	4,80	0,447

Tabelle 7.4: Bewertungen der Gruppe Senioren

Bei der Gruppe der Senioren weisen 7 von 9 Datenreihen eine Standardabweichung von 1,0 oder weniger auf. Das Minimum wird dabei bei Annotationsstation *H5* erreicht, welche vor der Mensa der Universität auf einem breiten und übersichtlichem Fußweg liegt. Daher erfolgt eine durchgehend hohe und homogene Sicherheitsbewertung für diese Stelle. Annotationsstation *C5* ist direkt nach Überwinden der Treppen auf der Route Campus positioniert, so dass eine durchgehend schlechte Bewertung der Barrierefreiheit angenommen werden kann. Diese wird durch die vorliegende Datenreihe wiedergegeben, wobei sich durch die relativ hohe Bewertung von 3 zwischen den drei sehr geringen Bewertungen von 1 eine im Vergleich hohe Standardabweichung von 1,0 ergibt.

Aufgrund der geringen Anzahl der aufgenommenen Bewertungen haben Bewertungen, welche durch die subjektive Wahrnehmung eines Probanden stark vom Mittelwert abweichen, einen sehr großen Einfluss auf den Wert der Standardabweichung. Trotzdem kann aufgrund der angegebenen Werte eine homogene Bewertung innerhalb der Gruppe der an der Evaluation teilgenommenen Senioren gefolgert werden, auch wenn signifikante Aussagen hinsichtlich der gesamten Gruppe der Senioren erst durch eine wesentlich größere Stichprobe möglich sind.

In der folgenden Tabelle 7.5 sind die Datenreihen für die Gruppe der Rollstuhlfahrer zusammengefasst. Auch für diese Benutzergruppe werden nur Datenreihen mit mindestens vier Werten betrachtet. Annotationen der gehbehinderten Probandin sind fett hervorgehoben. Die Werte werden normal in die Auswertung mit einbezogen, da sich bis auf die Sicherheitsbewertungen bei Annotationsstation *H2* keine auffälligen Abweichungen vom Annotationsverhalten der übrigen Probanden dieser Gruppe ableiten lassen.

Kriterium (Station)	Datenreihe	Mittelwert	Standardabweichung
Barrierefreiheit (<i>C1</i>)	1, 1, 1, 4	1,75	1,500
Barrierefreiheit (<i>C2</i>)	3 , 2, 4, 4, 2	3,00	1,000
Barrierefreiheit (<i>C3</i>)	3, 3, 3, 2 , 4	3,00	0,707
Barrierefreiheit (<i>C4</i>)	1, 1, 2 , 4, 1	1,80	1,304
Barrierefreiheit (<i>C5</i>)	1, 4, 1, 1, 2, 2	1,83	1,169

Barrierefreiheit (H2)	3, 3, 3, 5, 1	3,00	1,414
Barrierefreiheit (H5)	4, 1, 3, 4, 5	3,40	1,517
Sicherheit (C1)	1, 2, 1, 4	2,00	1,414
Sicherheit (C4)	1, 1, 3, 1	1,50	1,000
Sicherheit (H2)	2, 2, 4, 5, 1	2,80	1,643
Sicherheit (H5)	5, 4, 1, 5	3,75	1,893
Aufwand (C4)	1, 3, 1, 2	1,75	0,957
Aufwand (C5)	2, 1, 1, 4	2,00	1,414
Aufwand (H5)	4, 1, 2, 4	2,75	1,500

Tabelle 7.5: Bewertungen der Gruppe Rollstuhlfahrer

Werden die Standardabweichungen ohne Einbezug der zugrundeliegenden Datenreihen analysiert, so erscheinen die Bewertungen bei der Gruppe der Rollstuhlfahrer sehr breit gestreut. Annotationsstation C5 stellt für die Rollstuhlfahrer eine Sackgasse dar, da die Treppe nicht zu überwinden ist. Die Datenreihe für die Bewertung der Barrierefreiheit enthält entsprechend bis auf eine Ausnahme nur niedrige Werte, selbst die gehbehinderte Probandin bewertet die Barrierefreiheit mit einem sehr niedrigen Wert von 2. Die Bewertung mit dem sehr hohen Wert von 4, welche eine sehr niedrige Barrierefreiheit bedeutet, erscheint dagegen eine subjektive Fehleinschätzung eines der Probanden zu sein. Denkbar ist auch eine Fehlbedienung, da ansonsten ein derart guter Wert für eine nicht zu überwindende Treppe nicht zu erklären ist. Gleiches gilt für den sehr hohen Wert von 4 für die Bewertung der Barrierefreiheit an der Annotationsstation C1, welcher die erste Annotation des Probanden innerhalb der Evaluation war.

Eine Analyse des Annotationsverhaltens der für diese Annotationen verantwortlichen Probanden ergab jedoch keine generell stark abweichenden Bewertungen. Eine Aussage bezüglich eines homogenen Annotationsverhaltens der an der Evaluation teilgenommenen Rollstuhlfahrer sowie der gehbehinderten Probandin ist aufgrund der oben dargestellten Daten nur sehr unzureichend möglich, da innerhalb der meisten Datenreihen ein Wert sehr stark vom Mittelwert abweicht. Begründet werden kann dies durch die unterschiedlichen Eigenschaften der verwendeten Elektrorollstühle sowie der sehr heterogene Altersstruktur der Probanden. Es ist jedoch anzunehmen, dass über eine größere Stichprobe derartige Werte ausgeglichen werden. Die Werte bezüglich des Kriteriums Aufwand sind zudem weniger aussagekräftig als die Werte für die übrigen Kriterien, da alle Probanden über einen Elektrorollstuhl verfügten.

Die folgende Tabelle 7.6 zeigt die Datenreihen für die Gruppe der Sehgeschädigten. Die Werte der sehbehinderten Probanden sind dabei fett hervorgehoben und bei der Auswertung normal mit einbezogen, da keine generelle Abweichung bei der Annotation im Vergleich zu den blinden Probanden erkennbar ist.

Kriterium (Station)	Datenreihe	Mittelwert	Standardabweichung
Barrierefreiheit (C2)	2, 1 , 2, 1	1,50	0,577
Barrierefreiheit (H1)	3, 5, 5 , 3 , 5	4,20	1,095
Barrierefreiheit (H3)	2, 2 , 4 , 4, 4	3,20	1,095
Barrierefreiheit (H4)	2, 3, 3 , 4	3,00	0,816
Barrierefreiheit (H5)	5 , 5 , 3, 3, 4	4,00	1,000
Sicherheit (C1)	3 , 3 , 5, 4, 2, 3	3,33	1,033
Sicherheit (C3)	4, 4, 5, 3	4,00	0,816
Sicherheit (H1)	4, 4 , 5 , 5, 2 , 4, 4	4,00	1,225
Sicherheit (H2)	3, 4, 2 , 5, 2	3,20	1,303
Sicherheit (H3)	4, 2 , 4 , 4, 3	3,40	0,894
Sicherheit (H5)	3, 4, 4 , 3, 4, 4, 5	3,86	0,690
Orientierung (C1)	3, 4 , 2 , 5, 3, 2	3,17	1,169
Orientierung (C2)	2, 3, 2 , 1	2,00	0,816
Orientierung (C3)	3, 4, 4 , 3	3,50	0,577
Orientierung (C4)	3, 2, 2 , 2	2,25	0,500
Orientierung (C5)	3, 3 , 3 , 2, 2	2,60	0,548
Orientierung (H1)	4, 4, 4 , 5, 5, 5, 5, 5, 5	4,67	0,500
Orientierung (H2)	5 , 4, 4, 4, 5	4,40	0,547
Orientierung (H3)	4, 4 , 4, 4	4,00	0,000
Orientierung (H5)	3, 5 , 4 , 3, 4, 5	4,00	0,894

Tabelle 7.6: Bewertungen der Gruppe Sehgeschädigter

Die Standardabweichungen der aufgeführten Bewertungen liegen in sechs Fällen knapp über dem Wert von 1,0. Für eine die meisten Bewertungen liegt die Standardabweichung

jedoch zum Teil deutlich unterhalb dieses Wertes. Obwohl auch bei den angeführten Datenreihen teilweise Werte mit starken Abweichungen vorhanden sind, lässt sich ein homogenes Annotationsverhalten ableiten. Insbesondere die sehr geringen Standardabweichungen beim Bewertungskriterium Orientierung sind auffällig. Das Kriterium erscheint aufgrund der Ergebnisse als sehr gut geeignet für die Gruppe der Sehgeschädigten. Wie auch bei den beiden anderen Benutzergruppen sollten die getroffenen Aussagen jedoch durch die Ergebnisse einer größeren Stichprobe unterstützt werden, da ansonsten keine Aussagen mit statistischer Signifikanz möglich sind.

7.4.3 Vergleich zu nicht-mobilitätseingeschränkten Benutzern

Innerhalb der Evaluation wurde eine zusätzliche Kontrollgruppe aus nicht-mobilitätseingeschränkten Benutzern einbezogen, um Aussagen über die Validität der Benutzergruppen abzuleiten und nachzuweisen, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Gruppen mobilitätseingeschränkter und nicht-mobilitätseingeschränkter Benutzer hinsichtlich des Annotationsverhaltens besteht.

Die Kontrollgruppe bestand aus zehn Probanden (7 weibliche und 3 männliche) mit einem Durchschnittsalter von 31,3 Jahren (Minimum: 22 Jahre, Maximum 58 Jahre). Ebenso wie bei den Gruppen der mobilitätseingeschränkten Benutzer wurde auch in dieser Gruppe jeweils gleich oft die Route Campus bzw. die Route Helmholtz als Startstrecke gewählt, so dass ein systematischer Fehler durch Lerneffekte ausgeschlossen werden kann. Die Probanden erhielten im Vorfeld der Evaluation den gleichen Fragebogen wie die übrigen Teilnehmer und wurden direkt vor Beginn der jeweiligen Versuchsdurchführung in die Bedienung des Prototyps eingeführt. Nach Versuchsdurchführung wurde entsprechend den Versuchen mit mobilitätseingeschränkten Benutzern ein strukturiertes Interview durchgeführt. Für die Bewertung von Wegabschnitten wurden den Probanden alle vier Kriterien der übrigen drei Benutzergruppen bereitgestellt (Aufwand, Sicherheit, Barrierefreiheit und Orientierung). Während der Versuchsdurchführung zeigten sich keine Probleme bei der Bedienung des Prototyps. Weiterhin wurden durch die Probanden keine Schwierigkeiten innerhalb der strukturierten Interviews benannt.

Aus den in Tabelle 7.7 dargestellten Evaluationsdaten ist ersichtlich, dass die durchschnittliche Anzahl der Annotationen je Proband nicht wesentlich von der durchschnittlichen Anzahl der Annotationen der mobilitätseingeschränkten Teilnehmer abweicht.

	Gesamt	Bewertungen	Merkmale
# Annotationen	470,0	273,0	197,0
# Annotationen / Proband	47,0	27,3	19,7
# Annotationen (Stationen)	461,0	268,0	193,0
# Annot. (Stat.) / Proband	46,1	26,8	19,3
# freie Annotationen	9,0	5,0	4,0
# freie Annot. / Proband	0,9	0,5	0,4

Tabelle 7.7: Absolute und relative Anzahl der Annotationen

Bei der Betrachtung des Verhältnisses zwischen freien Annotationen und Annotationen, welche nach Aufforderung an den Stationen eingegeben wurden, ist zwischen der Kontrollgruppe und den übrigen Gruppen ein deutlicher Unterschied ersichtlich. Die Verhältnisse zwischen den freien Annotationen und den Annotationen nach Aufforderungen sind in der folgenden Abbildung 7.14 graphisch dargestellt. Bei der Kontrollgruppe der nicht-mobilitätseingeschränkten Benutzer wurde lediglich ein vernachlässigbarer Anteil von 2% der Annotationen ohne vorherige Aufforderung durch die Probanden eingegeben. Absolut haben die zehn Probanden insgesamt lediglich neun freie Annotationen vorgenommen. Von den Gruppen der mobilitätseingeschränkten wurde im Gegensatz dazu jeweils etwa ein Viertel bis ein Drittel der Annotationen frei und ohne vorherige Aufforderung eingegeben.

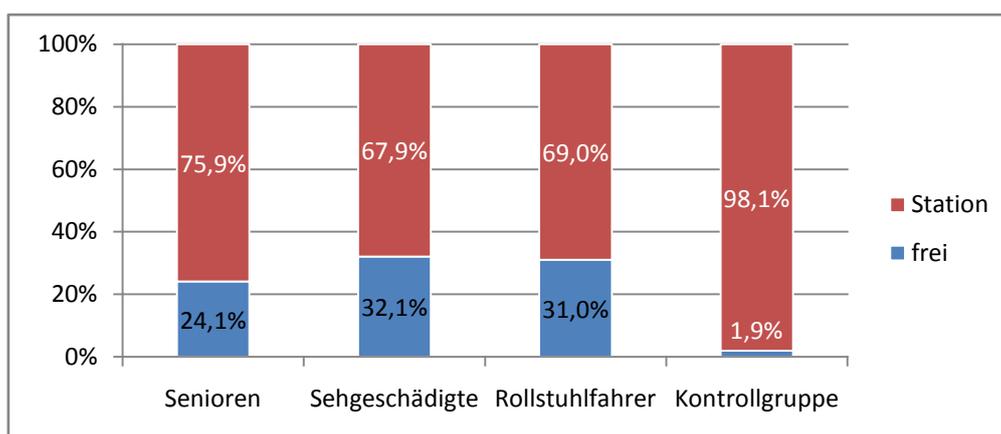


Abbildung 7.14: Vergleich des Anteils freier Annotation zwischen den Gruppen

Ebenso wie die mobilitätseingeschränkten Probanden gaben auch die Teilnehmer der Kontrollgruppe an, dass sie mehrheitlich positive und negative oder aber ausschließlich negative Wegeeigenschaften annotieren würden. Die sehr geringe Anzahl freier Annotation lässt sich somit darauf zurückführen, dass für die Teilnehmer der Kontrollgruppe bei der Bewältigung der Routen keine herausragenden und damit annotationswürdigen Schwierigkeiten

bzw. Hindernisse vorhanden waren. Dieses Ergebnis wird zudem durch die Auswertung der Bewertungen der Kontrollgruppe unterstützt. Die Durchschnittswerte und die Standardabweichung für die Bewertungen an den Annotationsstationen sind in der folgenden Tabelle 7.8 dargestellt, wobei an allen Stationen für jedes Kriterium die geforderte Mindestzahl von vier Bewertungen durch die Probanden erhoben werden konnte. Die in der nachfolgenden Diskussion besonders behandelten Werte sind dabei in der Tabelle grün hinterlegt.

Kriterium	Station	Mittelwert	s ²	Station	Mittelwert	s ²
Barrierefreiheit	Campus 1	3,00	1,000	Helmholtz 1	3,63	0,744
	Campus 2	3,29	1,113	Helmholtz 2	3,88	0,991
	Campus 3	4,57	0,787	Helmholtz 3	4,60	0,548
	Campus 4	3,40	1,140	Helmholtz 4	4,40	0,894
	Campus 5	2,88	1,458	Helmholtz 5	4,00	1,000
Aufwand	Campus 1	4,25	0,500	Helmholtz 1	4,33	0,577
	Campus 2	4,00	1,155	Helmholtz 2	4,33	0,816
	Campus 3	4,67	0,516	Helmholtz 3	4,00	1,414
	Campus 4	4,00	1,265	Helmholtz 4	3,14	1,574
	Campus 5	2,67	1,033	Helmholtz 5	4,67	0,516
Sicherheit	Campus 1	2,63	0,916	Helmholtz 1	2,86	1,215
	Campus 2	3,83	0,753	Helmholtz 2	3,63	0,744
	Campus 3	4,75	0,463	Helmholtz 3	4,75	0,463
	Campus 4	3,75	0,886	Helmholtz 4	4,63	0,518
	Campus 5	3,63	0,916	Helmholtz 5	4,50	0,756
Orientierung	Campus 1	3,40	0,548	Helmholtz 1	4,75	0,463
	Campus 2	4,00	0,816	Helmholtz 2	4,71	0,488
	Campus 3	4,38	0,744	Helmholtz 3	5,00	0,000
	Campus 4	4,33	0,516	Helmholtz 4	4,78	0,441
	Campus 5	4,57	0,535	Helmholtz 5	4,63	0,518

Tabelle 7.8: Bewertungen der Kontrollgruppe

Im Vergleich zu den Bewertungen der mobilitätseingeschränkten Probanden liegen die Werte deutlich höher. Folglich wurde die Umgebung an den Annotationsstationen von den Pro-

banden der Kontrollgruppe in Bezug auf die Kriterien positiver wahrgenommen als von den Teilnehmern der anderen Gruppen. Nahezu alle Werte liegen im Bereich von knapp unter vier bis fünf, so dass auf keine nennenswerten Schwierigkeiten an den Annotationsstationen geschlossen werden kann.

Bei der Bewertung der Barrierefreiheit fallen die Werte für die Stationen Campus 1 und Campus 5 besonders auf. Bei der ersten Station ist ein Untergrund aus schlecht verteiltem Schotter vorhanden, die zweite Station ist durch die Treppe gegen Ende der Route gekennzeichnet. Entsprechend ist auch der vergleichsweise schlechte Wert des Kriteriums Aufwand für die Station Campus 5 zu erklären, der geringe Wert für das Kriterium Aufwand bei Station Helmholtz 4 ist durch die starke Steigung des Weges an dieser Stelle bedingt. An den Stationen Campus 1 und Helmholtz 1 mussten jeweils zwei Spuren Straßenbahnschienen und Straßen überquert werden, so dass die Sicherheitsbewertung einen im Vergleich geringen Wert aufweist. Auch der relativ geringe Wert des Orientierungskriteriums für die Station Campus 1 ist darauf zurückzuführen.

Für die Bestätigung der Hypothese, dass sich die Gruppen der mobilitätseingeschränkten Benutzer sowie die Kontrollgruppe in ihrem Annotationsverhalten signifikant unterscheiden, wurde ein zweiseitiger t-Test für gepaarte Stichproben mit den Mittelwerten der Bewertungen als Grundlage durchgeführt. Die Bewertungsmittelwerte wurden dabei als abhängige Variable angesehen und paarweise für jede Annotationsstation verglichen, wobei erneut nur diejenigen Mittelwerte in die Berechnung einbezogen wurden, bei denen mindestens vier Bewertungen zugrunde lagen. Als Nullhypothese wurde angenommen, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen der mobilitätseingeschränkten Benutzer und der Kontrollgruppe besteht. Die folgende Tabelle 7.9 zeigt die Ergebnisse des t-Tests sowie die sich daraus ergebenden Signifikanzniveaus.

Gruppe	Ergebnis t-Test	Schwellwert ³⁶	Signifikanzniveau
Rollstuhlfahrer	6,939	4,221	0,001
Sehgeschädigte	3,519	2,867	0,010
Senioren	2,002	1,860	0,100

Tabelle 7.9: Ergebnisse und Signifikanzniveaus des t-Tests

Aufgrund der Ergebnisse kann die Nullhypothese für die Gruppe der Rollstuhlfahrer mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9%, für die Gruppe der Sehgeschädigten mit 99% und für die Senioren mit 90% ausgeschlossen werden. Für die ersten beiden Gruppen ergeben sich somit keine signifikanten Übereinstimmungen beim Annotationsverhalten mit der Kontrollgruppe. Das Signifikanzniveau bei der Gruppe der Senioren liegt höher als der Wert

³⁶ Die Schwellwerte für die Signifikanzniveaus sind einer tabellarischen Darstellung in (Howell, 2007, S. 682) entnommen.

von 0,05, so dass allgemein keine hohe Signifikanz nachgewiesen werden kann und die Nullhypothese nicht vollständig verworfen werden kann. Das Signifikanzniveau besitzt dennoch einen Wert, der eine Übereinstimmung der Annotationsverhalten der beiden Gruppen als sehr zweifelhaft erscheinen lässt und die Bildung einer eigenen Benutzergruppen für Senioren rechtfertigt.

Aufgrund der beschriebenen Ergebnisse lassen sich keine Übereinstimmungen zwischen dem Annotationsverhalten der Kontrollgruppe und den Gruppen der mobilitätseingeschränkten Benutzer nachweisen. Da ein Annotationssystem auf der Eingabe freier Annotationen basiert und bei der normalen Anwendung keine Aufforderungen mehr ausgelöst werden, würden nicht-mobilitätseingeschränkte Benutzer eine nur sehr unzureichende Anzahl an Annotationen beitragen. Die geringe Anzahl der Annotationen sowie die an den Stationen aufgenommenen Werte lassen zudem darauf schließen, dass nicht-mobilitätseingeschränkte Benutzer ihre Umwelt anders wahrnehmen als mobilitätseingeschränkte Benutzer. Bezogen auf die Bewertung von Wegen konnte zudem nachgewiesen werden, dass keine signifikante Übereinstimmung mit den in dieser Arbeit behandelten Benutzergruppen besteht. Selbst für die Gruppe der Senioren besteht lediglich eine sehr geringe Überdeckung.

7.4.4 Gebrauchstauglichkeit des Prototyps

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Versuchsdurchführung sowie der Befragungen für die Gebrauchstauglichkeit des entwickelten Prototyps analysiert. Die Analyse erfolgt dabei in Bezug auf die Eignung der Zielführung für die Benutzergruppen sowie hinsichtlich der Benutzbarkeit der Benutzungsschnittstelle. Die Zielführung basiert auf der Verwendung von Fotos, akustischen und textuell dargestellten Navigationsanweisungen. Alle Probanden hatten keine größeren Probleme bei der Verwendung der bereitgestellten Zielführung. Die Zielführung erwies sich jedoch an drei Stellen auf der Route Campus für einige Probanden als problematisch. Die folgende Abbildung 7.15 zeigt Fotos dieser drei Stellen, wobei die für die Orientierung erschwerenden Positionen durch Pfeil markiert sind.

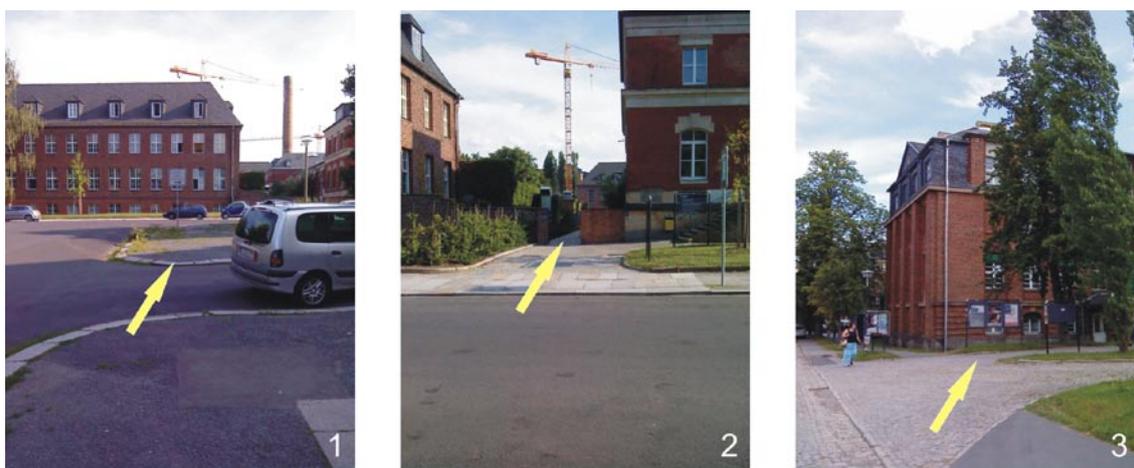


Abbildung 7.15: Problematische Stellen bei Zielführung

Das erste Foto zeigt einen Überweg auf eine große Verkehrsinsel. Der Benutzer wurde durch die zugehörige Navigationsanweisung zum Überqueren der Straße aufgefordert. Innerhalb der Gruppe der Senioren kam es vereinzelt dazu, dass die Navigationsanweisung falsch interpretiert wurde und die Straße an der falschen Stelle überquert wurde. Für sehgeschädigte Probanden erwies sich dieser Überweg als sehr ungewöhnliche und schlecht zu erfassende Straßenführung, so dass die Orientierung erschwert wurde. Für die Rollstuhlfahrer stellte weniger die Orientierung ein Problem dar. Vielmehr hielt der gewählte Überweg teilweise keine genügend abgesenkten Bordsteine bereit, so dass ein alternativer Weg gesucht werden musste.

Das zweite Foto zeigt den Toreingang und den dahinterliegenden Fußweg, welchen die Probanden als Teilstück der Route überqueren mussten. Das Foto entspricht in wesentlichen Teilen dem verwendeten Bild für die Navigationsanweisung. Innerhalb der Gruppe der Senioren bestanden die Probleme zumeist in der Identifikation des Tores als Ziel für die Weiterführung der Route. Begründet werden kann diese Problematik durch parkende Autos am Straßenrand, so dass der Bereich des Tores nur unzureichend einsehbar war. Für Rollstuhlfahrer ergaben sich erneut Probleme durch nicht ausreichend abgesenkte Bordsteine und parkende Autos, so dass Umwege verursacht wurden. Sehgeschädigte Probanden hatten besondere Probleme, den Durchgang zu finden, da keine taktil erfassbaren Orientierungsmerkmale vorhanden sind.

Das letzte Bild zeigt eine Abzweigung der Route nach rechts, wobei der hintere Weg gewählt werden musste. Dieser ist in dem zugehörigen Bild für die Navigationsanweisung durch einen Pfeil eindeutig markiert, so dass weder die Gruppe der Senioren noch der Rollstuhlfahrer an dieser Stelle Probleme bei der Orientierung zeigten. Für die Gruppe der Sehgeschädigten stellten die dicht beieinanderliegenden Wege trotz der durch die Simulation sehr genauen Positionierung jedoch eine Mehrdeutigkeit bei der Orientierung dar. In einigen Fällen wurde der erste Weg gewählt, welcher lediglich eine Ausfahrt darstellt. Insgesamt

wurden die beiden Routen jedoch ohne größere Probleme bewältigt. Bis auf die drei beschriebenen Stellen ergaben sich keine wesentlichen Schwierigkeiten bei der Orientierung für die Probanden der drei Benutzergruppen.

Innerhalb der Befragung wurden die Probanden nach ihren Präferenzen bei der Nutzung der für die Navigationsanweisungen angebotenen Medien befragt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 7.16 für die Gruppen der Senioren (9 Probanden) und Rollstuhlfahrer (6 Probanden) direkt nebeneinander dargestellt. Dabei wurden die Angaben der Probanden danach getrennt, ob die Nutzung eines Mediums als häufig oder nur als selten angegeben wurde.

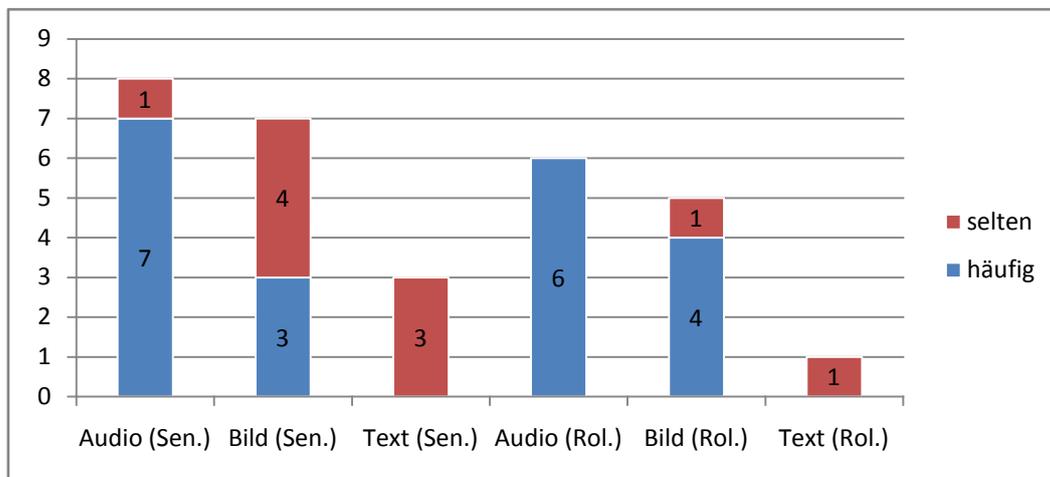


Abbildung 7.16: Verwendung der verschiedenen Medien für die Zielführung

Bei der Gruppe Senioren wie auch bei den Rollstuhlfahrern wird vornehmlich die Audioausgabe als häufig verwendet angegeben, gefolgt von der Bilddarstellung. Eine im Verhältnis derart häufige Verwendung der Audiodarstellung war nicht zu erwarten, da aufgrund der Umgebungsgeräusche die Audioausgabe als nicht optimal eingestuft wurde und für diese Benutzergruppen keine Funktion zur Wiederholung der Audioausgabe implementiert wurde. Es ist jedoch zu beachten, dass ebenfalls die Lesbarkeit des Bildschirms aufgrund des Tageslichts im Freien von den Probanden als negativ angesehen wurde. Die textuelle Repräsentation der Audioausgabe wurde nur selten verwendet, zumeist verzichteten die Probanden vollständig auf dieses Medium. Werden seltene und häufige Verwendung der Medien zusammen betrachtet, so spielt die textuelle Repräsentation der Navigationsanweisung nur eine untergeordnete Rolle, Audiodarstellung und Bildrepräsentation können somit als ausreichend angesehen werden.

Die Probanden wurden innerhalb eines auf die Evaluation folgenden strukturierten Interviews nach ihrer Einschätzung des Navigationssystems befragt. Dabei wurde explizit auf positive sowie negative Erfahrungen eingegangen. Positiv wurde allgemein die leichte Handhabung des Geräts bzw. der Benutzungsschnittstelle hervorgehoben (drei Senioren und

ein Rollstuhlfahrer). Besonders die Vibration des Gerätes als Signal für ein Ereignis wie einer folgenden Sprachausgabe wurde von den Probanden als sehr positiv empfunden (drei Senioren und ein Rollstuhlfahrer). Die am häufigsten geäußerte Kritik innerhalb der Gruppen der Senioren und Rollstuhlfahrer (sechs Senioren und zwei Rollstuhlfahrer) betraf das Display, welches bei ungünstigen Lichtverhältnissen nur sehr schwer lesbar war. Weitere Kritik betraf die Audioausgabe (ein Senior und drei Rollstuhlfahrer), die insbesondere bei starken Umgebungsgeräuschen nur schwer verständlich war, sowie die Bedienung des Scrollbalkens für die Auswahl der Umgebungsmerkmale (zwei Senioren und ein ein Rollstuhlfahrer).

Die Gruppe der Sehgeschädigten verwendete die eigens entwickelte gestenbasierte Eingabetechnik, welche von der Mehrzahl der Probanden als sehr positiv sowie angenehm und intuitiv zu bedienen hervorgehoben wurde (9 Probanden), wie die folgende Aussage eines der Probanden verdeutlicht:

Die Gesten waren sehr angenehm und intuitiv, vor allem, weil ich als blinder Mensch endlich auch einen Touchscreen bedienen kann.

Kritisch angemerkt wurde von einem Probanden, dass die Menüführung verbessert werden könnte, da beim Zurückgehen ins Hauptmenü immer zum ersten Menüpunkt der Auswahlliste (Annotation Sicherheit) zurückgegangen wurde und nicht zum zuletzt ausgewählten. Weitere Verbesserungsvorschläge betrafen die Sprachausgabe, so wurde von einem Probanden die Einführung eines Anfänger- und Expertenmodus angeregt, so dass geübte Benutzer bei reduzierter Sprachausgabe schneller durch die Menüs navigieren können. Hinsichtlich der Menüführung wurde angemerkt, dass eine Kategorisierung der Merkmale sinnvoll erscheint, so dass eine schnellere Navigation zum gewünschten Menüpunkt ermöglicht wird. Zudem wurde von zwei Probanden die Konfigurierbarkeit der Geschwindigkeit der Sprachausgabe gewünscht.

Insgesamt musste keinem der Probanden aus den drei Benutzergruppen während der Evaluation durch den Versuchsleiter bei der Bedienung des Systems Hilfestellung geleistet werden. Grundsätzlich betrachteten die Probanden das System innerhalb der Gespräche als einfach und komfortabel zu bedienen. Es kann somit bis auf die durch die Hardware bedingten Schwierigkeiten von einer sehr guten Gebrauchstauglichkeit für die Benutzergruppen der Senioren und Rollstuhlfahrer ausgegangen werden. Die gestellten Aufgaben wurden auch von den Probanden der Gruppe der Sehgeschädigten ohne Probleme und zusätzliche Hilfestellung des Versuchsleiters gelöst. Mit der gestenbasierten Eingabe konnten sich alle Probanden innerhalb der Einführung ausreichend vertraut machen, so dass keine Probleme während der Versuchsdurchführung auftraten. Für diese Gruppe kann somit ebenfalls von einer sehr guten Gebrauchstauglichkeit ausgegangen werden.

7.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Evaluation des Verfahrens zur multimodalen Annotation geographischer Daten beschrieben. Die Evaluation basiert auf einem adaptierten Wizard-of-Oz-Versuchsaufbau, wobei die Lokalisierungskomponente des Prototyps durch den Versuchsleiter simuliert wurde.

Die Analyse der Evaluationsergebnisse zeigt unter anderem, dass die verwendeten Kriterien für die Bewertung von Wegabschnitten für die Benutzergruppen geeignet sind. Die hohe Anzahl freier Annotationen zeigt zudem, dass das Konzept der multimodalen Annotation für die mobilitätseingeschränkten Probanden verständlich und anwendbar ist. Der implementierte Prototyp ist für alle Benutzergruppen mit den bereitgestellten Benutzungsschnittstellen gebrauchstauglich. Innerhalb der Benutzergruppen zeigt sich ein homogenes Annotationsverhalten, auch wenn diese Aussage durch eine größere Anzahl an Probanden weiter bestärkt werden sollte. Der Vergleich der Annotationsverhalten zu nicht-mobilitätseingeschränkten Benutzer ergibt keine wesentliche Übereinstimmungen, so dass mobilitätseingeschränkte Benutzer einer gesonderten Behandlung bei der Verwertung von Annotationen für die Fußgängernavigation bedürfen. Die Bildung der Benutzergruppen konnte somit zusätzlich zur Anforderungsanalyse auch aus den Ergebnissen der Evaluation als notwendig und valide nachgewiesen werden. Ein Vergleich zwischen den Gruppen der mobilitätseingeschränkten Benutzer war aufgrund des Versuchsaufbaus und der dadurch bedingten Daten nicht möglich.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Navigationssysteme haben sich von teuren Spezialgeräten zu Massenprodukten entwickelt und sind für den Normalverbraucher erschwinglich geworden. Viele der heutigen mobilen Geräte wie Mobiltelefone, Smartphones oder PDA haben einen GPS-Sensor bereits integriert oder können diesen über externe Schnittstellen wie Bluetooth ansteuern, so dass der Einsatz entsprechender Software auch in diesem Segment zu einer Verbreitung von Navigationslösungen führt. Aufgrund der Portabilität werden zunehmend neue Anwendungsfelder neben der noch dominierenden Fahrzeugnavigation erschlossen. Insbesondere speziellen Lösungen für Fußgänger kommt eine besondere Bedeutung zu, da ein entsprechend großer Markt vorhanden ist.

Die Mehrzahl der Benutzer von Navigationssystemen können die bisherigen Systeme ohne größere Probleme ebenfalls für die Fußgängernavigation nutzen, obwohl diese für die Verwendung in Fahrzeugen optimiert sind. Mobilitätseingeschränkte Benutzer stellen jedoch weitaus mehr Anforderungen als derzeit von den bestehenden Systemen erfüllt werden können. Die Gruppe der mobilitätseingeschränkten Benutzer profitiert zudem in besonderem Maße von Navigationslösungen, da eine Steigerung der Mobilität vielen Menschen dieser Gruppe eine bessere Integration sowohl in sozialen als auch in beruflichen Bereichen ermöglicht. Eine geeignete Unterstützung mobilitätseingeschränkter Benutzer ist jedoch nur dann möglich, wenn notwendige geographische Basisdaten und Attributierungen vorhanden sind. Derzeit verfügbare Kartendaten stellen diese Informationen nicht oder nur unzureichend zur Verfügung, so dass in dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt wurde, welches eine kostengünstige Akquisition zusätzlicher geographischer Daten beziehungsweise Annotationen durch den Einbezug von Benutzern erlaubt. In dieser Arbeit wurden zudem Verfahren entwickelt, um die von den Benutzern akquirierten Daten für eine personalisierbare und multikriterielle Routenberechnung nutzbar zu machen.

Die Basis für die entwickelten Verfahren bildet eine Anforderungsanalyse innerhalb derer zusätzlich zur Auswertung wissenschaftlicher Ergebnisse eine Umfrage unter 88 sehgeschädigten Personen durchgeführt wurde. Die Bedürfnisse der in dieser Arbeit speziell betrachteten Gruppen der Senioren, Rollstuhlfahrer und Sehgeschädigten wurden hinsichtlich der Bereiche geographische Basisdaten, Positionsbestimmung, Routenberechnung, Multimodalität sowie hinsichtlich temporaler Aspekte analysiert, so dass Anforderungen an die Anreicherung der geographischen Daten und an die personalisierte Routenberechnung abgeleitet werden konnten. Die wichtigsten Ergebnisse der Anforderungsanalyse beinhalten die Notwendigkeit der Erweiterung der geographischen Basisdaten sowie die Bewertung von Routen hinsichtlich zusätzlicher Kriterien wie etwa der Sicherheit oder Barrierefreiheit.

Ebenso müssen diese Kriterien bei der Berechnung einer geeigneten Route berücksichtigt werden.

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren der multimodalen Annotation geographischer Daten ermöglicht die Anreicherung geographischer Daten um zusätzliche Daten durch Benutzer von Navigationssystemen. Das Verfahren basiert auf der Analyse der in dieser Arbeit formal entwickelten LOM-Modalität, welche als Ortsmodalität den Ort, die Orientierung und die Bewegung eines Benutzers in einer Modalität zusammenführt. Das Verfahren besteht aus einem impliziten und einem expliziten Teil. Der implizite Teil ist direkt aus der Analyse der LOM-Modalität des Benutzers ableitbar. Der explizite Teil setzt sich aus direkten Eingaben des Benutzers zusammen, welche beispielsweise Bewertungen eines Weges bezüglich verschiedener Kriterien oder aber die Aufnahme von Umgebungsmerkmalen und Hindernissen sein können.

Aufbauend auf den durch das Verfahren der multimodalen Annotation gewonnenen Daten wurden Konzepte für die personalisierte Routenberechnung dargestellt. Die Konzepte basieren auf einer Verknüpfung bekannter Routingalgorithmen mit der Theorie der Multi-kriterienanalyse. Aus einer allgemeinen Darstellung einer Strategie zur multikriteriellen Routenberechnung wird ein Verfahren abgeleitet, welches es Benutzern erlaubt, persönliche Präferenzen in die Routenberechnung einfließen zu lassen. Zudem werden Strategien zur Konsolidierung von Annotationsdaten vorgestellt, so dass Bewertungen mehrerer Benutzer für die Berechnung von Teilgewichten in einem Navigationsgraphen verwendet werden können. Der Kreis wird hierbei zwischen Aufnahme der Annotationen vom Benutzer sowie deren Verwendung für eine personalisierte Routenberechnung durch den Benutzer geschlossen. Für die Realisierung der genannten Verfahren wurde in dieser Arbeit eine konzeptionelle Systemarchitektur entwickelt, wobei ebenfalls eine kurze Betrachtung datenschutzrechtlicher Aspekte erfolgte. Teile dieser Systemarchitektur wurden in einer Simulationsumgebung implementiert, welche für die Erprobung des Routingalgorithmus sowie einer Benutzersimulation verwendet wurde.

Das Verfahren der multimodalen Annotation wurde abschließend mit insgesamt 25 Nutzern aus den Gruppen der Senioren, Rollstuhlfahrern und Sehgeschädigten sowie 10 nicht-mobilitätseingeschränkten Probanden evaluiert. Die Evaluationsmethodik basiert auf einer Adaption klassischer Wizard-Of-Oz-Ansätze für die Anwendung auf mobile Dienste. Der entwickelte Prototyp ist äußerlich nicht von einem klassischen Navigationssystem zu unterscheiden, wobei die Lokalisierungs-komponente durch den Versuchsleiter simuliert wurde. Durch diesen Versuchsaufbau konnte eine wesentlich genauere Positionierung ermöglicht werden, als dies handelsübliche Sensoren erlauben. Die Gebrauchstauglichkeit der vom Prototyp bereitgestellten Benutzungsschnittstellen, insbesondere auch der Gesteneingabe für die sehgeschädigten Probanden, konnte innerhalb der Evaluation nachgewiesen werden.

Die Analyse der aufgenommenen Daten zeigt eine Homogenität des Annotationsverhaltens innerhalb der genannten Benutzergruppen, so dass von einer validen Bildung der Gruppen ausgegangen werden kann. Benutzer annotieren vorwiegend für sich selbst, teilweise werden andere Benutzer bedacht. Überwiegend werden negative Eigenschaften annotiert, so dass positive Eigenschaften von Wegstrecken über die Analyse von impliziten Annotationen wie der Nutzungsfrequenz bestimmt werden müssen. Durch Vergleich zu nicht-mobilitätseingeschränkten Benutzern konnte teilweise hochsignifikant nachgewiesen werden, dass die Gruppen der mobilitätseingeschränkten Benutzer gesondert zu behandeln sind, da keine verwertbaren Übereinstimmungen des Annotationsverhaltens bestehen.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren und Konzepte bieten eine breite Grundlage für weiterführende Entwicklungen und Forschungsrichtungen. Bisher wurde hauptsächlich eine Untersuchung der Verwendung von expliziten Annotationen für die personalisierte Fußgängernavigation durchgeführt. Aber auch die durch die Analyse der LOM-Modalität gewonnenen impliziten Annotationen ermöglichen eine Bewertung von Wegen und Wegabschnitten. Ein Weg, der beispielsweise von einem Rollstuhlfahrer regelmäßig verwendet wird, kann aufgrund der höheren Nutzungsfrequenz besser bewertet werden als andere Wege. Dieser Ansatz führt zur Bildung einer impliziten Eignung von Wegen, die sich in einem gesonderten Teilgewicht innerhalb des Navigationsgraphen abbilden lässt. In diese implizite Eignung von Wegen lassen sich weitere Kriterien bzw. Eigenschaften wie etwa die Anzahl der vorhandenen Orientierungsmerkmale integrieren. An dieser Stelle sind jedoch weitere Forschungsarbeiten notwendig, um eine robuste Bildung der impliziten Eignung zu erreichen. Für Simulationszwecke kann dabei die in dieser Arbeit entwickelte Simulationsumgebung verwendet werden.

Für die Bildung von Teilgewichten innerhalb von Navigationsgraphen wurden in dieser Arbeit Konzepte für die Konsolidierung von Annotationsdaten vorgestellt. Diese basieren auf einer gleichmäßigen Verteilung der Annotationen innerhalb der jeweils betrachteten Zeitintervalle. Unter realen Bedingungen werden Annotationen mit nur sehr geringer Wahrscheinlichkeit in derart regelmäßiger Form von den Benutzern geliefert, so dass die Wahl der zu betrachtenden Zeitintervalle sowohl für die Berechnung eines geeigneten Durchschnittswertes als auch für die Detektion von vorsätzlich falschen Annotationen adaptiv gestaltet werden sollte. Zusätzlich zu den bereits in dieser Arbeit andiskutierten Strategien zur Konsolidierung von Annotationsdaten ist zu untersuchen, inwieweit Änderungen der Umwelt robust aufgrund der sich ändernden Annotationswerte erkannt werden können. Probabilistische Verfahren stellen dabei einen vielversprechenden Ansatz dar. Ein weiterer Ansatz für eine robuste Konsolidierung von Annotationswerten besteht in der Betrachtung verschiedener Kriterien. So kann eine Änderung der Barrierefreiheit ebenso Auswirkungen auf die Sicherheit haben. Verfahren, welche auf einer zusätzlichen Korrelation zwischen Bewertungen verschiedener Kriterien basieren, erscheinen hinsichtlich der Erhöhung der Robustheit der Konsolidierung als sehr aussichtsreich.

Bisher wurden im Wesentlichen explizite Annotationen in Form von Bewertungen und Umgebungsmerkmalen untersucht. Das Konzept der multimodalen Annotation ermöglicht jedoch den Einbezug weiterer Annotationsarten. So lassen sich prinzipiell auch von Benutzern aufgenommene Fotos für die Bereitstellung von Navigationsanweisungen verwenden. Auch Audioaufnahmen können als Annotationen verwendet werden und Benutzern zusätzliche Informationen über bestimmte Umgebungseigenschaften liefern. Annotationen können nicht nur für die Bewertung von Wegen herangezogen, sondern auch für die Generierung von Navigationsanweisungen verwendet werden. Insbesondere annotierte Umgebungsmerkmale sowie zusätzlich Medien wie Fotos oder aber Audioschnipsel erscheinen für eine Augmentierung von Navigationsanweisungen gut geeignet.

In dieser Arbeit wurden bereits Systemteile und ein erster Prototyp implementiert, allerdings liegt der Schwerpunkt nicht in der Integration der vorgestellten Konzepte in ein vollständiges Navigationssystem. Um die vorgestellten Verfahren effektiv nutzbar zu machen, müssen zukünftige Arbeiten eine Integration der Verfahren und Konzepte mit bestehenden Technologien anstreben. So erscheint beispielsweise eine Verknüpfung mit frei zugänglichen geographischen Daten, wie sie etwa vom OpenStreetMap Projekt bereitgestellt werden, als sehr vielversprechend. Hierbei sind die beteiligten Datenformate zu untersuchen, so dass geeignete Transformationsvorschriften für die Konvertierung verschiedener Standards entwickelt werden können. Auch der Einbezug von weiteren Verkehrsträgern insbesondere des Öffentlichen Personennahverkehrs ist anzustreben, um den Benutzern eine möglichst breite Unterstützung bei der Fußgängernavigation zu ermöglichen. Ein integriertes System für die Fußgängernavigation für die in dieser Arbeit behandelten Benutzergruppen erfordert jedoch ebenfalls ein Pre-Journey-System, wie es beispielsweise innerhalb des MoBIC-Projekts entwickelt wurde. Ein solches System ermöglicht den Benutzern die Planung und Erkundung einer Route vor Antritt einer Reise, so dass die Benutzer mehr Sicherheit bei der Bewältigung des Weges erreichen. Das Verfahren der multimodalen Annotation stellt dabei eine vielversprechende Grundlage für derartige Entwicklungen dar.

Literaturverzeichnis

- Akasaka, Y. & Onisawa, T. (2005). Individual Pedestrian Navigation using Fuzzy Measures and Integrals. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, IEEE Press, New York, 1461-1466.
- Akasaka, Y. & Onisawa, T. (2003). Pedestrian Navigation System Reflecting Users' Subjectivity and Taste. *Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS'2003)*, 995-1000.
- Amalberti, R., Carbonell, N. & Falzon, P. (1993). User Representation of Computer Systems in Human-Computer Speech Interaction. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38, 547-566.
- Baker, R. R. (1981). *Human Navigation and the Sixth Sense*. Biological Science Texts. Hodder and Soughton, London.
- Barbehenn, M. (1998). A Note on the Complexity of Dijkstra's Algorithm for Graphs with Weighted Vertices. *IEEE Transactions on Computers*, 47(2), 263.
- Barnard, P. J. (1987). *Interfacing Thought: Cognitive Aspects of Human-Computer Interaction*. MIT Press, Cambridge, USA.
- Bäumer, B., Panov, I. & Raubal, M. (2007). Decision Improvement through Multi-Criteria Strategies in Mobile Location-Based Services. *Geospatial Crossroads @ GI Forum: Proceedings of the First Geoinformatics Forum Salzburg*, 17-25.
- Beauregard, S. & Haas, H. (2006). Pedestrian Dead Reckoning: A Basis for Personal Positioning. *Proceedings of The 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'06)*, 27-36.
- Beeharee, A. K. & Steed, A. (2006). A natural wayfinding exploiting photos in pedestrian navigation systems. *Proceedings of the 8th Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI'06)*, ACM Press, New York, 81-88.
- Beeharee, A. & Steed, A. (2007). Minimising Pedestrian Navigational Ambiguities Through Geoannotation and Temporal Tagging. *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction, HCII 2007*, LNCS 4551, Springer, Heidelberg, 748-757.
- Bentzen, B. L. (1979). Orientation Aids. In R. L. Welsh et al. (Eds): *Foundations of Orientation and Mobility*. AFB Press, 291-355.

- Bernhaupt, R., Jenisch, S., Keyser, Y. & Will, M. (2007). Capture the flag: simulating a location-based mobile game using the wizard-of-oz method. *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '07)*, ACM Press, New York, 228-229).
- Bigelow, A. E. (1996). Blind and Sighted Children's Spatial Knowledge of Their Home Environments. *International Journal of Behavioral Development*, 19(4), 797-816.
- Birbaumer, N. & Schmidt, R. F. (2005). *Biologische Psychologie*. Springer, Heidelberg.
- Bolt, R. A. (1980). "Put-that-there": Voice and Gesture at the Graphics Interface. *Proceedings of the 7th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '80)*, ACM Press, New York, 262-270.
- Bradley, A. & Dunlop, D. (2005). An Experimental Investigation into Wayfinding Directions for Visually Impaired People. *Personal Ubiquitous Computing*, 9(6), 395-403.
- Brusnighan, D. A., Strauss, M. G., Floyd, J. M. & Wheeler, B. C. (1989). Orientation Aid implementing the Global Positioning System. *Proceedings of the Fifteenth Annual Northeast Bioengineering Conference*, IEEE Press, New York, 33-34.
- Bühler, C., Heck, H. & Becker, J. (2008). How to Inform People with Reduced Mobility about Public Transport. *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCP'08)*, LNCS 5105, Springer, Heidelberg, 973-980.
- Bühler, C., Heck, H., Sischka, D. & Becker, J. (2006). BAIM-Information for People with Reduces Mobility in the Field of Puplic Transport. *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP'06)*, LNCS 4061, Springer, Heidelberg, 322-328.
- Burnett, G. E. & Lee, K. (2005). The Effect of Vehicle Navigation Systems on the Formation of Cognitive Maps. *Proceedings of the International Conference of Traffic and Transport Psychology*, Elsevier, Amsterdam, 407-418.
- Card, S. K., Morgan, T. P. & Newell, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Chankong, V. & Haimes, Y. Y. (1983). *Multiobjective Descision Making*. Elsevier Science Publishing.
- Cheng, Y.-C., Chawathe, Y., LaMarca, A. & Krumm, J. (2005). Accuracy Characterization for Metropolitan-Scale Wi-Fi Localization. *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'05)*, ACM Press, New York, 233-245.

-
- Clark-Carter, D. D., Heyes, A. D. & Howarth, C. I. (1986). The Efficiency and Walking Speed of Visually Impaired People. *Ergonomics*, 29(6), 779-789.
- Collins, C. C. (1985). On Mobility Aids for the Blind. In: *Electronic Spatial Sensing for the Blind*, Martinus Nijhoff Publishers, 35-64.
- Corona, B. & Winter, S. (2001). Datasets for Pedestrian Navigation Services. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung: Proceedings of the AGIT Symposium*, ASR Seibersdorf Research, 84-89.
- Costelloe, D., Mooney, P. & Winstantley, A. (2001). Multi-objective Optimisation on Transportation Networks. *Proceedings of the 4th AGILE Conference on Geographic Science (AGILE'04)*, 523-530.
- Cowen, D. J. (1998). GIS versus CAD versus DBMS: What are the Differences. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(1), 1551-1555.
- Dey, A. K. (2001). Understanding and Using Context. *Personal Ubiquitous Computing*, 5(1), 4-7.
- Dijkstra, E. W. (1959). A Note on two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269-271.
- Ding, D., Parmanto, B., Karimi, H. A., Roongpiboonsopit, D., Pramana, G., Conahan, T. & Kasemsuppakorn, P. (2007). Design Considerations for a Personalized Wheelchair Navigation System. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE on Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS'07)*, IEEE Press, New York, 4790-4793.
- Duckham, M. & Kulik, L. (2003). "Simplest" Paths: Automated Route Selection for Navigation. *Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory (CO-SIT'03)*, LNCS 2825, Springer, Heidelberg, 182-199.
- Ernst, R. (1999). Mobilitätsverhalten und Verkehrsteilnahme älterer Menschen. In: *Europäische Hochschulschriften - Reihe XXII Soziologie*. Europäischer Verlag der Wissenschaften, 15-26.
- Farmer, L. W. (1979). Mobility Devices. In R. L. Welsh et al. (Eds): *Foundations of Orientation and Mobility*. AFB Press, 357-402.
- Fernandez, J. A., Gonzalez, J., Mandow, L. & Perez-de-la-Cruz, J. L. (1999). Mobile Robot Path Planning: A Multicriteria Approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 12(4), 543-554.
- Fletcher, J. F. (1980). Spatial Representation in Blind Children. 1: Development Compared to Sighted Children. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 74(10), 381-385.

- Foote, K. E. & Lynch, m. (1996). Geographic Information Systems as an Integrated Technology: Context, Concepts and Definitions. *The Geographer's Craft Project (Technical Report)*. Department of Geography, University of Texas, Austin.
- Foxlin, E. (2005). Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 25(6), 38-46.
- Fraser, N. M. & Gilbert, G. N. (1991). Simulating Speech Systems. *Computer Speech and Language*, 5, 81-99.
- Fruchterman, J. (1995). Arkenstrone's orientation tools: Atlas Speaks and Strider. *Proceedings of the Conference on Orientation and Navigation Systems for Blind Persons*, Royal National Institute for the Blind, London.
- Fujimura, K. (1996). Path Planning with Multiple Objectives. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 3(1), 33-38.
- Ghiani, G., Guerriero, F., Laporte, G. & Musmanno, R. (2003). Real-time Vehicle Routing: Solution Concepts, Algorithms and Parallel Computing Strategies. *European Journal of Operational Research*, 151(1), 1-11.
- Golden, S. A. & Bateman, S. S. (2007). Sensor Measurements for Wi-Fi Location with Emphasis on Time-of-Arrival Ranging. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(10), 1185-1198.
- Golledge, R. G. (1993). Geography and the Disabled: A Survey with Special Reference to Vision Impaired and Blind Populations. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 18(1), 63-85.
- Golledge, R. G., Marston, J. R. & Costano, C. M. (1998). *Assistive Devices and Services for the Disabled: Auditory Signage and the Accessible City for Blind and Vision Impaired Traveler (Technical Report)*. Department of Geography, University of California, Santa Barbara.
- Goodman, J., Brewster, S. & Gray, P. (2005). How can we best use landmarks to support older people in navigation? *Behaviour and Information Technology*, 24(1), 3-20.
- Goodman, J., Gray, P., Khammampad, K. & Brewster, S. (2004). Using Landmarks to Support Older People in Navigation. *Proceedings of the 6th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (Mobile HCI'06)*, LNCS 3160, Springer, Heidelberg, 38-48.
- Goodwin, P. & Wright, G. (1998). *Decision Analysis for Management Judgement*. Chichester, England, John Wiley & Sons.

-
- Gould, J. D., Conti, J. & Hovanyecz, T. (1983). Composing letters with a simulated listening typewriter. *Communications of the ACM*, 26(4), 295-308.
- Granat, J. & Guerriero, F. (2003). The interactive analysis of the multicriteria shortest path problem by the reference point method. *European Journal of Operational Research*, 151(1), 103-118.
- Grimshaw, D. J. (1999). *Bringing Geographical Information Systems into Business*. John Wiley & Sons.
- Harper, S. & Green, P. (2000). A Travel Flow and Mobility Framework for Visually Impaired Travellers. *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP'00)*, Schriftenreihe der Österreichischen Computer-gesellschaft, 289-296.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J. & Raphael, B. (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics*, 4, 100-107.
- Helal, A., Moore, S. E. & Ramachandran, B. (2001). Drishti: An Integrated Navigation System for Visually Impaired People. *Proceedings of the 5th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'01)*, IEEE Press, New York, 149-156.
- Hildebrandt, N., Deubel, K. & Dick, M. (2001). "Mobilität" - Ein multidisziplinärer Begriff im Alltagsverständnis. *Harburger Beiträge zur Psychologie und Soziologie der Arbeit*, 23, 1-61.
- Hill, E. W. & Rieser, J. J. (1993). How Persons with Visual Impairments Explore Novel Spaces: Strategies of Good and Poor Performers. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 87(8), 295-301.
- Hill, L. L. (2006). *Georeferencing - The Geographic Association of Information*. MIT Press, Cambridge, USA.
- Holone, H., Misund, G. & Holmstedt, H. (2007). Users Are Doing It For Themselves: Pedestrian Navigation With User Generated Content. *Proceedings of the 2007 International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies (NGMAST '07)*, IEEE Press, New York, 91-99.
- Holone, H. & Misund, G. (2008). People Helping Computers Helping People: Navigation for People with Mobility Problems by Sharing Accessibility Annotations. *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP'08)*, LNCS 5105, Springer, Heidelberg, 1093-1100.

- Horstmann, M., Heuten, W., Miene, A. & Boll, S. (2006). Automatic Annotation of Geographic Maps. *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP'06)*, LNCS 4061, Springer, Heidelberg, 69-76.
- Howell, D. C. (2007). *Statistical Methods for Psychology*. Thomson Wadsworth.
- Hoyle, B., Fowler, J., Waters, D. & Withington, D. (2004). Development of the Electronic Guide Cane for Enhanced Primary Mobility for the Vision Impaired. *Online Proceedings of the Euro-Assist-CVHI 2004 Conference and Workshop on Assistive Technologies for Vision and Hearing Impairment*.
- Hunaiti, Z., Rahman, A., Denideni, M. & Balachandran, W. (2006). The Impact of Galileo on Pedestrians Navigation Systems. *Proceedings of the 16th International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP'06)*, IEEE Press, New York, 40-43.
- Jacobson, R. D. & Kitchin, R. M. (1997). GIS and People with Visual Impairments or Blindness: Exploring the Potential for Education, Orientation, and Navigation. *Transactions in Geographic Information Systems*, 2(4), 315-332.
- Jacobson, W. H. (1993). *The Art and Science of Teaching Orientation and Mobility to Persons with Visual Impairments*. AFB Press.
- Jameson, A. (2003). *Human-Computer Interaction Handbook*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Jirawimut, R., Ptasinski, P., Garaj, V., Cecelja, F. & Balachandran, W. (2003). A Method for Dead Reckoning Parameter Correction in Pedestrian Navigation System. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52(1), 209-215.
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. (2005). *Understanding GPS: Principles and Applications*. Artech House.
- Kawabata, M., Nishide, R., Ueda, M. & Ueshima, S. (2005). Graph-based Approach to Context-adaptable PNS and its Application Scenarios. *Proceedings of the 21st International Conference on Data Engineering*, IEEE Press, New York, 1250-1253.
- Kawabata, M., Nishide, R., Ueda, M. & Ueshima, S. (2005a). The Context-Adaptable Pedestrian Navigation System and Usability in Practical Settings. *Proceedings of the IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and signal Processing (PACRIM'05)*, IEEE Press, New York, 368-371.
- Keeney, R. L. & Raiffa, H. (1999). *Decision with Multiple Objectives*. Cambridge University Press.

-
- Kieras, D. & Polson, P. G. (1999). An Approach to the Formal Analysis of User Complexity. *International Journal of Human-Computer Studies*, 51(2), 405-434.
- Kirkwood, C. W. (1997). *Strategic Decision Making: Multiobjective Decision Analysis with Spreadsheets*. Duxbury Press, Belmont.
- Kitchin, R. M. (1994). Cognitive Maps: What are They and Why Study Them? *Journal of Environmental Psychology*, 15, 1-19.
- Kitchin, R. & Blades, M. (2002). *The Cognition of Geographic Space*. I. B. Tauris Publishers.
- Kleindorfer, P. R., Kunreuther, H. C. & Shoemaker, P. J. (1993). *Decision Sciences: An Integrative Perspective*. Cambridge University Press.
- Kurihara, M., Nonaka, H. & Yoshikawa, T. (2004). Use of Highly Accurate GPS in Network-Based Barrier-Free Street Map Creation System. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'04)*, IEEE Press, New York, 1169-1173.
- Lachapelle, G. (2004). GNSS Indoor Location Technologies. *Journal of Global Positioning Systems*, 3(1-2), 2-11.
- Lachapelle, G. (2007). Pedestrian Navigation With High Sensitivity GPS Receivers and MEMS. *Personal Ubiquitous Computing*, 11(6), 481-488.
- Läpple, D. (1995). Mobilität. In: *Handwörterbuch der Raumforschung*, Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), 649-651.
- Lee, S.-W. & Mase, K. (2002). Activity and Location Recognition Using Wearable Sensors. *Pervasive Computing*, 1(3), 24-32.
- Lewis, C., Polson, P. G., Wharton, C. & Rieman, J. (1990). Testing a Walkthrough Methodology for Theory-Based Design of Walk-Up-And-Use Interfaces. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'90)*, ACM Press, New York, 235-242.
- Liu, A. L., Hile, H., Kautz, H., Borriello, G., Brown, P. A., Harniss, M. & Johnson, K. (2006). Indoor Wayfinding: Developing a Functional Interface for Individuals with Cognitive Impairments. *Proceedings of the 8th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS'06)*, ACM Press, New York, 95-102.
- Loomis, J. M. (1985). *Digital Map and Navigation System for the Visually Impaired (Technical Report)*. Department of Psychology, University of California, Santa Barbara.

- Loomis, J. M., Golledge, R. G. & Klatzky, R. L. (2001). GPS-Based Navigation System for the Visually Impaired. In: *Barfield, W. & Caudell, T. (Eds.): Fundamentals of wearable computers and augmented reality*, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, 429-446.
- Loomis, J. M., Golledge, R. G., Klatzky, R. L., Speigle, J. M. & Tietz, J. (1994). Personal guidance system for the visually impaired. (S. 85-91). ACM Press.
- Loomis, J. M., Marston, J. R., Golledge, R. G. & Klatzky, R. L. (2005). Personal Guidance System for People with Visual Impairment: A Comparison of Spatial Displays for Route Guidance. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 99, 219-232.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Making*. John Wiley & Sons.
- Marble, D. F., Calkins, H. W. & Peuquet, D. J. (1984). *Basic Readings in Geographic Information Systems*. SPAD System Ltd.
- Marschark, M. & Harris, M. (1996). Success and Failure in Learning to Read: The Special (?) Case of Deaf Children. In *Cornoldi, C. & Oakhill, J. (Eds.): Reading Comprehension Difficulties: Processes and Intervention*, Lawrence Erlbaum Associates, 279-300.
- Marston, J. R. & Golledge, R. G. (1998). Removing Functional Barriers: Public Transit and the Blind and Vision Impaired. *Proceedings of the 1997 Society for Disability Studies 10th Annual Meeting*, Society for Disability Studies, Minneapolis.
- Marston, J. R. & Golledge, R. G. (2003). The Hidden Demand for Activity Participation and Travel by People with Vision Impairment or Blindness. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 97(8), 475-488.
- Marston, J. R., Golledge, R. G. & Constanzo, C. M. (1997). Investigating Travel Behavior of Nondriving Blind and Vision Impaired People: The Role of Public Transit. *The Professional Geographer*, 49(2), 235-245.
- Martins, E. Q. (1984). On a Multicriteria Shortest Path Problem. *European Journal of Operational Research*, 16, 236-245.
- Maulsby, D., Greenberg, S. & Mander, R. (1993). Prototyping and Intelligent Agent through Wizard of Oz. *Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM Press, New York, 277-284.
- May, A. J., Ross, T., Bayer, S. H. & Tarkiainen, M. J. (2003). Pedestrian Navigation Aids: Information Requirements and Design Implications. *Personal Ubiquitous Computing*, 7(6), 331-338.
- Meyers, A. R., Anderson, J. J., Miller, D. R., Shipp, K. & Hoenig, H. (2002). Barriers, Facilitators, and Access for Wheelchair Users: Substantive and Methodologic Lessons from a Pilot Study of Environmental Effects. *Social Science & Medicine*, 55(8), 1435-1446.

-
- Mitchell, C. & Suen, S. L. (1998). Urban Travel, Intelligent Transportation Systems, and the Safety of Elderly and Disabled Travelers. *Journal of Urban Technology*, 5(1), 17-43.
- Moore, G. T. & Golledge, R. G. (1976). Environmental Knowing: Concepts and Theories. In: *Moore, G. T. & Golledge, R. G. (Eds): Environmental Knowing*, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, 3-24.
- Morrongiello, B. A., Timney, B., Humphrey, G. K., Anderson, S. & Skory, C. (1995). Spatial Knowledge in Blind and Sighted Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 59(2), 211-233.
- Nigay, L. & Coutaz, J. (1993). A Design Space for Multimodal Systems: Concurrent Processing and Data Fusion. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'93)*, ACM Press, New York, 172-178.
- Pangilinan, J. M. & Janssens, G. K. (2007). Evolutionary Algorithms for the Multiobjective Shortest Path Problem. *International Journal of Computer and Information Science and Engineering*, 1(1), 54-59.
- Pascoe, J. (1998). Adding Generic Contextual Capabilities to Wearable Computers. *Proceedings of the Second IEEE International Symposium on Wearable Computers*, IEEE Press, New York, 92-99.
- Patel, K., Chen, M. Y., Smith, I. & Landay, J. A. (2006). Personalizing Routes. *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'06)*, ACM Press, New York, 187-190.
- Perfetti, C. A. & Sandak, R. (2000). Reading Optimally Builds on Spoken Language: Implications for Deaf Readers. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 5(1), 32-50.
- Petrie, H., Johnston, V., Strothotte, T., Raab, A., Fritz, S. & Michel, R. (1996). MOBIC: Designing a Travel Aid for Blind and Elderly People. *Journal of Navigation*, 49, 45-52.
- Pfitzmann, A. & Köhntopp, M. (2000). Anonymity, Unobservability, and Pseudonymity - A Proposal for Terminology. *Proceedings of the Workshop on Design Issues in Anonymity and Unobservability*, 1-9.
- Pitz, G. F. & McKillip, J. (1984). *Decision Analyses for Program Evaluations*. Sage Publications, Thousand Oaks.
- Pressl, B. & Wieser, M. (2006). A Computer-Based Navigation System Tailored to the Needs of Blind People. *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP'06)*, LNCS 4061, Springer, Heidelberg, 1280-1286.

- Pressl, B., Mayerhofer, B. & Wieser, M. (2007). PONTES und ODILIA - Zwei Systeme im Dienste der Blindennavigation. *Tagungsband Internationale Geodätische Woche Oberurgl*, Wichmann Verlag, 75-82.
- Ran, L., Helal, S. & Moore, S. (2004). Drishti: An Integrated Indoor/Outdoor Blind Navigation System and Service. *Proceedings of the Second IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'04)*, IEEE Press, New York, 23-30.
- Randell, C., Djiallis, C. & Muller, H. (2003). Personal Position Measurement Using Dead Reckoning. *Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'03)*, IEEE Press, New York, 166-175.
- Raubal, M. & Rinner, C. (2004). Multi-Criteria Decision Analysis for Location Based Services. *Proceedings of the 12th International Conference on Geoinformatics and Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic*, 47-53.
- Rehrl, K., Brunsch, S. & Mentz, H.-J. (2007). Assisting Multimodal Travelers: Design and Prototypical Implementation of a Personal Travel Companion. *IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems*, 8(1), 31-42.
- Rehrl, K., Leitinger, S., Brunsch, S. & Mentz, H. J. (2005). Assisting Orientation and Guidance for Multimodal Travelers in Situations of Modal Change. *Proceedings of the 8th International IEEE Conference in Intelligent Transportation Systems*, IEEE Press, New York, 407-412.
- Reilly, D., Dearman, D., Welsman-Dinelle, M. & Inkpen, K. (2005). Evaluating Early Prototypes in Context: Trade-offs, Challenges, and Successes. *IEEE Pervasive Computing*, 4(4), 42-50.
- Richton, B., Vannucci, G. & Wilkus, S. (2002). Assisted GPS for Wireless Phone Location — Technology and Standards. In *Tekinay, S. (Edt): Next Generation Wireless Networks*. Springer, Heidelberg, 129-155.
- Rinner, C. & Raubal, M. (2004). Personalized Multi-Criteria Decision Strategies in Location-Based Decision Support. *Journal of Geographic Information Sciences*, 10(2), 149-156.
- Ross, D. A. & Lightman, A. (2005). Talking braille: A Wireless Ubiquitous Computing Network for Orientation and Wayfinding. *Proceedings of the 7th international ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS'05)*, ACM Press, New York, 98-105.
- Ross, T., May, A. & Thompson, S. (2004). The Use of Landmarks in Pedestrian Navigation Instructions and the Effects of Context. *Proceedings of the 8th Conference on Human-*

-
- computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI'04)*, ACM Press, New York, 300-304.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hall, New York.
- Salber, D. & Coutaz, J. (1993). Applying the Wizard of Oz Technique to the Study of Multimodal Systems. *Selected papers from the Third International Conference on Human-Computer Interaction (EWHCI'93)*, LNCS 753, Springer, Heidelberg, 219-230.
- Sánchez, J. & Maureira, E. (2006). Subway Mobility Assistance Tools for Blind Users. *Universal Access in Ambient Intelligence Environments*, LNCS 4397, Springer, Heidelberg, 386-404.
- Schilit, B. N. & Theimer, M. M. (1994). Disseminating Active Map Information to Mobile Hosts. *IEEE Network*, 8(5), 22-32.
- Schilit, B., Adams, N. & Want, R. (1994). Context-Aware Computing Applications. *Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, IEEE Press, New York, 85-90.
- Sobek, A. D. & Miller, H. J. (2006). U-Access: A Web-Based System for Routing Pedestrians of Different Abilities. *Journal of Geographical Systems*, 8, 269-287.
- Soltani, A., Tawfik, H. & Fernando, T. (2002). A Multi-criteria Based Path Finding Application for Construction Site Layouts. *Proceedings of the Sixth International Conference on Information Visualisation (IV'02)*, IEEE Press, New York, 779-784.
- Stewart, B. S. & White, C. C. (1991). Multiobjective A*. *Journal of the ACM*, 38(4), 775-814.
- Strothotte, T., Fritz, S., Michel, R., Raab, A., Petrie, H., Johnson, V., Reichert, L. & Schalt, A. (1996). Development of Dialogue Systems for a Mobility Aid for Blind People: Initial Design and Usability Testing. *Proceedings of the Second Annual ACM Conference on Assistive Technologies (ASSETS'96)*, ACM Press, New York, 139-144.
- Sutcliffe, A. (2003). *Multimedia and Virtual Reality: Designing Multisensory User Interfaces*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Tarapata, Z. (2007). Selected Multicriteria Shortest Path Problems: Analysis of Complexity, Models and Adaptation of Standard Algorithms. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 17(2), 269-287.
- Thapar, N., Warner, G., Drainoni, M.-L., Williams, S., Ditchfield, H., Wierbicky, J. & Nesathurai, S. (2004). A Pilot Study of Functional Access to Public Buildings and Facilities for Persons with Impairments. *Disability and Rehabilitation*, 26(5), 280-289.

- Turk, M. & Robertson, G. (2000). Perceptual User Interfaces (Introduction). *Communications of the ACM*, 43(3), 32-34.
- Völkel, T. (2006). Personalized and Adaptive Navigation Based on Multimodal Annotation. *SIGACCESS Accessible Computing*, Issue 86, 4-7.
- Völkel, T. & Weber, G. (2006). Scenarios for Personalized Accessible Multimedia Messaging Services. *Universal Access in Ambient Intelligence Environments*, LNCS 4397, Springer, Heidelberg, 211-226.
- Völkel, T. & Weber, G. (2007). A New Approach for Pedestrian Navigation for Mobility Impaired Users Based on Multimodal Annotation of Geographical Data. *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction (HCI'07)*, LNCS 4551, Springer, Heidelberg, 575-584.
- Völkel, T., Kühn, R. & Weber, G. (2008). Mobility Impaired Pedestrians Are Not Cars: Requirements for the Annotation of Geographical Data. *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP'08)*, LNCS 5105, Springer, Heidelberg, 1085-1092.
- Völkel, T. & Weber, G. (2008). RouteCheckr: Personalized Multicriteria Routing for Mobility Impaired Pedestrians. *Proceedings of the 10th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS'08)*, ACM Press, New York, 185-192.
- Von Senden, S. (1932). *Space and Sight: The Perception of Space and Shape by the Congenitally Blind Before and After Operation*. The Free Press.
- Vujakovic, P. & Matthews, M. H. (1994). Contorted, Folded, Torn: Environmental Values, Cartographic Representation and the Politics of Disability. *Journal of Disability & Society*, 9(3), 359-374.
- Wahlster, W. & Kobsa, A. (1989). *User Models in Dialog Systems*. Springer, Heidelberg.
- Wallbaum, M. (2007). A Priori Error Estimates for Wireless Local Area Network Positioning Systems. *Pervasive Mobile Computing*, 3(5), 560-580.
- White, K. F. & Lutters, W. G. (2003). Behind the Curtain: Lessons Learned from a Wizard of Oz Field Experiment. *SIGGROUP Bulletin*, 24(3), 129-135.
- Winter, S. (2001). Weighting the Path Continuation in Route Planning. *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Advances in geographic information systems (GIS'01)*, ACM Press, New York, 173-176.
- Worchel, P. (1951). Space Perception and Orientation in the Blind. *Psychological Monographs*, 65, 1-28.

- Yao, X. & Fickas, S. (2007). Pedestrian Navigation Systems: A Case Study of Deep Personalization. *Proceedings of the 1st International Workshop on Software Engineering for Pervasive Computing Applications, Systems, and Environments (SEPCASE'07)*, IEEE Press, New York, 11-14.
- Yeung, W. M. & Ng, J. K. (2007). Wireless LAN Positioning based on Received Signal Strength from Mobile device and Access Points. *Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA'07)*, IEEE Press, New York, 131-137.
- Zimmermann, H.-J. & Gutsche, L. (1991). *Multi-Criteria Analysis*. Springer, Heidelberg.