

Datengetriebene Optimierung
präferenzadaptiver Fußwegrouten durch
Gebäudekomplexe

INAUGURAL-DISSERTATION ZUR ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE DER
FAKULTÄT FÜR SPRACH-, LITERATUR- UND KULTURWISSENSCHAFTEN DER
UNIVERSITÄT REGENSBURG

vorgelegt von
Manuel Ullmann
geboren am 5. April 1984 in Nürnberg

Regensburg 2019

Gutachter (Betreuer): Prof. Dr. Bernd Ludwig
Gutachterin: Prof. Dr. Sabine Timpf

Danksagungen

Mein Dank gilt allen, die es mir ermöglicht haben, an dem von mir gewählten Forschungsthema zu arbeiten und dieses im Rahmen der vorliegenden Dissertationschrift zu publizieren. In diesem wunderbaren Team aus interessierten KollegInnen unterschiedlicher Fachdisziplinen forschen und arbeiten zu können, bereitet mir große Freude.

Im Speziellen gilt mein Dank dem Erstgutachter und Betreuer meiner Arbeit, Bernd Ludwig, der mir immer wieder die Zweifel an meinen eigenen Ideen genommen hat, indem er sich mit auftretenden Problemstellungen und den von mir gewählten Lösungsansätzen befasst und diese mit mir diskutiert hat. Nur wenige DoktorandInnen haben sicherlich das Glück, jederzeit zum Kaffee mit ihrem Doktorvater oder ihrer Doktormutter sprechen zu können. Da Bernd nicht müde geworden ist, auf meine Nachfragen einzugehen, konnte ich meine Methodik in einer angenehmen Atmosphäre hinterfragen und dadurch verbessern.

Sabine Timpf möchte ich vielmals dafür danken, dass sie sich ohne zu zögern auf das Thema meiner Dissertation eingelassen und die Betreuung meiner Forschungsarbeit als Zweitgutachterin übernommen hat. Aufgrund Ihres umfassenden Wissens und tiefgehenden Verständnisses der Problemstellung sowie der Methodik meiner Forschungsarbeit konnte mir Sabine zahlreiche Aspekte aufzeigen, die, so hoffe ich, zu sinnvollen Ergänzungen meiner Dissertation geführt haben.

Mein besonderer Dank gilt weiterhin David Elsweiler, von dem ich schon während des Schreibens meiner Studien- und Diplomarbeit viel gelernt habe und der mich noch während des Studiums auf eine Zugfahrt nach Regensburg eingeladen hat, um mich dort näher mit Bernd bekannt zu machen. Seitdem hat mich David in allen wichtigen Fragen des Lebens, wie Ernährung und Kindererziehung, beraten. Auch zu jedem meiner informationswissenschaftlichen Probleme hatte David gute, interessante Ideen, da er es versteht, unterschiedliche Sichtweisen nachzuvollziehen und darauf einzugehen.

Markus Kattenbeck danke ich herzlich für die interessanten Nachhilfestunden von Statistik bis Walzer-Tanz, für spannende Diskussionen zu mathematischen Rätseln und für hilfreiche Lese-Empfehlungen. Über seine vielen freundlichen Gesten habe ich mich immer sehr gefreut und ich habe mich nicht zuletzt durch ihn von Anfang an willkommen in Regensburg gefühlt.

Kaum aufzählen kann ich die unterschiedlichen Themengebiete, in denen Florin Schwappach meine Sichtweise geprägt hat, nicht nur während unserer gemeinsamen Zeit am Lehrstuhl für Informationswissenschaft. Dass er allen Dingen aufgeschlossen und voller Neugierde entgegenblickt, ist vermutlich ein Grund, dass ich ihm nicht nur für unsere Gespräche über nichtlineare Optimierung, sondern auch für den Austausch über Philosophie, Musik und Malerei dankbar bin.

Meiner geliebten Frau Caroline und meiner Tochter Aurélie danke ich, dass sie für mich da waren und mich aufgemuntert haben, wenn ich genervt vom Schreiben und von den Präferenzen desorientierter Fußgänger war. Eure Liebe gab mir die Kraft durchzuhalten und meine Forschungsergebnisse zusammenzuschreiben. So sehr es mich selbst begeistert, zu forschen, so sehr lasse ich jeden Tag, dass der Forschungsdrang meiner Tochter den meinen übersteigt. Sie darin zu unterstützen, gemeinsam mit Caroline daran teilzuhaben, gibt meinem Leben einen tiefen Sinn.

Abstract

Even those who know their destination may find it difficult to reach, especially in building complexes such as universities, hospitals or airports, in which it is easy to get lost. In spite of the resulting demand pedestrian navigation systems through indoor spaces are rarely found. Contrary to outdoor areas suitable map material is not comprehensively available. In addition, positioning is a challenging task that many research projects are currently dedicated to. One question that arises in this emerging field of research is how generated paths should be structured to meet the needs of different individuals or user groups. Related work tends to focus on the impact of a small number of isolated criteria. For example, there are efforts to generate scenically appealing routes. In different studies, paths that are as memorable as possible are planned. However, the optimisation of the interplay of different, partly interdependent path characteristics is mostly neglected, as is also the case regarding car navigation.

The aim of this work is therefore to show a procedure that quantifies the optimal proportional influence of different operationalized criteria, so that their interaction can be taken into account for path planning. The data driven optimization is carried out with regard to a similarity measure between routes of the system and a ground truth comprising paths preferred by users.

The realisation of this intention requires various preliminary works. First, a formal model is developed that is suitable for mapping an environment consisting of indoor and outdoor areas, so that routes can be generated by automated means.

With reference to related work, terms such as preference-based path planning or similarity to user routes for the context of this work are defined. The environment of the University of Regensburg is mapped by means of the specified model. As a basis for the optimisation process, a ground truth consisting of routes favoured by people is surveyed. By applying a CMA evolution strategy, the manifestations of some easily determinable path properties are then optimised so that a maximum of the similarity function results. Finally, the resulting path planning process is evaluated by showing that generated routes are more similar to user routes than shortest routes in terms of the defined measurement.

Zusammenfassung

Auch wer sein Ziel kennt, dem mag es schwer fallen, es zu erreichen, insbesondere in Gebäudekomplexen, wie Universitäten, Krankenhäuser oder Flughäfen, in denen man schnell die Übersicht verliert. Trotz des resultierenden Bedarfs sind Fußgängernavigationssysteme durch Innenbereiche kaum verbreitet. Im Gegensatz zu Außenbereichen ist geeignetes Kartenmaterial nicht flächendeckend verfügbar und auch die Positionsbestimmung stellt eine Herausforderung dar, der sich aktuell zahlreiche Forschungsarbeiten widmen. Eine Fragestellung, die sich in diesem jungen Forschungsfeld der Planung von Fußwegrouten stellt, ist, wie generierte Pfade aufgebaut sein sollten, um die Bedürfnisse verschiedener Personen oder Personengruppen zu erfüllen. Einschlägige Arbeiten befassen sich meist mit den Auswirkungen weniger, separat betrachteter Kriterien. So existieren beispielsweise Bestrebungen, szenisch reizvolle oder alternativ möglichst einprägsame Routen zu generieren. Was dabei, wie im Übrigen auch bei der Fahrzeugnavigation, häufig noch außer Acht gelassen wird, ist, das Zusammenspiel verschiedener, teils gegenseitig abhängiger Pfadeigenschaften zu optimieren.

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, ein Verfahren aufzuzeigen, das verschiedene operationalisierte Kriterien in Bezug zueinander setzt, indem deren optimaler anteiliger Einfluss auf die Routenberechnung quantifiziert wird. Die datengetriebene Optimierung erfolgt dabei hinsichtlich eines Ähnlichkeitsmaßes zwischen Routen des Systems und eines Referenzstandards aus von Nutzern präferierten Pfaden.

Die Umsetzung dieses Vorhabens bedingt verschiedener Vorarbeiten. So wird zunächst ein formales Modell erarbeitet, das geeignet ist, aus Innen- und Außenbereichen bestehende Areale abzubilden, sodass Routen darin automatisiert geplant werden können. Unter Bezugnahme einschlägiger Arbeiten werden Begrifflichkeiten wie präferenzbasierte Pfadplanung oder Ähnlichkeit zu Nutzer routen für den Kontext dieser Arbeit definiert. Die Umgebung der Universität Regensburg wird anhand des spezifizierten Modells abgebildet, als Grundlage der Optimierung wird dort ein Referenzstandard, bestehend aus von Personen favorisierten Routen, erhoben. Mittels einer CMA-Evolutionsstrategie werden dann beispielhaft einige leicht zu ermittelnde Pfadeigenschaften optimiert, sodass sich ein Maximum der Ähnlichkeitsfunktion ergibt. Abschließend wird die resultierende Pfadplanung evaluiert, indem gezeigt wird, dass generierte Routen hinsichtlich des definierten Maßes ähnlicher zu Nutzer routen sind als kürzeste Routen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
1.1 Problemstellung	7
1.2 Einordnung in die Projekte <i>URwalking</i> und <i>NADINE</i>	8
1.3 Aufbau der Arbeit	10
2 Modellierung der Umgebung	12
2.1 Anforderungen an das Umgebungsmodell	12
2.2 Forschungsstand	15
2.2.1 Semantisches Modell	16
2.2.2 Zellbasiertes Modell	18
2.2.3 Umrissbasiertes Modell	18
2.2.4 Mengenbasiertes und hierarchisches Modell	19
2.2.5 Graphbasiertes Modell	20
2.2.6 Modellkombinationen	21
2.3 Spezifikation des Umgebungsmodells	23
2.3.1 Hierarchische Aufteilung	24
2.3.2 Graphbasiertes Modell	25
2.3.3 Semantisches Modell	27
2.3.4 Geometrische Merkmale	39
2.4 Technische Umsetzung	40
2.4.1 XML-Format	41
2.4.2 Hierarchische Aufteilung	42
2.4.3 Graphbasiertes Modell	43
2.4.4 Arealnodes	46
2.4.5 Transformation lokaler Koordinaten in ein globales Referenzsystem	47
2.5 Modellierungsapplikation	53
3 Präferenzbasierte Pfadplanung	58
3.1 Forschungsstand	58
3.1.1 Alternativen zu kürzesten und schnellsten Routen	59
3.1.2 Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen bei der Navigation	61

3.1.3	Fahrzeugnavigation	63
3.1.4	Fußgängernavigation	68
3.1.5	Datengetriebene Ansätze	78
3.1.6	Fazit	81
3.2	Nutzerstudien	83
3.3	Pfadplanung	89
3.3.1	Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung	89
3.3.2	Hierarchische Pfadplanung	94
3.3.3	Pfadplanung mit A*	96
3.3.4	Technische Umsetzung	96
3.4	Limitationen der präferenzbasierten Pfadplanung	97
3.4.1	Berücksichtigung individueller Präferenzen	98
3.4.2	Berücksichtigung verschiedener Merkmale	100
3.4.3	Separierbarkeit der Routenelemente	103
3.4.4	Skalierbarkeit der Pfadplanung	104
4	Erlernen der Nutzerpräferenzen	106
4.1	Erstellung eines Referenzstandards	107
4.1.1	Durchführung der Studie	107
4.1.2	ProbandInnen	109
4.2	Analyse der gesammelten Daten	111
4.3	Qualitätsmaß	118
4.4	Optimierung	122
4.4.1	Optimierungsverfahren	123
4.4.2	Evolutionsstrategie	126
4.4.3	Festlegung eines Vokabulars	127
4.4.4	Optimierung der <i>Parameter</i>	127
4.4.5	Entwicklung des Algorithmus	131
4.4.6	CMA-ES	134
4.4.7	Ergebnisse des Racing-Algorithmus	135
4.4.8	Ergebnisse der Optimierung	138
4.5	Evaluation und Interpretation der Ergebnisse	142
4.5.1	Evaluation	142
4.5.2	Interpretation	144
4.5.3	Übertragbarkeit	165
5	Fazit	173
5.1	Zusammenfassung	173
5.2	Wissenschaftliche Verwertbarkeit der Arbeit	175
5.3	Ausblick	178

A Anhang	182
A.1 XML Schema Definition des Umgebungsmodells	182
A.2 Technische Spezifikation möglicher Nutzerprofile	185
Glossar	186
Literaturverzeichnis	189
Abbildungsverzeichnis	201
Tabellenverzeichnis	204

„Sich in einer Stadt nicht zurechtfinden heißt nicht viel. In einer Stadt sich aber zu verirren, wie man in einem Walde sich verirrt, braucht Schulung.“

Walter Benjamin,

Berliner Kindheit um Neunzehnhundert,

aus: Städtebilder, Frankfurt a. M. 1963, Kapitel 6

„Die Natur kommt auf dem kürzesten Weg zu ihrem Ziel. Dies ist richtig; aber der Weg des Geistes ist die Vermittlung, der Umweg.“

Georg Wilhelm Friedrich Hegel,

Vorlesungen über die Geschichte der Philosophie I,

aus: Werke in 20 Bänden, Band 18, Frankfurt a. M. 1971, Einleitung A.3.a

1. Einleitung

Jene geneigten LeserInnen, welche ihre Wege jemals an die Universität Regensburg geführt haben, können sich in die Problematik, die es im Rahmen meiner hier vorliegenden Dissertation zu lösen gilt, sicherlich gut eindenken. Würden sie sich bemühen, die Betonanlagen am Campus zu erkunden, so könnten sie dabei grob 20 einzelne Gebäude unterscheiden, welche auf verschiedenen Ebenen vernetzt sind. In den ersten Jahren, die StudentInnen und MitarbeiterInnen neu an der Universität sind, müssen sie lernen, die zahlreichen ähnlich aufgebauten Korridore, wie sie Abbildung 1.1 dargestellt sind, voneinander zu unterscheiden, um bei der Suche nach einem Ausgang nicht im Kreis zu laufen. Wer darin bereits geübt ist, mag versuchen, die täglichen Routen reizvoller zu gestalten, indem Wege über die Dächer einzelner Gebäude oder durch die Tiefstraßen, welche sich unter dem gesamten Campus erstrecken, erkundet werden.

Zahlreiche Publikationen belegen, dass es Personen auch abseits dieser lokalen Probleme nicht leicht fällt, sich in öffentlichen Gebäuden zurecht zu finden. Als charakteristische Beispiele solcher Gebäude bzw. Gebäudekomplexe nennen T. Becker, Nagel und Kolbe (2008); Butler, Acquino, Hissong und Scott (1993); Carlson, Hölscher, Shipley und Dalton (2010); Hölscher, Meilinger, Vrachliotis, Brösamle und Knauff (2006); Hölscher, Vrachliotis und Meilinger (2006); Lorenz und Ohlbach (2006); Lorenz, Ohlbach und Stoffel (2006); Wener und Kaminoff (1983) neben

1. Einleitung

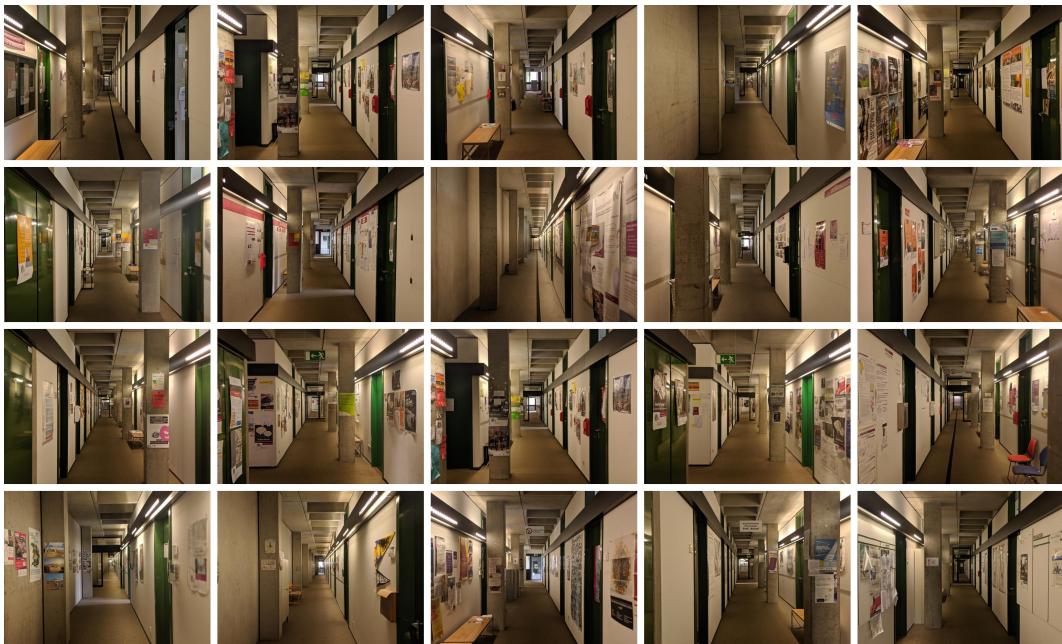


Abbildung 1.1: Gleich und doch verschieden: Zwanzig räumlich getrennt liegende, aber zum Verwechseln ähnliche Korridore an der Universität Regensburg

Universitäten weiterhin Krankenhäuser, Flughäfen, Bibliotheken, Bahnhöfe, Supermärkte, Bürokomplexe, Konferenz-, Einkaufszentren sowie Gefängnisse. Carlson et al. (2010) zitieren den Kommentar eines Besuchers der Seattle Central Library, der schreibt, dass er selbst nach zwei Jahren, in denen er die Bibliothek wöchentlich besucht habe, im Falle eines Feuers den Ausgang vermutlich nicht finde. Weiterhin berichten die Autoren nach Peponis, Zimring und Choi (1990) von einem mit hundert Betten bestückten Krankenhaus, das architektonisch explizit mit dem Ziel angelegt worden sei, die Orientierung einfach zu gestalten. Dennoch würden einige Patienten nur ungern ihre Zimmer verlassen, um beispielsweise das Fernsehzimmer oder die Trainingshallen aufzusuchen, da sie fürchten müssten, den Weg zurück nicht zu finden. Den Angaben von Butler et al. (1993) folgend verbrachten MitarbeiterInnen der Ball State University teilweise über eine Stunde pro Woche damit, orientierungslosen StudentInnen den Weg zu weisen. Pro Jahr würden sich über 100 vermeintliche ProbandInnen verschiedener dort durchgeföhrter Studien so sehr verlaufen, dass sie niemals an den vereinbarten Treffpunkten ankämen. Die Schwierigkeit, sich in Flughäfen zurechtzufinden, wird von Fewings (2001) beschrieben. Als kennzeichnend führen die Autoren den Dallas Fort Worth airport auf, bei dem direkt nach der Eröffnung 34 Servicemitarbeiter eingestellt werden mussten, deren Aufgabe es war, Passagiere durch das Terminalgebäude zu leiten.

Diese einführenden, eher unterhaltsamen Beispiele stellen für die beteiligten orientierungssuchenden Personen jedoch zeitraubende, unangenehme, teils trauma-

tische Erlebnis dar (siehe Conners, 1983; Dogu & Erkip, 2000; Fewings, 2001; Zimring, 1981). Zimring (1981) führt verschiedene Studien auf, die belegen, dass Orientierungslosigkeit zu Wut- und Angstzuständen führen kann, und zitieren zur Veranschaulichung einen Nachrichtenartikel mit dem Titel „Travellers go crazy in big Dallas-Fort Worth Airport“ (Kilday, 1979), in dem die Verzweiflung eines Hochschullehrers geschildert wird, der sich als Folge seiner Desorientierung am bereits erwähnten Dallas Fort Worth airport seiner Kleider entledigte, während er mathematische Gleichungen rezitierte.

Dass es speziell in Gebäuden zu Orientierungsproblemen kommt, kann damit begründet werden, dass deren Topologie laut Lorenz et al. (2006) sehr viel diverser sei als die des Verkehrsnetzes. Es handele sich nicht vorwiegend um eindimensionale Strukturen, wie sie von einer Straße vorgegeben werden, sondern, nach Hölscher, Vrachliotis und Meilinger (2006), um zweidimensionale Flächen, die zusätzlich durch Etagenübergänge miteinander verbunden seien. Neben der Komplexität der Umgebung führen Carlson et al. (2010) auf, dass die Wegfindung nach Weisman (1981) durch eingeschränkte Sicht und durch Gebäude Teile, die ähnlich aussehen und deshalb leicht miteinander verwechselt werden könnten, beeinflusst sei – die Korridore in Abbildung 1.1 stellen dies anschaulich dar. Mögen sich die LeserInnen nun selbst den Weg durch die Kapitel dieser Dissertation bahnen, ohne sich darin zu verlieren.

1.1 Problemstellung

Wie T. Becker et al. (2008) dokumentieren, hätten Fahrzeugnavigationssysteme aufgrund satellitengestützter Positionsbestimmungssysteme sowie weiterhin aufgrund einer flächendeckenden Verfügbarkeit der Topologie von Straßennetzen zu weiter Verbreitung gefunden. Das Fehlen dieser Voraussetzungen in Innenbereichen ist laut der Autoren ein Grund, warum Fußgängernavigationssysteme trotz des Bedarfs bisher nur selten im Einsatz seien, sie schaffen somit die Grundlage eines noch jungen Forschungsfeldes.

Die fehlende Positionsbestimmung außer Acht lassend, wird im Rahmen dieser Dissertation ein durch Maschinen verarbeitbares Modell des Geländes der Universität Regensburg erstellt, auf dessen Grundlage ein System zur Routenberechnung entwickelt und erprobt wird. Dieses kann Anfragen von einem Fußgängernavigationssystem erhalten, das die Routen dann zur Anzeige bringt, sodass StudentInnen ihre Ziele zumindest an der Universität Regensburg zunehmend erreichen mögen.

Im Rahmen dieser Entwicklung ergibt sich als speziellere Fragestellung, welche Pfade bei gegebenen Start- und Zielorten gewählt werden sollten, um sie den NutzerInnen des Navigationssystems zu präsentieren. Dass Personen weder kürzeste noch schnellste Routen bevorzugen, wird in Kapitel 3 „Präferenzbasierte Pfadplanung“

anhand einschlägiger Publikationen gezeigt. Weiterhin werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die alternative Ansätze aufzeigen, die in Fahrzeug- oder Fußgängernavigationssystemen zur Anzeige gebracht werden können. Dabei dienen empirische Daten realer Personen jedoch häufig nur zur Evaluation der Ergebnisse und werden selten als Grundlagen solcher Verbesserungen herangezogen. Gerade aufgrund der nicht hinreichend verfügbaren Positionsbestimmung in Innenbereichen lassen sich Fußwegrouten nur aufwändig protokollieren. Dies mag einer der Gründe sein, warum von mir als Autor im Zuge meiner Recherche keine Forschungsarbeit gefunden werden konnte, die eine skalierbare datengetriebene Anpassung von Fußwegrouten beschreibt, um Bedürfnisse oder Vorlieben der NutzerInnen zu berücksichtigen. Das Kernthema dieser Dissertation bildet deshalb eine solche datengetriebene Berechnung von Fußwegrouten, um die Eigenschaften präferierter Pfade realer Personen automatisiert nachzubilden. Somit soll diese Arbeit einen Beitrag zur Schließung der aufgezeigten Lücke der aktuellen Forschung liefern.

1.2 Einordnung in die Projekte *URwalking* und *NADINE*

Diese Forschungsarbeit bildet einen Baustein des unter der Leitung meines Doktorvaters Bernd Ludwig entwickelten Campus-Navigationssystems mit dem Projekttitle *URwalking*. Die Entwicklung des Gesamtsystems umfasst zahlreiche weitere Themengebiete, die von MitarbeiterInnen des Lehrstuhls für Informationswissenschaft bearbeitet werden und welche sich von den Zielen der vorliegenden Arbeit abgrenzen lassen. Wie bereits geschrieben, stellt die Positionsbestimmung in Innenbereichen ein grundlegendes Forschungsfeld dar, diesem hat sich Robert Jackermeier gewidmet (siehe Jackermeier & Ludwig, 2018a, 2018b). Einfacher nachzuvollziehende Beschreibungen von Routen werden durch die Arbeit von Markus Kattenbeck ermöglicht (siehe Kattenbeck, 2016). Datengetrieben wird dazu ermittelt, welche Aspekte die Auffälligkeit von Landmarken beeinflussen und wie diese Salienz bemessen werden kann. Christina Bauer geht der Frage nach, welche Arten von Objekten speziell in Innenbereichen geeignet sind, um NutzerInnen die Orientierung zu erleichtern und in welcher Form berechnete Pfade optimalerweise dargestellt werden sollten (siehe Bauer, 2018).

Das entwickelte Navigationssystem *URwalking* steht NutzerInnen an der Universität Regensburg seit Ende 2015 zur Verfügung. Berechnete Routen werden von einer Web-Applikation, die von verschiedenen studentischen Hilfskräften entwickelt und gepflegt wird, sowie von einer nativen Android-Applikation, die von Robert Jackermeier im Rahmen seiner Forschungsarbeit implementiert wird, abgerufen und den NutzerInnen präsentiert. Abbildung 1.2 zeigt die Besucherzahlen der beiden Systeme zum Start des Sommersemesters 2019. Ein Besuch der Web-Applikation wird hierbei gezählt, wenn seit der letzten Aktivität mindestens 30 Minuten vergangen

sind. Personen, die sich aus Datenschutzgründen gegen die Erhebung ihrer Daten entscheiden, werden nicht berücksichtigt. Ein Besuch der Android-Applikation wird gewertet, wenn die Applikation auf dem Smartphone gestartet wird.

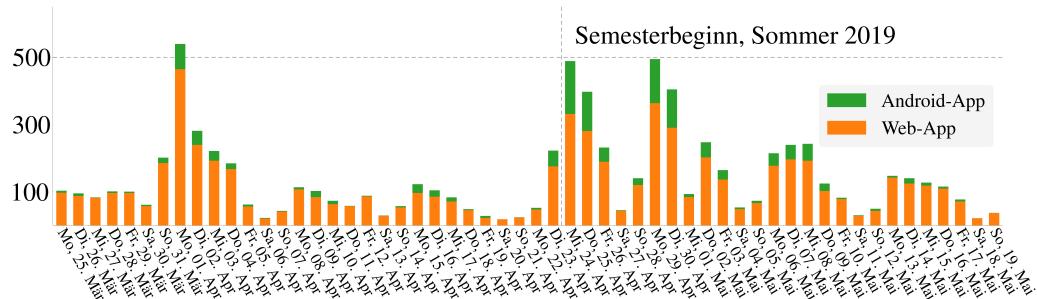


Abbildung 1.2: Besucher der *URwalking*-Navigationssysteme zum Start des Sommersemesters 2019

Die Web-Applikation hat im letzten Jahr (zum derzeitigen Stand im August 2019) pro Tag im arithmetischen Mittel 76 Besucher registriert. Seit die native Applikation im September 2018 allgemein verfügbar ist, hat es damit pro Tag durchschnittlich 16 Aufrufe gegeben.

Anforderungen an das zu entwickelnde System, welche genauer in Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“ beschrieben sind, resultieren also einerseits aus diesem universitären Projekt. Weiterhin bringt das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Drittmittelprojekt *NADINE* (Navigation im öffentlichen Personenverkehr mit modularer Dienste-Architektur zur Einbindung in externe Applikationen) verschiedene Vorgaben mit sich. Zielsetzung des Projektes ist die Entwicklung einer mobilen Applikation, welche NutzerInnen in den Pilotregionen Nürnberg und Erfurt bei ihren Reisen im öffentlichen Nahverkehr unterstützt. Neben verschiedenen zuschaltbaren Modulen, die beispielsweise den Erwerb von Fahrkarten ermöglichen können, sollen den NutzerInnen Routen präsentiert werden, die zusätzlich zu den Verkehrsmitteln auch Fußwege an Umstiegpunkten, wie Bahnhöfen, umfassen. Die Berechnung der Fußwegrouten erfolgt seitens des Lehrstuhls für Informationswissenschaft als Projektpartner. Die im Rahmen des Projekts *NADINE* entwickelten Module ergeben sich zum Teil aus den in dieser Dissertation erarbeiteten Resultaten, an einigen Stellen wird deshalb darauf hingewiesen, dass sich das konkrete Vorgehen dieser Forschungsarbeit nach Vorgaben des Projektes richtet.

Im Rahmen verschiedener studentischer Arbeiten sind auch Umgebungsmodelle für das Donaueinkaufszentrum in Regensburg sowie für einige Gebäude der Technischen Universität Berlin und der Universität Augsburg entstanden. Diese haben jedoch nur geringen Einfluss auf die in der vorliegenden Arbeit aufgezeigten Entwicklungen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Um Pfade durch die Gebäude der Universität Regensburg sowie durch den umgebenden Campus automatisiert ermitteln zu können, müssen die dafür notwendigen Umgebungsinformationen zunächst in ein maschinenverarbeitbares Format gebracht werden. In Kapitel 2 „Modellierung der Umgebung“ werden deshalb in Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“ zunächst die Erfordernisse zusammengefasst, die es zur Spezifikation eines geeigneten Modells zu berücksichtigen gilt. Verschiedene grundsätzliche Modellierungsansätze und deren Kombinationsmöglichkeiten werden in Abschnitt 2.2 „Forschungsstand“ anhand einiger Übersichtsarbeiten vorgestellt. Die endgültige Modelldefinition für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Routenberechnung wird dann in Abschnitt 2.3 „Spezifikation des Umgebungsmodells“ zusammengefasst, in Abschnitt 2.4 „Technische Umsetzung“ wird dabei auf praktische Details eingegangen. Eine Applikation, die die modellkonforme Konstruktion verschiedener Areale erleichtert, wird in Abschnitt 2.5 „Modellierungsapplikation“ präsentiert.

Wie Routen automatisiert unter Beachtung von Nutzerpräferenzen ermittelt werden können, ist Thema des Kapitels Präferenzbasierte Pfadplanung. Anhand einschlägiger Publikationen werden dort in Abschnitt 3.1 „Forschungsstand“ zahlreiche Alternativen zu kürzesten und schnellsten Routen, sowohl im Rahmen der Fahrzeugnavigation als auch der Fußgängernavigation, aufgezeigt. Wie bereits erwähnt, begründet sich aus dieser Übersicht die Relevanz des im Rahmen der vorliegenden Arbeit verfolgten datengetriebenen Ansatzes. In Abschnitt 3.2 „Nutzerstudien“ werden zwei durchgeführte Erhebungen beschrieben, mittels derer vorab erörtert werden soll, ob die durch das erstellte Modell unmittelbar zur Verfügung stehenden Umgebungseigenschaften geeignet sind, Routen besser an Nutzerpräferenzen anpassen zu können. Das algorithmische Vorgehen zur präferenzgesteuerten Routenermittlung wird dann in Abschnitt 3.3 „Pfadplanung“ erläutert, in Abschnitt 3.4 „Limitationen der präferenzbasierten Pfadplanung“ wird auf Einschränkungen eingegangen, welche aus dem gewählten Ansatz resultieren.

In Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ wird das Optimierungsproblem der datengetriebenen Anpassung von Pfadverläufen vorgestellt. Zunächst wird in Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“ die Erhebung präferierter Routen realer Personen beschrieben. Eine Übersicht über die gesammelten Daten findet sich darauffolgend in Abschnitt 4.2 „Analyse der gesammelten Daten“. Das zu optimierende Konstrukt der Ähnlichkeit generierter Routen zu von NutzerInnen präferierten Routen wird in Abschnitt 4.3 „Qualitätsmaß“ operationalisiert. Die Maximierung der dadurch quantifizierbaren Routenähnlichkeit erfolgt in Abschnitt 4.4 „Optimierung“. Das Kapitel schließt in Abschnitt 4.5 „Evaluation und Interpretation der Ergebnisse“

mit einer Diskussion des ermittelten Optimums, dabei wird untersucht, inwieweit sich die Ergebnisse auf die Umgebung eines Einkaufszentrums übertragen lassen.

In Kapitel 5 „Fazit“ werden die wesentlichen Schwerpunkte der Dissertation in Abschnitt 5.1 „Zusammenfassung“ resümiert, es folgt eine Wertung des wissenschaftlichen Beitrags in Abschnitt 5.2 „Wissenschaftliche Verwertbarkeit der Arbeit“ sowie in Abschnitt 5.3 „Ausblick“ einige Überlegungen zu zukünftigen Arbeiten, die sich an die aufgezeigte Forschung anschließen mögen.

An verschiedenen Stellen werden komplexere Sachverhalte einmalig erläutert, um diese anschließend anhand eingeführter Fachbegriffe referenzieren zu können. Die Vorteile eines verbesserten Leseflusses durch Streichung redundanten Erklärungen überwiegen in diesen Fällen sicherlich die Nachteile der für die LeserInnen notwendigen Rekapitulation definierter Begriffe. Um es den LeserInnen einfach zu gestalten, diese Termini zu erkennen und auch nach einer Leseunterbrechung einordnen zu können, werden diese kursiv gesetzt und zusätzlich zu den jeweiligen Erklärungen in den einführenden Abschnitten im Glossar auf Seite 186 zusammengefasst.

2. Modellierung der Umgebung

Eine wichtige Voraussetzung, um Routen berechnen und anzeigen zu können, ist, dass Umgebungsinformationen in einer maschinell verarbeitbaren Form vorliegen. Hierfür bedarf es vorab einer genauen Spezifikation eines Umgebungsmodells, die in diesem Kapitel herausgearbeitet wird. Getroffene Spezifikationen sowie die in Abschnitt 2.5 „Modellierungsapplikation“ beschriebene Plattform sind in Teilen bereits in den Publikationen Kattenbeck, Ullmann (geb. Müller), Ohm und Ludwig (2015); Ohm, Ullmann (geb. Müller) und Ludwig (2015); Ullmann (geb. Müller), Ohm und Ludwig (2014) veröffentlicht worden. Um den Aufbau eines solchen Modells formal zu definieren, müssen, je nach gegebenem Szenario, unterschiedliche Anforderungen berücksichtigt werden. Der folgende Abschnitt gibt deshalb zunächst eine Übersicht über die Rahmenbedingungen, die sich im Speziellen aus der hier behandelten Forschungsfrage sowie aus den Projekten *URwalking* und *NADINE* ergeben. Darauf folgend werden existierende Ansätze beschrieben und deren Eignung für den dargelegten Anwendungsfall diskutiert. Die aufgezeigten Überlegungen werden in Abschnitt 2.3 „Spezifikation des Umgebungsmodells“ zusammengefasst und die daraus resultierenden Entscheidungen dargestellt. In Abschnitt 2.4 „Technische Umsetzung“ wird dann detaillierter auf die konkrete Vorgehensweise eingegangen. Abschließend wird in Abschnitt 2.5 „Modellierungsapplikation“ eine webbasierte Applikation zur Erstellung spezifikationskonformer Umgebungsmodelle vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit implementiert worden ist.

2.1 Anforderungen an das Umgebungsmodell

Für das im Rahmen dieser Forschungsarbeit erstellte Navigationssystem steht zunächst im Vordergrund, eine Route unter Einbezug verschiedener Präferenzen planen zu können. Die ermittelte Route soll NutzerInnen des Navigationssystems dann präsentiert werden können, wobei zunächst offen gewesen ist, welche Art der Präsentation sich als geeignet erweisen würde.

Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsszenarien ist es notwendig, mehrere unterschiedliche Möglichkeiten zur Auswahl des Start- und Zielortes bereitzustellen. Im Kontext des Projekts *NADINE* lassen sich Start- und Zielpunkte mittels interner Identifikationsnummern für Haltemasten zuordnen, die bei jeder Routenanfrage

vom Gesamtsystem bereitgestellt werden. Für das Campus-Navigationssystem, das MitarbeiterInnen und StudentInnen zur Verfügung gestellt werden kann, gibt es weitere Szenarien, für die mehr Informationen als eine einzelne Identifikationsnummer hinterlegt werden müssen. So könnten NutzerInnen Kenntnis über Raumnummern, Raumbezeichnungen oder Personen haben, um ihren gewünschten Zielort zu beschreiben. Auch die Angabe einer ungefähren Lage, wie dem anzusteuernden Gebäude oder Stockwerk, könnte helfen, eine Ergebnisliste einzuschränken. Ein weiterer für die Navigation auf dem Smartphone wichtiger Anwendungsfall ist es, einen Startpunkt mittels vom Mobiltelefon bereitgestellter geographischer Koordinaten festlegen zu können. Diese Interaktionsmöglichkeiten besitzen eher beispielhaften Charakter. Das Umgebungsmodell sollte somit die für die genannten Anwendungsfälle notwendigen Informationen, wie Raumnummern, Raumbezeichnungen oder geographische Koordinaten, speichern, weiterhin aber dynamisch an weitere Anforderungen angepasst werden können. Eine genauere Untersuchung, wie die Start- und Zielauswahl möglichst nutzerfreundlich gestaltet werden könnte, verbleibt als Thema zukünftiger Forschungsarbeiten.

Nachdem Start- und Zielort bekannt sind, müssen mittels des zu spezifizierenden Modells mögliche Verbindungen zwischen diesen abgefragt werden können. Aus der Forschungsfrage, wie Pfadverläufe an Nutzerpräferenzen anzupassen sind, resultiert die Bestrebung, den genauen Verlauf einer Route auf der Ebene einzelner Straßen und Gänge ermitteln zu können. So sollen verschiedene Umgebungsinformationen entlang der Route, die möglicherweise Einfluss auf die Entscheidung eines Nutzers nehmen, einen bestimmten Weg auszuwählen, mit in die Planung einbezogen werden können.

Die Modelle sollen zum einen den Campus und die Gebäude der Universität Regensburg abdecken. Darüber hinaus haben im Rahmen des Projekts *NADINE* Knotenpunkte des öffentlichen Nahverkehrs in den Pilotregionen Nürnberg und Erfurt modelliert werden müssen, um NutzerInnen beim Umstieg an Haltestellen unterstützen zu können. Zu berechnende Routen müssen gegebenenfalls jeweils durch mehrere Stockwerke unterschiedlicher Gebäude und auch durch Außenbereiche verlaufen.

Sowohl an der Universität als auch an den Verkehrsknotenpunkten existiert Kartensmaterial, das als Modellierungsgrundlage genutzt werden kann. Zu den Gebäuden der Universität liegen Vektorgrafiken der genordeten Architekturpläne vor. Die einzelnen Objekte in diesen Grafiken sind nicht gruppiert, sodass es beispielsweise auf direktem Wege nicht möglich ist, alle Türen herauszufiltern. Neben Raumnummern und größtenteils veralteten Raumbezeichnungen sind auch für die Navigation irrelevante Informationen, wie Kabelschächte und Betonsäulen, verzeichnet. Eine Übersichtskarte des Campus mit den Umrissen aller Gebäude ist als Rastergrafik vorhanden. Die Pläne der Knotenpunkte in Nürnberg und Erfurt liegen als Vektorgra-

fiken vor. Dabei sind die Karten der Haltestellen in Nürnberg nicht genordet. Die relative Lage von U-Bahn-Haltestellen zur Umgebung ist im Speziellen schwierig zu bestimmen, da die Umrisse der unterirdischen Bahnhöfe auch in Stadtkarten nicht eingezeichnet sind. Globale Geokoordinaten zur Verortung der U-Bahnhöfe haben zunächst nicht vorgelegen. Erst gegen Ende der Projektlaufzeit hat der am Projekt beteiligte Verkehrsbetrieb georeferenzierte Punkte in den U-Bahnhöfen zur Verfügung gestellt, die durch eine Laservermessung gewonnen worden sind. Die Karten der Bushaltestellen in Erfurt sind auf Umrisse der die Haltestellen umgebenden Gebäude beschränkt. Als Anforderung ergibt sich daraus, dass die Modellierung auf Grundlage unterschiedlich gestalteter Gebäude- und Umgebungspläne ermöglicht werden muss, innerhalb derer in einigen Fällen zunächst keine Referenzpunkte mit globalen geographischen Koordinaten existieren.

Insgesamt sollen in Nürnberg 286 Verkehrsknotenpunkte abgebildet werden, die 916 Bus-, Straßenbahn-, U-Bahn- und S-Bahnhaltestellen beinhalten und eine Fläche von ca. 9 km^2 umfassen. Aufgrund der mehrstöckigen Bahnhöfe und U-Bahn-Haltestellen decken die abschließend vorliegenden Modelle der Region Nürnberg 10 km^2 ab. Der Campus der Universität Regensburg und der Technischen Hochschule Regensburg, deren Campus ebenfalls miteinbezogen wird und sich direkt an das Gelände der Universität anschließt, hat eine Grundfläche von ca. 1 km^2 . Insgesamt werden im Rahmen der hier beschriebenen Forschungsarbeit 24 Gebäude am Gelände der beiden Hochschulen abgebildet, die jeweils mehrere Stockwerke aufweisen. Die Modelle der Universität spannen deshalb insgesamt rechnerisch eine Fläche von mehr als 4 km^2 auf (Stand zum August 2019).

Die Erstellung der Pläne zeit- und kostensparend zu ermöglichen, ist also eine wichtige Anforderung, um alle Haltestellen und Gebäude innerhalb der Projektlaufzeit bzw. innerhalb des Rahmens dieser Forschungsarbeit abbilden zu können.

Zur Modellierung der Umgebung sind mehrere Hilfskräfte zur Verfügung gestanden. Der Verkehrsbetrieb der Pilotregion Nürnberg hat frühzeitig die Unterstützung durch in der Ausbildung befindliche BusfahrerInnen angeboten. Diese sind mit Arbeiten am Computer grundsätzlich vertraut gewesen und haben genaue Kenntnis der Umgebung der zu modellierenden Verkehrsknotenpunkte gehabt. Auch für die Modellerstellung am Campus der Universität ist eine Stelle, die mit wechselnden studentischen Hilfskräften besetzt worden ist, finanziert worden.

Eine Anforderung an die zur Erstellung des Modells zu entwickelnde Applikation ergibt sich, da MitarbeiterInnen und StudentInnen im Rahmen der Forschung und Lehre lesender und gegebenenfalls auch schreibender Zugriff auf Umgebungsmodelle ermöglicht werden soll. Es gilt deshalb, einen Ansatz zu finden, der von unterschiedlichen Endgeräten aus zugreifbar ist und der gemeinsames Arbeiten an verschiedenen, jeweils synchron gehaltenen Umgebungsmodellen ermöglicht. Nicht zuletzt gewinnt die grundsätzlich erstrebenswerte Anforderung, die zur Modellierung

notwendigen Arbeitsschritte einfach zu gestalten, durch die große Zahl an Personen, die sich damit vertraut machen müssen, zusätzlichen Anreiz.

Der folgende Abschnitt liefert nun zunächst eine Übersicht über verschiedene Ansätze zur Umgebungsmodellierung anhand einschlägiger Arbeiten. Die Überlegungen, die zur endgültigen Spezifikation des Umgebungsmodells führen, werden dann in Abschnitt 2.3 „Spezifikation des Umgebungsmodells“ dargelegt.

2.2 Forschungsstand

Einleitend werden nun zunächst einige Übersichtsarbeiten vorgestellt. Anhand dieser werden in den folgenden Unterabschnitten dann verschiedene Konzepte zur Umgebungsmodellierung aufgezeigt. Im Hinblick auf die in Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“ beschriebenen Anforderungen wird dabei die Eignung jedes Modells diskutiert. Forschungsarbeiten, die Beispiele für den Einsatz von Umgebungsmodellen zur präferenzbasierten Pfadplanung liefern, werden allerdings erst später in Abschnitt 3.1 „Forschungsstand“ aufgeführt.

Afyouni, Ray und Claramunt (2012) stellen unterschiedliche Modelle in Innenbereichen vor und unterscheiden dabei verschiedene Anforderungen, anhand derer die jeweilige Eignung bewertet wird. Dabei beschränken sich die Autoren nicht auf Fußgängernavigation, sondern untersuchen Umgebungsmodelle im Anwendungsfeld standortbezogener Dienste. Afyouni et al. (2012) nehmen eine Einteilung in geometrischbasierte („Geometric-based“) und symbolbasierte („Symbolic-Based“) Ansätze vor. Bei den geometrischbasierten Modellen steht die Metrik im Vordergrund, wodurch beispielsweise Abstände zwischen Objekten direkt und genau abgelesen werden können. Im Gegensatz dazu wird bei den symbolbasierten Verfahren von der Geometrie der Objekte abstrahiert und es stehen die Relationen der Objekte zueinander im Vordergrund.

Auch C. Becker und Dürr (2005) geben einen Überblick über verschiedene Umgebungsmodelle und deren Vor- und Nachteile. Die grundsätzliche Einteilung in geometrischbasierte und symbolbasierte Modelle stimmt mit der von Afyouni et al. (2012) beschriebenen Kategorisierung überein. Während Afyouni et al. (2012) sehr genau auf verschiedene geometrischbasierte Ansätze eingehen, wird in C. Becker und Dürr (2005) allgemein beschrieben, dass mittels eines geometrischbasierten Modells die geometrische Lage verschiedener Objekte anhand lokaler oder globaler Koordinaten angegeben werde.

Eine weitere Untersuchung von Umgebungsmodellen, die sich für Fußgängernavigation in Innenbereichen eignen, findet sich in Fallah, Apostolopoulos, Bekris und Folmer (2013). In jeweils einem Abschnitt werden die Aspekte „Pfadplanung“, „Lokalisierung des Nutzers“, „Präsentation der Route“ und „Interaktion mit dem Nutzer“ behandelt. Dabei wird stets auf unterschiedliche Techniken eingegangen,

die in jedem Szenario zum Einsatz kommen. Fallah et al. (2013) schreiben, dass sich für die Pfadplanung graphbasierte und gitterbasierte Modelle eignen würden.

Eine Übersicht über verschiedene Ansätze zur Modellierung von Innenbereichen findet sich auch in Worboys (2011). Dabei werden grundlegend semantische von räumlichen Modellen unterschieden. Räumliche Modelle werden dann in topologische, geometrische und hybride Modelle unterteilt. Weiterhin wird in diesem Artikel die aktuelle Forschung des Autors an einer Erweiterung eines graphbasierten Modells vorgestellt. Im Besonderen wird auf Modelle eingegangen, welche sich zur Navigation in Innenbereichen eignen. Dabei wird darauf hingewiesen, dass Innenbereiche nie isoliert bestünden und die Vereinigung von Konzepten für Innen- und Außenbereiche deshalb weiterer Untersuchungen bedürfe.

Geometrisch- und symbolbasierte Ansätze werden ebenfalls in Domnitcheva (2001) erläutert. Als Nachteil geometrischbasierter Modelle wird hier der oft hohe Speicherbedarf genannt, der speziell auf mobilen Geräten zum Problem werden könnte. Andererseits wird der manuelle Aufwand aufgezeigt, der zur Erstellung und Pflege symbolbasierter Modelle nötig sei, sowie deren begrenzte räumliche Auflösung. Genau wie in Afyouni et al. (2012); C. Becker und Dürr (2005) und Worboys (2011) wird auf Kombinationen dieser beiden Modelle eingegangen.

Eine umfangreiche Zusammenfassung verwendeter Modelle für die Fußgängernavigation in Innen- und Außenbereichen findet sich weiterhin in Vanclooster, Van de Weghe und De Maeyer (2016). Tabellarisch werden zahlreiche Studien aufgelistet, die sich mit diesem Thema befassen. Zum Zeitpunkt der Modellspezifikation für die hier vorliegende Arbeit ist dieser Artikel, der 2016 veröffentlicht wurde, allerdings noch nicht zur Verfügung gestanden.

Im Folgenden werden hier nun die in den Übersichtsartikeln genannten Modelltypen beschrieben und deren Eignung hinsichtlich der in Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“ aufgelisteten Anforderungen diskutiert.

2.2.1 Semantisches Modell

Worboys (2011) teilt Umgebungsmodelle in räumliche und semantische Ansätze ein. Während räumliche Modelle die Lage von Objekten beschreiben würden, seien in semantischen Modellen unterschiedliche Arten von zu berücksichtigenden Objekten und deren Eigenschaften abgebildet. Falls diese Objekte darüber hinaus in Bezug zueinander ständen, spreche man von einer Ontologie. Als Beispiel nennt Worboys (2011) die Aufteilung in durch die Baustruktur festgelegte Objekte, wie Mauern, Räume, Türen oder Gänge, und andererseits in Dinge, die in diesen Strukturen enthalten seien, wie beispielsweise Möbel, Einrichtungsgegenstände oder Personen. Ein Beispiel für eine solche Ontologie von Strukturen in Innenbereichen findet sich in L. Yang und Worboys (2011). Yang und Worboys betonen speziell die Relevanz solcher Modelle, die Navigation nicht nur in Außenbereichen, sondern auch in

Innenbereichen ermöglichen. Afyouni et al. (2012) schreiben, dass semantische Modelle häufig mit graphbasierten Ansätzen kombiniert würden.

Gerade um Nutzerpräferenzen bei der Routenberechnung berücksichtigen zu können, muss untersucht werden, welche unterschiedlichen Objekte Einfluss auf die Umgebung nehmen. Es existieren bereits unterschiedliche semantische Modelle, die Nutzerpräferenzen bei der Navigation in Innenbereichen berücksichtigen. Beispielsweise beschreiben Dudas, Ghafourian und Karimi (2009) eine Ontologie, die anhand des „American Disability Act“ entworfen worden sei und so eine Routenberechnung ermögliche, die auf spezielle Bedürfnisse, wie von NutzerInnen mit Sehbehinderung oder eingeschränkter Mobilität, eingehe. So wird in dieser Ontologie beispielsweise die Knopfhöhe in Aufzügen berücksichtigt, welche für RollstuhlfahrerInnen eine wichtige Rolle spielt. Zur Berechnung von Routen wird dann ein graphbasiertes Modell verwendet, in dem Bezug auf die erstellte Ontologie genommen wird. Karimi und Ghafourian (2010) erweitern diese Ontologie und beschreiben einen Algorithmus, der diese nutze, um an Präferenzen angepasste Routen zu ermitteln. Ein ähnlicher Ansatz findet sich in Anagnostopoulos, Tsetsos, Kikiras und Hadjiefthymiades (2005) und darauf aufbauend in Kikiras, Tsetsos und Hadjiefthymiades (2006) und Tsetsos, Anagnostopoulos, Kikiras und Hadjiefthymiades (2006). Spezifiziert wird eine Ontologie von für die Navigation relevanten Elementen in Innenbereichen. Zur Routenberechnung wird dann ein graphbasiertes, hierarchisches Modell der Umgebung herangezogen. Die Autoren argumentieren, dass dadurch intuitiv korrekter erscheinende Pfade als Alternativen zu kürzesten Routen berechnet werden könnten. Weiterhin erarbeiten sie ein Nutzermodell, das Fähigkeiten und Präferenzen beschreibt, sodass eine individuelle Anpassung an NutzerInnen möglich wird.

Auch im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit ist es notwendig, semantische Informationen zu Pfadelementen zu hinterlegen, sodass Pfadverläufe generierter Routen an Nutzerpräferenzen angepasst werden können. Im zu definierenden Modell müssen somit Elemente, die den Verlauf der berechneten Route potentiell beeinflussen, unterschieden werden. Zunächst ist jedoch nicht klar gewesen, welche Entitäten am Gelände der Universität Einfluss auf die von NutzerInnen favorisierten Routen nehmen können. Andererseits gibt es sicherlich viele Faktoren, die zwar die Wahl der Route beeinflussen, die allerdings nur mit großem Aufwand ermittelt werden können. So hat sich bei einer Befragung von RollstuhlfahrerInnen im Rahmen eines Seminars beispielsweise herausgestellt, dass zahlreiche Aufzüge an der Universität Regensburg nicht genügend Platz für bestimmte Rollstuhltypen bieten. Allerdings sind keine offiziellen Informationen über die Breite der Aufzüge an der Universität vorgelegen. Eine manuelle Vermessung aller Aufzüge kann im Rahmen dieser Arbeit aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden. Das Navigationssystem wird deshalb so implementiert, dass die Menge der zu unterscheidenden Objekte und deren Eigenschaften jederzeit einfach erweitert werden kann.

2.2.2 Zellbasiertes Modell

Ein geometrischbasierter Ansatz, der in Afyouni et al. (2012) vorgestellt und als „Cell-based“ bezeichnet wird, kann verfolgt werden, indem die Umgebung in sich nicht überlappende Kacheln unterteilt wird. Dies ist sowohl zweidimensional als auch dreidimensional möglich. Jeder Kachel können Informationen, wie beispielsweise Raumnummern oder Wegbeschaffenheit, zugeordnet werden. Afyouni et al. (2012) geben an, dass sich eine Aufteilung der Umgebung in Zellen ungleicher Größe anbietet, um Bereiche mit hoher Objektdichte genauer als freie Flächen abbilden zu können. Häufig wird die Umgebung allerdings in Zellen mit rechteckiger Form und fester Größe unterteilt. Diese gebräuchliche Rasterung der Umgebung wird speziell als „Grid-based“ bzw. gitterbasiertes Modell bezeichnet. Fallah et al. (2013) schreiben, dass sich ein solches gitterbasiertes Modell zur Pfadplanung eigne. Jedoch merken sie an, dass es schwierig sei, die Zellgröße optimal festzulegen, da große Zellen zwar zu mehr Performanz bei der Planung, aber auch zu Ungenauigkeiten führen würden. Weiterhin gehen Fallah et al. (2013) auf die Möglichkeit ein, einzelne Zellen mit verschiedenen *Gewichtungsfaktoren* zu versehen, die in der Routenplanung berücksichtigt werden könnten, um die berechneten Wege an persönliche Bedürfnisse anzupassen. Sie schreiben, dass es dadurch beispielsweise möglich sei, Treppen höher zu gewichten, um diese bei der Routenplanung zu vermeiden. Auch Afyouni et al. (2012) geben an, dass sich das Modell zur Navigation eigne. Da eine große Anzahl an Zellen zu Performanz-Problemen bei der Pfadplanung führen könne, wird aber auf die schlechte Skalierbarkeit hingewiesen. Worboys (2011) schreibt, dass rein geometrische Modelle zwar zur Gebäudekonzeption notwendig seien, dass im Navigationskontext aber meist hybride Modelle, die topologische und geometrische Elemente vereinen, zum Einsatz kämen. Auf diese wird in Unterabschnitt 2.2.6 „Modellkombinationen“ genauer eingegangen.

Zur Umsetzung eines zellbasierten Modells für den Campus der Universität Regensburg wäre es notwendig, viele unterschiedliche Höhenlagen, Treppen und Unterführungen zu berücksichtigen. In einem zweidimensionalen Modell wäre dies daher nur auf Umwegen möglich, beispielsweise in einem erweiterten Modell, in dem verschiedene Ebenen zusätzlich in Relation zueinander gesetzt werden. Die Erstellung eines dreidimensionalen Modells wäre dagegen komplexer. Um den Modellierungsaufwand in Grenzen zu halten, wäre vermutlich ein weitgehend automatisierter Ansatz notwendig.

2.2.3 Umrissbasiertes Modell

Als weiteren geometrischbasierten Ansatz führen Afyouni et al. (2012) die sogenannten „Boundary-based models“ auf. Für diese Modelle werden die Umrisse von Hindernissen gespeichert.

Die Autoren geben an, dass die erstellten Modelle zwar sehr kompakt werden könnten, für Navigationsanwendungen aber weniger geeignet seien, da beispielsweise Pfadplanungs-Algorithmen nicht direkt angewandt werden könnten. Aus diesem Grund soll dieser Ansatz hier für die zu spezifizierende Modellierung nicht weiter in Betracht gezogen werden. Die geometrische Lage unterschiedlicher Objekte zu kennen, bietet allerdings auch Vorteile gegenüber rein symbolbasierten Verfahren. So könnte NutzerInnen während der Navigation ein umrissbasiertes Modell angezeigt werden, das helfen könnte, die angezeigten Strukturen in der realen Welt zu verorten.

2.2.4 Mengenbasiertes und hierarchisches Modell

Ein symbolbasiertes Verfahren, das sowohl von Afyouni et al. (2012) als auch von C. Becker und Dürr (2005) vorgestellt wird, ist das „Set-based model“. Grundlegend würden in diesem Modell verschiedene Orte in Mengen zusammengefasst. Beispielsweise könnte eine solche Menge alle Räume umfassen, die in einem bestimmten Gebäude liegen.

In beiden Publikationen wird die Möglichkeit aufgezeigt, Mengen-Hierarchien zu spezifizieren. C. Becker und Dürr (2005) weisen darauf hin, dass es sich bei solchen „hierarchical models“ um eine spezielle Form der „set-based model“ handele. Ein Beispiel hierfür findet sich in Heye und Timpf (2003). Im dort aufgezeigten Ansatz wird einerseits ein Modell verwendet, das die Navigation beim Umstieg an Haltestellen ermögliche. Auf einer hierarchisch höheren Ebene liefere ein weiteres Modell dann die notwendigen Daten zum öffentlichen Nahverkehr, indem es das Verkehrsnetz zwischen diesen Umstiegspunkten abbilde.

Auch für die Routenberechnung an der Universität, wie sie in der vorliegenden Arbeit realisiert wird, erscheint die Definition einer solchen Hierarchie sinnvoll. So können beispielsweise verschiedene Stockwerke eines Gebäudes disjunkte Teilmengen des Gesamtgebäudes darstellen. Der Universitätscampus kann dann weiterhin alle Gebäude-Mengen vereinen. Im Hinblick auf die aufgezeigte Problemstellung kann ein solches mengenbasiertes Modell mehreren Anforderungen gerecht werden. So könnten unmittelbar Anweisungen generiert werden, welche Hierarchien auf dem Weg zum Zielort zu durchschreiten sind: „Verlassen Sie das Mathematik-Gebäude. Betreten Sie das Rechenzentrum. Gehen Sie in das zweite Stockwerk.“. Auch geben Afyouni et al. (2012) an, dass die hierarchische Struktur des Modells Performanz und Skalierbarkeit sicherstelle. Jedoch führen C. Becker und Dürr (2005) als Nachteil auf, dass Distanzen zwischen verschiedenen Orten nur qualitativ bestimmt werden könnten. So lasse sich zwar feststellen, dass zwei Räume im selben Gebäude liegen, eine exakte quantitative Entfernung könne aber nicht gemessen werden. Weiterhin wird beschrieben, dass keine Relationen zwischen den Mengen bestimmt werden könnten. Es gebe also beispielsweise keine Möglichkeit festzustellen, dass ein Gebäudeteil mit dem Außenbereich durch eine Drehtür verbunden ist. In beiden

zitierten Publikationen wird deshalb darauf hingewiesen, dass das reine Modell für Navigationsanwendungen nur eingeschränkt geeignet sei. Für die im Kontext dieser Arbeit gestellte Anforderung, den genauen Routenverlauf unter Einbezug verschiedener Umgebungsinformation bestimmen zu können, ist dieses Modell somit nicht ausreichend.

2.2.5 Graphbasiertes Modell

Einen weiteren symbolbasierten Ansatz stellen auf Graphen basierende Modelle dar, die aus im Rahmen dieser Arbeit einheitlich als *Nodes* und *Edges* bezeichneten Elementen bestehen. Allgemein schreiben C. Becker und Dürr (2005), dass symbolische Koordinaten durch *Nodes* repräsentiert würden. Eine *Edge* symbolisiere dann eine existente Verbindung zwischen zwei *Nodes*.

Dabei könnten verschiedene Aspekte der Umgebung als Graph dargestellt werden. Beispielsweise unterscheidet Worboys (2011) „adjacency graphs“, in denen benachbarte Regionen durch *Edges* verbunden seien, von „accessibility graphs“, in denen nur Regionen verknüpft würden, die auch durch einen Weg, wie beispielsweise eine Tür zwischen zwei Räumen, verbunden seien.

Auch Afyouni et al. (2012) gehen auf verschiedene Arten von graphbasierten Modellen ein. Grundsätzlich unterscheiden sie dabei layoutbasierte („layout-based“) von layoutunabhängigen („layout-independent“) Modellen. Während die Struktur des Raumes genutzt werde, um layoutbasierte Modelle zu erstellen, würden *Nodes* in layoutunabhängigen Modellen beispielsweise aus Sensordaten abgeleitet. Aufgrund des zur Verfügung stehenden Kartenmaterials sowohl für die Haltestellen im Projekt *NADINE* als auch für die Gebäude der Universität Regensburg bietet sich die Verwendung eines layoutbasierten Modells an.

Weiterhin werden von Afyouni et al. (2012) verschiedene Formen von Graphmodellen unterschieden. Beispielsweise können sensorbasierte Graphen eine Grundlage für die Ortung von NutzerInnen oder Objekten in Innenbereichen bieten. In „Visibility graphs“ werden *Nodes* durch *Edges* verbunden, wenn das eine Objekt vom jeweils anderen aus gesehen werden kann. Ein Ansatz, der laut Afyouni et al. (2012) weit verbreitet ist, da er sich gut zur Routenplanung eignet, ist der sogenannte „Place graph“. *Nodes* repräsentieren in diesem Modell Orte wie Räume oder Korridore. Wege, die diese Räume verbinden, werden dann durch *Edges* modelliert.

Auch C. Becker und Dürr (2005) geben an, dass sich Graphen insbesondere gut für „nearest neighbor“-Anfragen, zur Routenplanung und somit zur Nutzung in Navigationsdiensten eignen würden. C. Becker und Dürr (2005) beschreiben weiterhin die Möglichkeit, *Edges* zu gewichten, um Distanzen zwischen verschiedenen Orten zu modellieren. Auch andere Einflussfaktoren können laut C. Becker und Dürr (2005) und Fallah et al. (2013) herangezogen werden, um *Gewichtungsfaktoren* von *Nodes* und *Edges* zu beeinflussen und somit den Verlauf der kostenminimierenden Route zu

steuern. Als Beispiel hierfür nennen C. Becker und Dürr (2005) Geschwindigkeitsbegrenzungen auf Straßen, die zur Berechnung der schnellsten Route beachtet werden müssten. Auch Elias (2007) geht auf diesen Ansatz ein und beschreibt, dass sich in Fahrzeugnavigationssystemen Distanzen und Geschwindigkeitsbegrenzungen zur Gewichtung von *Edges* nutzen lassen würden. Als Nachteil eines rein graphbasierten Modells führen Afyouni et al. (2012) auf, dass Information über die Geometrie des Raumes verloren gehe und es schwer sein könne, eine Distanzfunktion zu modellieren, die die Berechnung der kürzesten Route ermögliche.

Ein graphbasierter Ansatz ist somit geeignet, um die durch den Kontext der vorliegenden Arbeit gestellten Anforderung zu erfüllen, Routen zu berechnen und dabei verschiedene Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Wie bereits erwähnt, ist ein Nachteil eines ausschließlich symbolbasierten Modells, dass Informationen zur räumlichen Ausdehnung fehlen und die berechneten Routen somit nicht auf einer Karte angezeigt werden können. Auch Winkel zwischen Kanten lassen sich ohne Informationen zur geometrischen Lage der *Nodes* nicht berechnen. Worboys (2011) geht auf die Möglichkeit ein, Kanten an einer Kreuzung ringförmig mit Nummern zu versehen, sodass auch in einem rein graphbasierten Modell Richtungsangaben wie „biegen Sie links ab“ abgeleitet werden könnten.

2.2.6 Modellkombinationen

Um die Vorteile der aufgeführten Modelle zu vereinen, bieten sich Mischformen verschiedener Umgebungsmodelle an (siehe Afyouni et al., 2012; C. Becker & Dürr, 2005; Worboys, 2011). Die Kombination eines symbolbasierten Modells mit einem geometrischen Modell wird in C. Becker und Dürr (2005) als hybrides Modell bezeichnet. Analog führt Worboys (2011) hybride Modelle als Kombination aus topologischen und geometrischen Modellen ein und schreibt, dass in topologischen Modellen dadurch die Quantifizierung von Distanz ermöglicht werde. Die Begrifflichkeit unterscheidet sich in Worboys (2011) dabei teils von der in Afyouni et al. (2012) und C. Becker und Dürr (2005) verwendeten. Worboys nutzt den Begriff der „topologischen“ Modelle, um die Modellierung von Relationen von geometrischen Modellen zu unterscheiden. Dabei wird nicht weiter auf die Einteilung von symbolbasierten in mengenbasierte und graphbasierte Modellen eingegangen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an Afyouni et al. (2012); C. Becker und Dürr (2005) getroffen wird.

Domnitcheva (2001) bezeichnet die Kombination eines geometrisch- mit einem symbolbasierten Modell als „semi-symbolic model“ und schreibt, dass dieses oft auch als „combined model“ und „hybrid model“ bezeichnet werde.

Afyouni et al. (2012) beschreiben konkret den Ansatz, ein graphbasiertes Modell mit einem geometrischbasierten zu kombinieren. Sie weisen darauf hin, dass diese

Mischform nicht gut skaliert und für große Umgebungen deshalb eher ungeeignet sei.

C. Becker und Dürr (2005) gehen zunächst auf die Kombination eines graphbasierten Modells mit einem mengenbasierten Modell ein, die die Vorteile beider Ansätze vereine. Zur Veranschaulichung wird ein Graph skizziert, der in unterschiedliche Stockwerke aufgeteilt ist, die wiederum unterschiedlichen Gebäuden zugeordnet sind. Als Vorteil wird aufgeführt, dass je nach Anwendungsfall so nur eine bestimmte Abstraktionsschicht des Graphen betrachtet werden könne.

Auch Afyouni et al. (2012) beschreiben diese Kombinationsmöglichkeit mit einem mengenbasierten Modell und nennen als Vorteil die Skalierbarkeit, die ein hierarchischer Ansatz mit sich bringt. Es wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass bei der Routenberechnung zwischen grob und feiner granulierten hierarchischen Ebenen gewechselt werden könne.

Durch diese Kombinationsmöglichkeit lassen sich viele der in Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“ gestellten Anforderungen erfüllen. Die in C. Becker und Dürr (2005) beschriebene Aufteilung in Gebäude und Stockwerke wäre für die Navigation am Universitätscampus leicht umsetzbar. Für die Navigation an Haltestellen und durch Bahnhöfe im Rahmen des Projektes *NADINE* könnte statt der Aufteilung in Gebäude eine Trennung in unterschiedliche Haltestellen umgesetzt werden. Das zugrunde liegende Graphenmodell ist für die Berechnung genauer Routenverläufe unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien geeignet. Durch die Aufteilung in Gebäude wird weiterhin eine hierarchische Start- und Zielauswahl ermöglicht. Neben den genannten Performanzvorteilen könnten die unterschiedlichen Abstraktionsgrade auch für die Erklärung der Route vorteilhaft sein. So wird beispielsweise in Worboys (2011) auf hierarchische Modelle eingegangen und angegeben, dass NutzerInnen bei der Navigation oft mehr Details zu Beginn und am Ende der Route sowie an kritischen Punkten benötigen würden. Einem Nutzer, der sich am Campus ausreichend auskennt, könnte beispielsweise zuerst nur das anzusteuernnde Gebäude genannt werden. Erst innerhalb dieses Gebäudes könnte dann eine tiefere Hierarchieebene betrachtet und der genaue Verlauf des Weges im Zielgebäude angezeigt werden.

C. Becker und Dürr (2005) gehen dann weiterhin auf die Möglichkeit ein, das zuvor beschriebene symbolbasierte Modell zusätzlich um geometrische Merkmale zu erweitern. Dieser hybride Ansatz wird dort als „Subspaces“ bezeichnet. Dabei könne ein globales Referenzsystem verwenden werden, als Beispiel werden WGS84-Koordinaten genannt. Allerdings sind auch Modelle mit lokalen Referenzsystemen möglich, die beispielsweise nur für jeweils ein einzelnes Gebäude gültig sind. Es wird beschrieben, dass Koordinaten dann von einem System in ein anderes (globales oder lokales) Referenzsystem transformiert werden müssten, um diese in Relation setzen zu können.

Ein solches Modell erfüllt zum einen die Anforderungen, die sich aus der beschriebenen Kombination eines graphbasierten mit einem hierarchischen Modell ergeben. Weiterhin wäre es aber möglich, Koordinaten für alle Abschnitte einer berechneten Route zu bestimmen. Anhand geometrischer Merkmale ist die Länge der *Edges* des Graphen quantifizierbar, sodass diese als Gewichtung bei einer Suche nach dem kostengünstigsten Pfad berücksichtigt werden kann. Zusätzlich können Abstände zum Zielpunkt quantifiziert werden, welche sich als optimistische Heuristik für einen A*-Algorithmus (Hart, Nilsson & Raphael, 1968) nutzen lassen. Die Wahl der Startposition könnte automatisch erfolgen und NutzerInnen müssen den Startpunkt der Route nicht zwangsweise manuell auswählen. Auch die Möglichkeiten bei der Präsentation der Route werden durch diesen Ansatz erweitert: So kann der Verlauf der Route auf einem Gebäudeplan oder einer Umgebungskarte eingezeichnet werden. Mittels Geokoordinaten, beispielsweise vom Smartphone bereitgestellt, ist es möglich, zusätzlich zum Startpunkt kontinuierlich den Verlauf der Nutzerposition darzustellen. Abbiegungen könnten Worboys (2011) zufolge anhand der Winkel zwischen aufeinanderfolgenden Routenabschnitten automatisiert bestimmt werden.

Weiterhin beschreiben C. Becker und Dürr (2005) das sogenannte „Partial Subspaces“-Modell. Im Gegensatz zum „Subspaces“-Modell stehe die geometrische Erweiterung in diesem Ansatz nicht für alle Bereiche zur Verfügung. C. Becker und Dürr (2005) nennen als Beispiel eine größere Umgebung mit mehreren Gebäuden. Während für den Außenbereich ein geometrisches Modell vorliege, das Informationen zur Ausdehnung der Gebäude und deren Lage zueinander liefere, könne innerhalb der Gebäude nur ein symbolbasiertes Modell existieren. Wenn sich NutzerInnen nun in einem bestimmten Raum befänden, lasse sich deren Position zumindest anhand des Gebäudes schätzen.

Für den Rahmen dieser Arbeit wurde dieses Modell nicht weiter in Betracht gezogen. Innerhalb der großen Gebäude der Universität ergeben sich teils über mehrere Stockwerke verteilte Routen. Eine Schätzung von Positionen anhand der Gebäudeposition wären somit sehr grob. Gerade in Situationen mit vielen verzweigten Gängen könnte die Anzeige der Nutzerposition und des aktuellen Streckenabschnitts auf einer Karte zur Unterstützung der NutzerInnen beitragen.

2.3 Spezifikation des Umgebungsmodells

In diesem Abschnitt wird die getroffene Spezifikation des Umgebungsmodells beschrieben. Hierfür werden die aufgrund der in Abschnitt 2.2 „Forschungsstand“ vorgestellten Quellen getroffenen Entscheidungen dokumentiert. Darauf folgend wird in Abschnitt 2.4 „Technische Umsetzung“ auf die technische Umsetzung eingegangen. Dabei werden Probleme, die im praktischen Einsatz des Systems identifiziert worden sind, sowie die verfolgten Strategien zur Lösung derselben aufgezeigt. We-

terhin wird eine Applikation implementiert, die eine einfache und zeitsparende Erstellung spezifikationskonformer Umgebungsmodelle ermöglicht. Diese wird in Abschnitt 2.5 „Modellierungsapplikation“ vorgestellt.

Zur Modellierung der Umgebung wird ein hybrider Ansatz verfolgt, der auf dem in C. Becker und Dürr (2005) als „Subspaces“ bezeichneten Modell basiert. Dieses vereint die Vorteile eines hierarchisch organisierten mit den Vorteilen eines graphbasierten Modells, das zusätzliche geometrische Merkmale enthält.

2.3.1 Hierarchische Aufteilung

Zunächst wird die Umgebung in drei, jeweils aus disjunkten Mengen bestehende Hierarchieebenen unterteilt. Einerseits erfolgt diese Aufteilung aufgrund der in Afyouni et al. (2012) und C. Becker und Dürr (2005) beschriebenen Vorteile für Performance und Skalierbarkeit. So können bei der Pfadsuche ausschließlich die Bereiche eingelesen und verarbeitet werden, die für den zu berechnenden Pfad relevant sind. Weiterhin kann die hierarchische Struktur bei der Suche nach bestimmten Elementen im Umgebungsmodell genutzt werden, um schon auf hoher Hierarchieebene nicht relevante Bereiche auszuschließen. Elemente, die in diesen Bereichen liegen, müssen bei der Suche dann nicht weiter berücksichtigt werden, was zu einer Verbesserung der Laufzeit führt. Ein praktisches Beispiel hierfür stellt die Umkreissuche nach Landmarken in der Nähe der aktuellen Nutzerposition dar. Zahlreiche Landmarken lassen sich durch einen „Divide and Conquer“-Ansatz direkt ausschließen, da sie einem Gebiet höherer Hierarchieebene zugeordnet sind, dessen räumliche Ausdehnung sich nicht mit dem zu untersuchenden Bereich überschneidet. Neben diesen technischen Vorteilen kann die hierarchische Aufteilung auch bei der Darstellung einer berechneten Route genutzt werden. Wie zuvor erwähnt, lässt sich der Detailgrad der Beschreibung je nach betrachteter Hierarchieebene variieren. Dadurch ist es beispielsweise möglich, dem in Worboys (2011) beschriebenen Konzept folgend, NutzerInnen zunächst in das richtige Gebäude zu navigieren und erst kurz vor Erreichen des Zielpunktes einen detaillierteren Routenverlauf mit Richtungsangaben zu präsentieren.

In der konkreten Umsetzung werden auf erster Hierarchieebene die unabhängigen Bereiche unterschieden, in denen das Navigationssystem zum Einsatz kommt. Die Umgebung der Universität Regensburg stellt einen solchen Bereich dar. Zwei weitere Bereiche haben sich im Rahmen des Projekts *NADINE* aus den Pilotregionen Nürnberg und Erfurt ergeben.

Auf zweiter Hierarchieebene wird jeder Bereich in kleinere, disjunkte Zonen unterteilt. Diese Zonen sollen nach Möglichkeit so gewählt werden, dass sie klar nachvollziehbar voneinander abgetrennt sind, sodass nicht versehentlich dieselben Wege mehrfach, in verschiedenen Zonen, modelliert werden. Beispielsweise werden am Campus der Universität auf dieser Hierarchieebene die einzelnen Gebäude unter-

schieden, weiterhin gibt es einen Campusbereich für das Gelände der Universität und einen Außenbereich für das Gelände der angrenzenden Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg. Für die Navigation im Projekt *NADINE* ist die Umgebung nicht in Gebäude, sondern in die unterschiedlichen Verkehrsknotenpunkte unterteilt worden. Ein Verkehrsknotenpunkt stellt dabei einen Bereich dar, innerhalb dessen potentiell zurückzulegende Fußwege im Umgebungsmodell komplett verzeichnet werden. Dabei kann ein Verkehrsknotenpunkt eine oder auch mehrere Haltestellen und Haltemasten enthalten. Im Gegensatz zur Navigation am Campus ist die Umgebung zwischen den einzelnen Verkehrsknotenpunkten nicht modelliert worden. Zur grobgranulareren Navigation in Außenbereichen wird stattdessen eine Schnittstelle für einen externen Navigationsdienst bereitgestellt.

Zur Unterscheidung verschiedener Höhenebenen können die Zonen der zweiten dann weiter in Bereiche der dritten Hierarchieebene aufgeteilt werden. Im Allgemeinen bieten sich hierfür die einzelnen Geschosse modellierter Gebäude an. Auch das Außengelände der Universität Regensburg wird aus Gründen der Übersichtlichkeit aber beispielsweise in drei Ebenen zerlegt, indem Überführungen und unterirdische Gänge, welche häufig zwischen Gebäuden existieren, getrennt von der Straßenebene modelliert werden. Auch die grundsätzliche Möglichkeit, eine einzelne Etage auf dritter Hierarchieebene weiter zu unterteilen, wird durch die definierte Spezifikation nicht ausgeschlossen. Beispielsweise können zwei Turmspitzen eines Gebäudes, obwohl beide auf derselben Höhenebene liegen, voneinander abgetrennt werden. Eine Aufteilung dieser Bereiche bietet sich an, um die Übersicht bei der Modellierung zu verbessern.

2.3.2 Graphbasiertes Modell

Um die Routenberechnung unter Einflussnahme von Präferenzen zu ermöglichen, wird innerhalb jedes Stockwerkes ein graphbasierter Modellierungsansatz verfolgt. Wie in den Anforderungen in Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“ beschrieben, sollen zur systematischen Abdeckung aller Räume vorhandene Architekturpläne und Karten genutzt werden können. Es wird deshalb ein von Afyouni et al. (2012) als „layout-based“ bezeichneter Ansatz umgesetzt. Im Gegensatz zum „layout-independent model“ werden *Nodes* dabei anhand der Struktur des Raumes erstellt.

Räume, wie Büros oder Hörsäle, werden, wie im von Afyouni et al. (2012) beschriebenen „Place graph“, durch *Nodes* repräsentiert. Da Koordinaten der *Nodes* gespeichert werden, wie im folgenden Unterabschnitt 2.3.4 „Geometrische Merkmale“ noch beschrieben wird, können die *Nodes* auch als Stützpunkte genutzt werden, um den räumlichen Verlauf von Wegen abzubilden. Die *Nodes* werden dann durch *Edges* verbunden, die im Allgemeinen passierbare Wege kennzeichnen. Abbildung 2.1

2. Modellierung der Umgebung

zeigt einen Architekturplan der Universität Regensburg, anhand dessen einige *Nodes* verzeichnet und durch *Edges* verbunden sind.

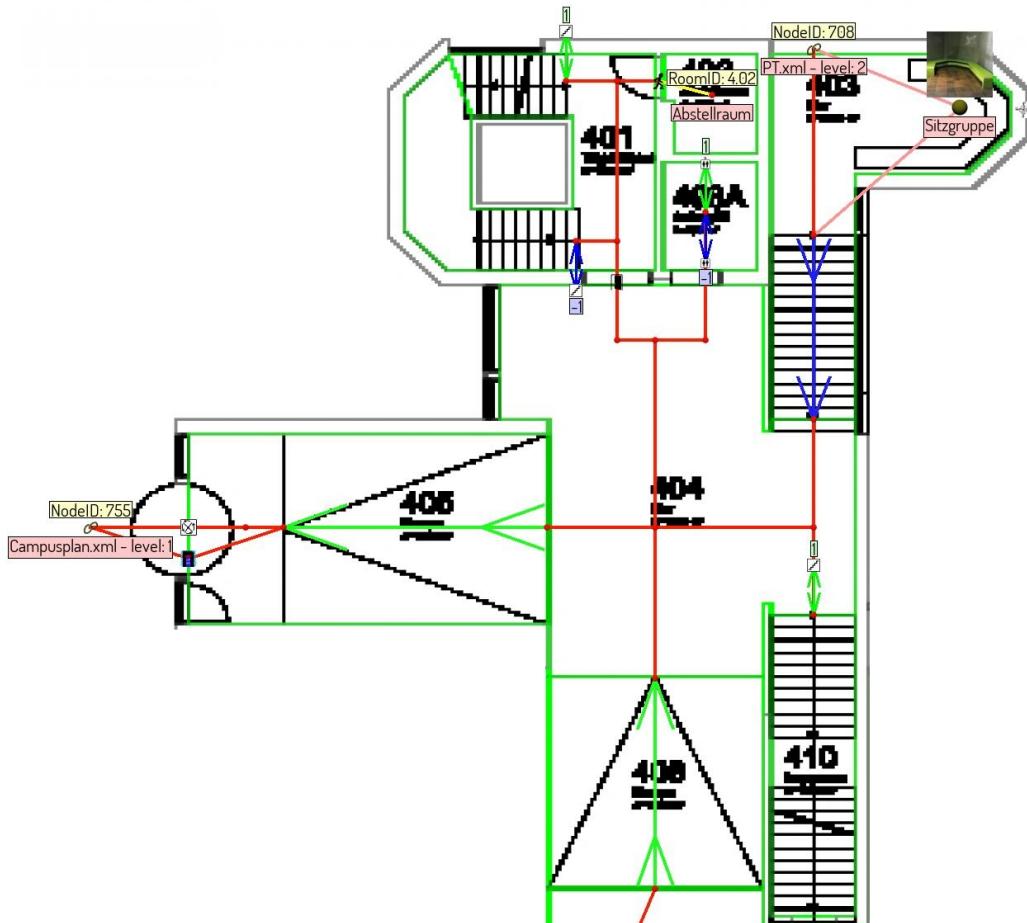


Abbildung 2.1: Beispielhafte Modellierung, in der verschiedene Node- und Edge-Kategorien zum Einsatz kommen

Die Einteilung als „Place Graph“, in dem *Edges* Wege darstellen, ist allerdings nicht ganz eindeutig. So gibt es Situationen, in denen eine *Edge* nur die Sichtbarkeit eines Objektes von einem bestimmten Punkt aus indizieren soll: Manche Objekte eignen sich als Landmarken, sind jedoch nicht direkt erreichbar. Dieses Verhalten kann eher dem von Afyouni et al. (2012) beschriebenen „Visibility graph“ als dem „Place Graph“ zugeordnet werden. In diesem kennzeichnen *Edges* die wechselseitige Sichtbarkeit zweier Nodes.

Weiterhin lässt sich das gewählte Modell dem von Worboys (2011) beschriebenen „Accessibility graph“ zuordnen: Eine Kante symbolisiert einen passierbaren Weg zwischen zwei *Nodes*; im Gegensatz zum „Connectivity graph“ werden verschlossene Türen, die für die gestellten Anforderungen nicht relevant sind, nicht modelliert. Auch diese Einteilung ist allerdings nicht eindeutig. So finden dauerhaft verschlossene Türen bei der Modellierung zwar keine Berücksichtigung, allerdings gibt es

Gänge, die beispielsweise aus Sicherheitsgründen vermieden werden sollen, sofern ein alternativer Weg zum Ziel existiert. Neben der Indikation der Erreichbarkeit ist es also notwendig, verschiedene Stufen der Zugänglichkeit zu unterscheiden.

Durch die Erstellung eines zusammenhängenden Graphen kann sichergestellt werden, dass wechselseitig zwischen allen *Nodes* ein möglicher Fußweg existiert. Eine Ausnahme stellen die zur Koordinatentransformation verzeichneten Referenz-*Nodes* (siehe Unterabschnitt 2.4.5 „Transformation lokaler Koordinaten in ein globales Referenzsystem“) dar, die nicht mit anderen *Nodes* verbunden werden müssen, da sie weder als Start- noch als Zielpunkt gewählt werden können. Eine zweite Ausnahme ergibt sich durch *Nodes*, die bei der Navigation als Landmarken referenziert werden können. Einzelne *Nodes* dieser Art dürfen auch mit *Edges* zur Kenntlichmachung der Sichtbarkeit verbunden werden, da teilweise kein Weg existiert, mit dem diese erreicht werden können. Auf diese speziellen Typen von *Nodes* und *Edges* wird im folgenden Abschnitt genauer eingegangen. Unter Berücksichtigung dieser Ausnahmen kann die Ermittlung einer Zusammenhangskomponente im Graphen genutzt werden, um eine unvollständige Modellierung zu erkennen. In der in Abschnitt 2.5 „Modellierungsapplikation“ beschriebenen Modellierungsapplikation lassen sich deshalb *Nodes*, die nicht Teil der größten ermittelten Zusammenhangskomponente des Graphen sind, farblich hervorheben, um auf etwaige Lücken im Umgebungsmodell hinzuweisen.

Um die Darstellung der modellierten Umgebung möglichst einfach zu gestalten, wird weiterhin festgelegt, dass zwischen jeweils zwei *Nodes* nur maximal eine *Edge* existieren kann. Das Graphmodell ist somit kein allgemeiner Multigraph. Falls es zwei verschiedenartige Wege gibt, müssen diese parallel zueinander verzeichnet werden, indem zusätzliche *Nodes* als Stützpunkte eingefügt werden. Eine Ausnahme bilden *Edges* zur Verbindung unterschiedlicher Etagen, die im Rahmen dieser Arbeit als *Leveledges* bezeichnet werden. Da in einigen Situationen Treppenhäuser und Aufzüge räumlich nah beieinander liegen, ist die Möglichkeit geschaffen worden, ein Paar von *Nodes* durch eine *Leveledges* der Kategorie „Treppe“ und gleichzeitig der Kategorie „Auzug“ zu verbinden. Somit ist es nicht nötig, zusätzliche *Nodes* als Ankerpunkte für weitere Etagenübergänge zu erstellen. Im praktischen Einsatz des Systems hat sich jedoch herausgestellt, dass dies bei der Modellierung nur in seltenen Fällen genutzt worden ist.

2.3.3 Semantisches Modell

Wie in Unterabschnitt 2.2.1 „Semantisches Modell“ beschrieben, können durch die Spezifikation eines semantischen Modells in der Umgebung existierende Entitäten in verschiedene Kategorien, wie Büros, Treppen oder Türen eingeordnet werden. Die Aufteilung in *Nodes* und *Edges*, die sich bereits durch das graphbasierte Modell ergibt, kann so um verschiedene Unterkategorien erweitert werden. Neben der

genannten Kennzeichnung durch *Edges*, die nur die Sichtbarkeit oder einen nur bedingt zugänglichen Bereich indizieren sollen, kann weiterer Nutzen aus einer solchen Unterscheidung verschiedener *Node*- und *Edge*-Typen gezogen werden: So können einerseits spezifischere Anweisungen wie „Betreten Sie den Hörsaal!“, „Gehen Sie am Büro vorbei!“ oder „Gehen Sie über den Zebrastreifen!“ gegeben werden. Weiterhin lassen sich dadurch verschiedene Arten von *Nodes*, *Edges* bei der Routenberechnung unterschiedlich gewichten, um den Routenverlauf an Nutzerpräferenzen anzupassen (C. Becker & Dürr, 2005; Fallah et al., 2013). Details hierzu finden sich in Kapitel 3 „Präferenzbasierte Pfadplanung“.

Unterabschnitt 2.2.1 „Semantisches Modell“ zeigt auf, dass bereits semantische Modelle existieren, die systematisch auflisten, welche Entitäten berücksichtigt werden sollten, um beispielsweise Personen mit eingeschränkter Mobilität zu unterstützen. Bei der Spezifikation des Modells ist noch nicht festgestanden, welche Typen von *Nodes* und *Edges* für die Navigation in den Projekten *NADINE* und *URwalking* relevant sind und weiterhin, welche Typen überhaupt anhand der zur Verfügung stehenden Pläne unterschieden werden können. So ist die in Dudas et al. (2009) genannte Knopfhöhe in Aufzügen zweifellos relevant für die Berechnung von Routen, die den Bedürfnissen von RollstuhlfahrerInnen gerecht werden. Dennoch kann der Aufwand, diese Information systematisch für alle Aufzüge zu ermitteln, im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden.

Die folgende Auflistung zeigt die Entitäten auf, deren Unterscheidung sich im Rahmen dieses Forschungsprojektes als sinnvoll erwiesen hat. Das semantische Modell ist dabei iterativ an sich ergebenden Anforderungen beim Einsatz in Innen- und Außenbereichen der Universität Regensburg, in Gebäuden der Technischen Universität Berlin sowie deren umgebende innerstädtische Außenbereiche, an zahlreichen Haltestellen und Bahnhöfen sowie in einem Einkaufszentrum angepasst worden.

Das Modell bietet somit eine Basis zur Modellierung von großen Gebäudekomplexen und Außenbereichen. Dennoch kann das erarbeitete Modell keineswegs als vollständig angesehen werden, vielmehr zeigt sich die Notwendigkeit, das zugrundeliegende semantische Modell dynamisch zu gestalten, sodass sich dieses bei Bedarf schnell erweitern lässt. Je nach Einsatz des Modells sind weitere Anpassungen an spezielle Umgebungen sinnvoll. So könnte die Zielauswahl in einem Krankenhaus beispielsweise durch eine Unterscheidung von Patientenzimmern und Operationsräumen verbessert werden. Weiterhin wird in den folgenden Erläuterungen einiger Kategorien auf Vorteile feingranularer Aufteilungen eingegangen, die aufgrund des zur Erhebung nötigen Aufwands aber nicht umgesetzt werden. Falls Informationen zu Steigung von Rampen vorliegen, könnten diese beispielsweise im Modell integriert werden, um Routenverläufe besser an die Bedürfnisse mobilitätseingeschränkter Personen anpassen zu können.

Kategorien, die lediglich im Rahmen einzelner studentischer Arbeiten zum Einsatz gekommen sind und nicht relevant für die hier behandelte Forschungsfrage sind, werden im Folgenden nicht aufgelistet.

Hinter jedem Element ist in Klammern die festgelegte Bezeichnung angegeben, die in der technischen Umsetzung verwendet wird, um die Elemente eindeutig zu benennen. Details hierzu finden sich im Abschnitt 2.4 „Technische Umsetzung“. Eine kurze Beschreibung soll den Einsatz jedes Elements erläutern. Wie zu Beginn dieses Abschnitts erwähnt, lassen sich die Kategorien nutzen, um Objekte in Anweisungen gezielt zu referenzieren und um Routenverläufe durch unterschiedliche Gewichtung der Entitäten an Präferenzen anzupassen. Auf diesen allgemeinen Mehrwert wird deshalb bei den einzelnen Elementen der folgenden Liste nicht detailliert eingegangen.

Node-Kategorien



Einfacher Stützpunkt (Branch)

Dieser allgemeine Typ wird zur Modellierung von Wegen verwendet. Wenn sich eine Entität entlang der Route in keine der noch folgenden Kategorien einordnen lässt, kann dieser Typ weiterhin verwendet werden, um möglichst generische Grafiken und Umschreibungen zur Referenzierung anzuzeigen.



Flurtür (Doorway)

Dieser Typ repräsentiert eine einfache Tür, die beim Betreten oder Durchschreiten von Gebäuden passiert wird. Diese Flurtüren werden von Türen unterschieden, die beim Betreten eines Büros oder Hörsaals durchschritten werden (siehe *Node*-Typ „Raumtür“). Aufgrund der großen Zahl an Bürotüren in Universitätsgebäuden, scheint es nicht sinnvoll, diese in Routenanweisungen wie „Gehen Sie links an der Tür vorbei!“ zu referenzieren. Durch die Unterscheidung der verschiedenen Türarten kann dennoch Bezug auf (Flur-)Türen in Hallen und Gängen der Universitätsgebäude, die weitaus weniger häufig vorkommen, genommen werden.



Automatische Flurtür (Doorwayautomatic)

Im Unterschied zum Typ „Flurtür“ kann eine solche Tür automatisch per Bewegungssensor geöffnet werden. Eine Unterscheidung dieser Türart ist notwendig, um sie bei der Berechnung von Routen für mobilitätsingeschränkte NutzerInnen niedriger zu gewichten als Türen des Typs „Flurtür“.



Elektrische Flurtür (Doorwayelectric)

Diese Art von Tür kann automatisch geöffnet werden, allerdings verfügt sie nicht über einen Bewegungssensor – zum Öffnen muss also ein Knopf betätigt werden. Dies ermöglicht grundsätzlich die Anpassung der Gewichtungen für die Bedürfnisse von Personen, die aufgrund ihrer eingeschränkten Bewegung Schwierigkeiten bei der Betätigung des Knopfes haben.



Karussell-Flurtür (Revolvingdoor)

Der Typ „Revolvingdoor“ kennzeichnet eine Karusselltür, die beim Betreten oder Durchschreiten von Gebäuden passiert wird. Ein wesentlicher Grund für die Berücksichtigung dieses Typs ist, dass ein solcher Eingang von RollstuhlfahrerInnen nicht passiert werden kann.



Raumtür (Entry)

Dieser Typ kennzeichnet Türen, die beim Betreten eines Raumes, wie einem Büro, Hörsaal oder Geschäft, durchschritten werden. Indem dieser Typ von „Flurtüren“, „automatischen Flurtüren“ und „elektrischen Flurtüren“ unterschieden wird, können diese Türen bei der Präsentation der Route auf unterschiedliche Weise referenziert werden. So ist es beispielsweise möglich, automatisiert festzustellen, welches Büro oder Geschäft durch eine „Raumtür“ betreten wird, sodass beim Durchschreiten Anweisungen wie "Betreten/Verlassen Sie das Büro Nummer 3.0.84" gegeben werden können.



Freiflächen (Areanode)

Um freie Bereiche, wie Außenflächen, Hallen und breite Korridore, abzubilden, innerhalb derer immer die direkte Luftlinie eingeschlagen werden kann, kommt dieser Typ zum Einsatz. Mehr Details hierzu finden sich in Unterabschnitt 2.4.4 „Areanodes“.



Verknüpfungspunkt (Link)

Durch *Nodes* dieses Typs können Elemente der zweiten Hierarchieebene (siehe Unterabschnitt 2.3.1 „Hierarchische Aufteilung“), die aufgrund des hierarchischen Aufbaus in verschiedenen XML-Dateien liegen (siehe Abschnitt 2.4 „Technische Umsetzung“), an bestimmten Punkten verknüpft werden. Ein *Node* vom Typ „Link“ repräsentiert also beispielsweise einen Übergang der Zentralbibliothek zum Außengelände am Campus der Universität. Weiterhin lassen sich diese „Verknüpfungspunkte“ nutzen, um mehrere Stockwerke eines Gebäudes nahtlos zu verbinden. Dies ist in speziellen Situationen sinnvoll, in denen zwei Stockwerke fließend inein-

ander übergehen, sodass keine etagenübergreifende *Leveledge* verwendet werden kann, die einen Aufzug oder eine Treppe kennzeichnet.



Geographische Koordinaten (GpsLink)

Dieser Typ dient dazu, eine Transformationsvorschrift des verwendeten lokalen Koordinatensystems in ein globales Bezugssystem zu ermitteln (siehe C. Becker & Dürr, 2005). Eine genaue Beschreibung des Verfahrens findet sich in Unterabschnitt 2.4.5 „Transformation lokaler Koordinaten in ein globales Referenzsystem“.



Landmarke (Landmark)

Objekte entlang der Route, die in Routenanweisungen referenziert werden sollen, die sich aber in keine andere, speziellere Kategorie, wie beispielsweise „Phone“, einordnen lassen, können durch diesen Typ gekennzeichnet werden. Im Gegensatz zu *Nodes* der Kategorie „einfacher Stützpunkt“, welche ebenfalls allgemein als Referenzpunkte fungieren können, werden *Nodes* der Kategorie „Landmarke“ nicht als mögliche Start- oder Zielpunkte ausgewählt. Diese Unterscheidung ist notwendig, da gelegentlich Objekte referenziert werden sollen, die zwar sichtbar, aber nicht erreichbar sind, zu denen somit keine mögliche Route existiert.



Büro (Office)

Büros stellen Start-, Ziel- und Referenzpunkte in den Gebäuden der Universität dar.



Hörsaal (Lecturehall)

Hörsäle stellen ebenfalls Start-, Ziel- und Referenzpunkte in den Gebäuden der Universität dar.



Einzelhandelsgeschäft (Shop)

Dieser *Node*-Typ kennzeichnet Geschäfte. Diese kommen auf dem Campus der Universität nur vereinzelt vor, stellen aber mögliche Start- und Zielpunkte dar und eignen sich aufgrund Ihrer Einzigartigkeit und Größe als Bezugsobjekte in Routenanweisungen. Weiterhin kommt dieser Typ bei der Navigation in einem Einkaufszentrum zum Einsatz.



Toilette (Toilet)

Toiletten kommen in den Gebäuden der Universität in regelmäßigen Abständen vor und bieten sich deshalb als Bezugspunkte an. Weiterhin können Toiletten Zielpunkt einer Route sein. Ein mögliches Nutzungsszenario eines Navigationssystems stellt auch die Suche nach dem nächstgelegenen Element einer bestimmten Art dar. Die Kennzeichnung eines

Node als „Toilette“, „Geldautomat“, „Parkplatz“ oder „Telefonzelle“ ermöglicht somit weiterhin die Umkreissuche nach diesen Entitäten. Trotz des dafür geeigneten Umgebungsmodells wird eine solche Suche im Rahmen dieser Arbeit nicht implementiert.



Geldautomat (EC)

Bankautomaten kommen in den Gebäuden der Universität an einigen Orten vor und werden deshalb durch diese spezielle Kategorie berücksichtigt.



Parkplatz (Parking)

Teils weitläufige Parkstände sind Start-, Ziel- und Referenzpunkte bei der Navigation am Campus und an Verkehrsknotenpunkten.



Telefonzelle (Phone)

Telefonzellen sind Start-, Ziel- und Referenzpunkte bei der Navigation am Campus.



Ausstellungsstand (Booth)

Diese Kategorie ist speziell für die Präsentation des Projektes *URwalking* auf Messen angelegt.



Bushaltestelle (Bus)

Im Projekt *NADINE* aber auch am Campus der Universität sollen Bushaltestellen als Start- und Zielpunkte gewählt sowie in Navigationsanweisungen referenziert werden können.



Untergrundbahn (Subway)

U-Bahnhöfe werden als Start-, Ziel- und Referenzpunkte ausschließlich für die Navigation an Haltestellen im Projekt *NADINE* benötigt.



Bahnhaltestelle (Train)

Auch Bahnhaltestellen kommen ausschließlich im Projekt *NADINE* zum Einsatz und dienen als Start-, Ziel- und Referenzpunkte.



Straßenbahnhaltestelle (Tram)

Straßenbahnhaltestellen werden, genau wie Bus, Bahn- und U-Bahnhaltestellen, bei der Navigation in Nürnberg im Rahmen des Projektes *NADINE* als Start-, Ziel- und Referenzpunkte genutzt.



Allgemeine Haltestelle (Multistation)

Ein Haltemast, der sowohl von Bussen als auch von Straßenbahnen angesteuert wird, kann durch generische Anweisungen wie „Gehen Sie an

der Haltestelle vorbei!“ referenziert werden. Dies wird für die Navigation an Haltestellen im Projekt *NADINE* benötigt, ist für die Navigation am Campus der Universität Regensburg aber nicht relevant.

Edge-Kategorien

Eine *Edge* kennzeichnet eine Verbindung zweier *Nodes*. Dabei wird im Folgenden eine Unterscheidung zwischen *Edges* getroffen, die auf der selben Etage liegende, und *Edges*, die auf unterschiedlichen Etagen liegende *Nodes* verknüpfen. Die zweite Kategorie kennzeichnet somit Stockwerksübergänge, zur Unterscheidung werden diese als *Leveledges* bezeichnet. Die Unterscheidung ergibt sich aus technischen Gründen, da für die verschiedenen Kategorien unterschiedliche Informationen gespeichert werden müssen. So ist es beispielsweise notwendig, die unterschiedlichen Stockwerke der durch eine *Leveledge* verbundenen *Nodes* zu hinterlegen. Während sich die Länge eines Weges innerhalb eines Stockwerks im vorhandenen Kartenmaterial ablesen lässt, kann die Länge einer Rampe oder Treppe im Allgemeinen nicht anhand dieser Pläne ermittelt werden. Weiterhin wird festgelegt, dass *Edges* innerhalb einer Etage bis auf einige Ausnahmen bidirektional sind, also eine wechselseitige Verbindung zwischen *Nodes* darstellen. *Leveledges* werden dagegen als unidirektional festgelegt, da speziell Rolltreppen in Kaufhäusern häufig an unterschiedlichen Stellen nach oben bzw. nach unten führen.

Edges innerhalb einer Etage

- → Überdachter Fußweg (0 = simple footway)

Hauptsächlich werden *Edges* dieser Art zur Kennzeichnung von Wegen innerhalb Gebäuden verwendet. Grundsätzlich sollen dadurch aber überdachte von unüberdachten Wegen unterschieden werden, sodass die Präferenz, bei Regen nicht nass zu werden, berücksichtigt werden kann.

- → Unüberdachter Fußweg (6 = outdoor edge)

Edges dieses Typs stellen unüberdachte Wege dar, die abhängig von Nutzerpräferenzen und Wetterlage höher gewichtet werden können.

- → Geschlossener Bereich (1 = intra shop way)

Wege durch abgetrennte Bereiche, die zwar potentielle Zielpunkte darstellen, die zur Abkürzung des Weges aber nicht durchschritten werden sollen, werden speziell gekennzeichnet. Zu diesen gehören beispielsweise Hörsäle, Büros und Einzelhandelsgeschäfte. Worboys (2011) geht speziell auf diese Routenabschnitte, die er als „nicht-transitiv“ bezeichnet, ein: Obwohl die Relation „es existiert ein Weg“ zwischen einem Gang (A) und einem Büro und weiterhin zwischen dem Büro und einem zweiten Gang (B) existiert, stellt

die Verbindung von Gang (A) zu Gang (B) über das Büro keinen potentiellen Pfad dar. Als einen möglichen Lösungsansatz nennt er die höhere Gewichtung dieser nicht-transitiven Abschnitte. Dieser Ansatz soll hier verfolgt werden. Weiterhin werden *Edges* dieses Typs dazu verwendet, um *Nodes*, die als „Raumtür“ gekennzeichnet sind, als Eingänge zu einem bestimmten Büro, Hörsaal etc. zu identifizieren. Dadurch können Anweisungen, wie beispielsweise „Betreten/Verlassen Sie Hörsaal H4“, generiert werden.

• Stufen (2 = stairs)

Als „Stufen“ werden Treppen innerhalb einer Etage gekennzeichnet. Diese müssen insbesondere bei Routen für RollstuhlfahrerInnen vermieden werden. Die Reihenfolge der Auflistung der durch die *Edge* verbundenen *Nodes* wird genutzt, um zu ermitteln, ob die Stufen auf einer bestimmten Route nach oben oder nach unten laufen. Dadurch können Anweisungen wie „Nehmen Sie die Stufen nach oben!“ generiert werden. Treppen, die unterschiedliche Etagen miteinander verbinden, werden von diesen Stufen unterschieden und finden sich in der nachfolgenden Kategorie „Etagenübergreifende Edges“.

• Rampe (3 = stairs with ramp)

Dieser Kategorie werden Rampen zugeordnet, die innerhalb eines Stockwerks verlaufen. Je nach Präferenzen eines Nutzers sind diese den „Stufen“ vorzuziehen. Dudas et al. (2009) berücksichtigen in ihrem semantischen Modell zusätzlich den Steigungswinkel von Rampen, da dieser insbesondere für Personen mit eingeschränkter Mobilität relevant ist. In Kasemsuppakorn und Karimi (2008) und Kasemsuppakorn und Karimi (2009) wird untersucht, welche Informationen bei der Berechnung von Routen, die an die Bedürfnisse von RollstuhlfahrerInnen angepasst werden sollen, relevant sind. Auch hier wird die Steigung von Fußwegen berücksichtigt. Zusätzliche dort aufgelistete Kriterien sind die Breite von Fußwegen oder der Grad der auf einem Fußweg verkehrenden Personen, der für Menschen mit eingeschränkter Mobilität zu Problemen führen kann. Kasemsuppakorn und Karimi (2009) vergleichen weiterhin die Projekte „MAGUS“ (Beale, Field, Briggs, Picton & Matthews, 2006) und „U-ACCESS“ (Sobek & Miller, 2006), die ebenfalls die Anpassung von Routen an die Bedürfnisse von RollstuhlfahrerInnen zum Ziel haben. Auch in diesen findet die Steigung von Rampen Beachtung, im Projekt „U-ACCESS“ wird weiterhin deren Breite und der Radius von Wendekreisen berücksichtigt. Auch die deutsche DIN-Norm 18040-3 gibt Empfehlungen zur barrierefreien Bebauung

in öffentlichen Verkehrsräumen und liefert dadurch Hinweise, dass beispielsweise weiterhin die Gesamtlänge von Rampen, die Höhe und der Durchmesser von beidseitigen Handläufen, sofern vorhanden, und die Höhe von Radabweisern relevant für die Generierung barrierefreier Routen sind. Trotz des erkennbaren Nutzens der aufgezeigten Daten war eine Erhebung aus Zeitgründen weder im Projekt *URwalking* noch im Projekt *NADINE* möglich. In zukünftigen Arbeiten könnte durch die Definition weiterer Unterkategorien von Rampen Routen besser an die Bedürfnisse mobilitätseingeschränkter Personen angepasst werden. Anhand einer Kategorisierung unterschiedlicher Hilfsmittel, wie Rollstuhl- oder Rollatortypen, könnte ermittelt werden, welche Arten von Rampen jeweils Schwierigkeiten bereiten und deshalb unterschieden werden sollten.

Entsprechend der Unterscheidung von Stufen innerhalb eines Stockwerks und Stufen, die mehrere Stockwerke verbinden, finden sich stockwerksübergreifende Rampen in der nachfolgenden Kategorie „Etagenübergreifende Edges“.

● Sichtbarer Bereich (9 = visibility edge)

Verschiedene *Node*-Typen eignen sich, in Anweisungen, wie „Gehen Sie am Kunstwerk vorbei!“, referenziert zu werden. Sofern eine *Edge* indiziert, dass ein direkter Weg zwischen zwei *Nodes* existiert, wird davon ausgegangen, dass jeder *Node* auch vom jeweils anderen aus gesehen werden kann (zumindest wenn der Abstand zwischen diesen unter einem bestimmten Schwellwert liegt). Bei der Modellierung der Umgebung tritt allerdings gelegentlich der Fall auf, dass ein *Node* ein Objekt verkörpern soll, das sich zwar eignet, in Routenanweisungen referenziert zu werden, das aber nicht durch einen Weg erreicht werden kann. Beispielsweise ist das Schaufenster eines Geschäfts in der Regel gut von außen sichtbar, durch das Fenster verläuft jedoch kein möglicher Weg in das Geschäft hinein. Die Entfernung der anzunehmenden Nutzerposition zu einem möglicherweise zu referenzierenden Objekt reicht alleine aber nicht als Indikator aus um festzustellen, ob dieses Objekt auch gesehen werden kann. Beispielsweise könnte eine Mauer die Sicht versperren. Aufgrund dieser Problematik wird die Möglichkeit geschaffen, *Edges* zu erstellen, die lediglich signalisieren, dass ein *Node* von einem anderen *Node* aus gesehen werden kann, obwohl kein Weg zwischen diesen existiert.

● Verbotener Bereich (10 = forbidden edge)

Zugänge zu Bereichen, die, beispielsweise aus Sicherheitsgründen,

nur durchschritten werden sollen, wenn es keinen alternativen Weg zum Ziel gibt, werden mit dieser Art von *Edges* modelliert. Solche Übergänge können bei der Pfadplanung dann unabhängig von ihrer Länge höher gewichtet werden. Am Campus der Universität kommt diese Kennzeichnung unter anderem bei Korridoren durch interne Bereiche der Fakultät für Chemie und Pharmazie zum Einsatz.

●→ Unidirektionaler Fußweg (20 = oneway path)

Wie bereits erwähnt, kennzeichnen *Edges* innerhalb einer Etage im Regelfall die wechselseitige, bidirektionale Erreichbarkeit zweier verbundener *Nodes*. Am Campus der Universität gibt es allerdings einige Notausgänge, durch die Gebäude verlassen, aber nicht betreten werden können. Die Modellierung eines solchen Szenarios könnte prinzipiell auch durch Verwendung spezieller *Nodes* erfolgen, die Türen kennzeichnen, die nur einseitig geöffnet werden können. Einerseits ist die technische Umsetzung mithilfe von *Edges* aber einfacher möglich. So kann die Richtung der Durchschreitung einer *Edge* durch die Reihenfolge impliziert werden, in dem die zwei zu verbindenden *Nodes* aufgelistet werden. Im hier spezifizierten Modell wird deshalb vor oder nach einer betreffenden Tür ein als unidirektional gekennzeichneter Fußweg eingefügt. Weiterhin ist es so möglich, Situationen zu modellieren, in denen die Durchschreitungsrichtung nicht durch eine Tür vorgegeben wird. Denkbar ist zum Beispiel eine steile Treppe, auf der aus Sicherheitsgründen keine Personen entgegenkommen sollen.

●→ Beschilderung (4 = sign)

An den Bahnhöfen, die im Zuge des Projektes *NADINE* modelliert wurden, als auch in den Gebäuden der Universität existieren zahlreiche Wegweiser. Es bietet sich an, diese in Anweisungen zu referenzieren, da diese in der Regel gut sichtbar angebracht werden, um Wege zu für Besucher relevanten Zielorten hervorzuheben. Eine *Edge* kann deshalb als Wegweiser gekennzeichnet werden. Die Beschriftung des Schildes kann dann mit dieser *Edge* verknüpft werden, sodass Anweisungen wie „Folgen Sie dem Schild in Richtung Innenstadt“ generiert werden können. Ähnlich wie bei „unidirektionalen Fußwegen“ wird die Richtung, in die ein Schild weist, durch die Reihenfolge der Nennung der durch die *Edge* verbundenen *Nodes* impliziert.

●→ Unterführung (5 = undercrossing)

Durch die Kennzeichnung als „Unterführung“ können Anweisungen wie „Gehen Sie durch die Unterführung!“ generiert werden.

Weiterhin könnten Unterführungen Einfluss auf die Berechnung präferenzabhängiger Routen nehmen, da diese von Weitem nicht einsehbaren Bereiche möglicherweise als unsicher wahrgenommen werden.

- Brücke (15 = bridge)

Brücken können in Anweisungen wie „Überqueren Sie die Brücke!“ referenziert werden.

- Abkürzung (13 = rat run)

Kasemsuppakorn und Karimi (2008) und Kasemsuppakorn und Karimi (2009) geben in Bezugnahme auf den Leitfaden zum 1990 verabschiedeten „Americans with Disabilities Act (ADA)“ an, dass Sand, Kies, feuchte Lehmböden und Wege mit unregelmäßigen Oberflächen, wie beispielsweise Kopfsteinpflaster, die Bewegung für RollstuhlfahrerInnen erheblich erschweren. Da sowohl sandige und erdige Gelände, als auch uneben gepflasterte Wege am Campus der Universität existieren, werden dafür Kategorien spezifiziert. Wege, die speziell bei schlechtem Wetter möglicherweise auch von Personen ohne mobile Einschränkung vermieden werden, werden dabei der Kategorie „Abkürzung“ zugeordnet. Über die Anpassung an Nutzerpräferenzen hinaus können dadurch Anweisungen, wie „Nehmen Sie die Abkürzung!“, generiert werden.

- Pflastersteine (14 = cobblestone)

Bodenbeläge mit Kleinsteinpflaster, die am Campus der Universität Regensburg sowohl in Außen- als auch in Innenbereichen vorkommen, werden der Kategorie „Pflastersteine“ zugeordnet. Dabei steht diese Bezeichnung nur stellvertretend für alle Beläge mit unregelmäßigen Oberflächen, die bei Routen für mobilitätseingeschränkte Personen möglicherweise höher zu gewichten sind. Diese Einteilung könnte weiter spezifiziert und verfeinert werden, um beispielsweise die Anpassung von Routen an bestimmte Rollstuhlarten zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird aus Zeitgründen jedoch auf eine weitere Unterteilung verzichtet, da keine Informationen zu Bodenbelägen am Campus der Universität und an Haltestellen im Rahmen des Projektes *NADINE* vorliegen. Diese müssen somit manuell ermittelt und klassifiziert werden. Ähnlich zur von Kasemsuppakorn und Karimi (2008) genannten Einteilung des Leitfadens zum „Americans with Disabilities Act“ kann zur Beurteilung, welche Bodenbeläge mögliche Hürden für mobilitätseingeschränkte Personen darstellen, auch die deutsche DIN-Norm 18040-3 herangezogen werden. In dieser ist ebenfalls detailliert auf-

gelistet, welche Bodenbeläge mögliche Hindernisse für Personen mit eingeschränkter Mobilität darstellen.

- Bahnübergang (7 = railroad crossing)

Dieser Typ ermöglicht die Referenzierung von Bahnübergängen, die an Haltestellen im Rahmen des Projektes *NADINE* häufig vorkommen, in Routenanweisungen.

- Straßenübergang (8 = street)

Stellen, an denen es sinnvoll ist, eine Straße zu überqueren, obwohl weder eine Fußgängerampel noch ein durch Zebrastreifen gekennzeichneter Fußgängerüberweg vorhanden ist, werden durch eine *Edge* dieses Typs modelliert. Dadurch können entsprechende Anweisungen generiert und Routen an Nutzerpräferenzen angepasst werden.

- Fußgängerüberweg mit Zebrastreifen (11 = zebra crossing)

Fußgängerüberwege, die durch einen Zebrastreifen gekennzeichnet sind, werden durch diesen Typ gekennzeichnet.

- Straßenübergang mit Ampel (12 = pelican crossing)

Diese *Edges* repräsentieren Straßenübergänge mit Fußgängerampeln.

Etagenübergreifende *Leveledges*



Treppe (Stairs)

Diese Kategorie kennzeichnet Treppen. Im Gegensatz zu den Treppen, die der Kategorie „*Edges* innerhalb eines Stockwerks“ zugeordnet sind, stellen die „etagenübergreifenden *Edges*“ einen Übergang zweier unterschiedlicher Geschosse dar.



Rampe (Ramp)

Eine Rampe, die zwei Stockwerke verbindet, wird durch diese Kategorie repräsentiert.



Aufzug (Elevator)

Alle Arten von Aufzügen werden durch *Leveledges* dieser Art modelliert. Eine genauere Unterscheidung verschiedener Aufzugtypen wird aufgrund des dafür notwendigen Aufwands im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet. Eine weitere Unterteilung könnte aber bessere Unterstützung für Personen mit eingeschränkter Mobilität oder eingeschränktem visuellen Wahrnehmungsvermögen bieten. So wird von Dudas et al. (2009) beispielsweise die Knopfhöhe und Tiefe von Aufzügen berücksichtigt.



Rolltreppe (Escalator)

Für die Navigation am Gelände der Universität sind Rolltreppen nicht relevant. Zum Einsatz kommen diese jedoch im Rahmen des Projekts *NADINE* sowie bei der Modellierung eines Einkaufszentrums zur Durchführung mehrere Studien. Dass Rolltreppen im Einkaufszentrum zumeist an unterschiedlichen Stellen auf und ab führen, ist der wesentliche Grund, *Leveledges* grundsätzlich unidirektional zu definieren, sodass je eine Verbindung nach oben und eine weitere zur Kennzeichnung des Wegs nach unten erstellt werden muss.

2.3.4 Geometrische Merkmale

Wie in Abschnitt 2.2 „Forschungsstand“ erläutert, können grundsätzlich geometrische Koordinaten von symbolischen Koordinaten unterschieden werden. C. Becker und Dürr (2005) schreiben, dass durch Tupel dargestellte geometrische Koordinaten Bezug auf ein bestimmtes Referenzsystem nähmen, während symbolischen Koordinaten Positionen als abstrakte Sinnbilder definieren würden.

Durch das in Unterabschnitt 2.3.2 „Graphbasiertes Modell“ spezifizierte Modell kennzeichnen *Nodes* zunächst symbolische Koordinaten, die durch eine eindeutige Identifikationsnummer referenziert werden können. Aufgrund des layoutbasierten Ansatzes, bei dem der Graph anhand des zur Verfügung stehenden Kartenmaterials erstellt wird, werden jedem *Node* zusätzlich geometrische Koordinaten zugeordnet. Wie in Abbildung 2.1 auf Seite 26 dargestellt, lassen sich die *Nodes* durch dieses Koordinatentupel, das relativ zur jeweils genutzten zweidimensionalen Karte angegeben wird, an der richtigen Stelle der Karte anzeigen. Genaue geometrische Informationen zur Höhenlage werden dabei nicht hinterlegt, da diese nicht anhand des zur Verfügung stehenden Kartenmaterials ermittelt werden können. Die Höhe einzelner Etagen wird ausschließlich ordinalskaliert angegeben, indem für jeden Bereich der untersten, dritten Hierarchieebene die Höhenlage in Bezug zu den anderen Ebenen hinterlegt wird. Eine genauere technische Beschreibung folgt in Unterabschnitt 2.4.2 „Hierarchische Aufteilung“.

Wie in Unterabschnitt 2.2.6 „Modellkombinationen“ beschrieben, handelt es sich bei der spezifizierten Modellkombination also um ein hybrides Modell. Durch die Anreicherung symbolischer Koordinaten mit Informationen zur geometrischen Lage wird nach Worboys (2011) die Quantifizierung von Distanz ermöglicht. Allein durch die Bereitstellung lokaler Koordinaten ist es allerdings nicht direkt möglich, Distanzen zwischen *Nodes*, die in unterschiedlichen Stockwerken oder Gebäuden liegen, zu ermitteln. Auf die Unterscheidung lokaler und globaler Referenzsysteme wird in C. Becker und Dürr (2005) eingegangen. Die Autoren schreiben, dass zur Distanzbe-

rechnung die Lage und Orientierung lokaler Koordinatensysteme zueinander oder zu einem globalen System angegeben werden müssten, sodass diese transformiert werden könnten.

Wie in Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“ beschrieben, sind an den U-Bahn-Haltestellen zu Beginn des Projekts *NADINE* keine Informationen zugänglich gewesen, anhand derer die Lage der Bahnhöfe im Bezug zur Umgebung bestimmt werden kann. Anfänglich wird im Umgebungsmodell deshalb keine Transformation der lokalen Koordinaten realisiert. Zu jeder Karte im Außenbereich und zu jeder Etage wird stattdessen ein Maßstab hinterlegt, mit dem zumindest Abstände zwischen lokalen Koordinaten innerhalb eines Bereiches ermittelt werden können. Dadurch ist es möglich, die Gesamtlänge einer berechneten Route zu ermitteln. Bei der Pfadsuche kann die Distanz zweier Punkte aus verschiedenen Bereichen jedoch nicht als Heuristik genutzt werden, mit der sich beispielsweise beim Einsatz eines A*-Algorithmus die Restkosten zum Ziel schätzen lassen. Als Alternative zum A*-Algorithmus wird deshalb zunächst eine hierarchische Pfadsuche implementiert, auf die in Unterabschnitt 3.3.2 „Hierarchische Pfadplanung“ eingegangen wird.

Im weiteren Verlauf des Projektes sind vom Projektpartner georeferenzierte Punkte an den U-Bahn-Haltestellen bereitgestellt worden (siehe Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“). Der Ansatz, lediglich einen Maßstab zu hinterlegen, wird deshalb wieder verworfen. Stattdessen wird eine Transformation in ein globales Referenzsystem ermöglicht, die zahlreiche Vorteile bietet.

Dadurch lassen sich einerseits jedem Punkt im Umgebungsmodell globale Geokoordinaten zugeordnet, was beispielsweise die erwähnte Nutzung der Luftlinie als Heuristik ermöglicht. Auch Gebäudekarten können dadurch bei der Anzeige der Route im Navigationssystem in größere Umgebungskarten eingebettet werden. Weiterhin kann die Transformationsvorschrift invertiert werden, um vorhandene Geokoordinaten im Umgebungsmodell zu finden. Beispielsweise kann eine durch GPS bestimmte Position eines Nutzers dadurch auf einer Gebäudekarte angezeigt oder als Start einer zu berechnenden Route herangezogen werden (Krisp & Keler, 2015; Küpper, 2005). Eine Beschreibung, wie diese Transformation konkret für das spezifizierte Modell umgesetzt wird, findet sich in Unterabschnitt 2.4.5 „Transformation lokaler Koordinaten in ein globales Referenzsystem“.

2.4 Technische Umsetzung

Aufbauend auf den aufgeführten Spezifikationen soll in diesem Abschnitt die technische Umsetzung des Umgebungsmodells erläutert werden. Einige Problemstellungen sind dabei erst durch die konkrete Festlegung aller Details erkannt worden – oft sind die technischen Spezifikationen jedoch auch willkürlich gewählt und austauschbar. So erfolgt beispielsweise die Angabe des Stockwerks über ein *Attribut* mit der

Bezeichnung „storey“. Die Wahl dieser genauen Bezeichnung hat natürlich keinen wissenschaftlichen Wert und erfolgt nur, um eine konsistente Datengrundlage zu schaffen. Die Intention dieses Abschnittes ist es somit in erster Linie nicht, einen verallgemeinerbaren Ansatz aufzuzeigen. Vielmehr soll die beispielhafte Umsetzung helfen, die beschriebene theoretische Spezifikation besser nachvollziehen zu können. Auch das Verständnis des in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ beschriebenen Verfahrens zur Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen soll durch Aufzeigen der genauen Datengrundlage erleichtert werden.

2.4.1 XML-Format

Zur Speicherung des Umgebungsmodells wird die vom „World Wide Web Consortium (W3C)“ spezifizierte „Extensible Markup Language (XML)“ gewählt (W3C, 2008). Diese Auszeichnungssprache bietet sich an, da sich deren Struktur zur maschinellen Verarbeitung eignet, da sie im Gegensatz zu Binärdaten aber auch ohne weitere Hilfsmittel gelesen und editiert werden kann. Die Verwendung einer relationalen Datenbank wird zunächst in Betracht gezogen, da ein schneller Zugriff auf Datensätze ermöglicht wird und der Ansatz gut skaliert. Beispielsweise wird eine Datenbank im Projekt „OpenStreetMap“ (OpenStreetMap contributors, 2017) zur Speicherung des Umgebungsmodells verwendet. Aufgrund der Anforderung, einzelne Gebäude an StudentInnen weitergeben zu können, wird jedoch die Entscheidung getroffen, das Umgebungsmodell in mehreren XML-Dateien zu speichern. Somit muss kein Zugriff auf einen (Datenbank-)Server bereitgestellt werden, um erstellte Modelle, beispielsweise im Rahmen der Lehre, zur Verfügung stellen zu können. Die Skalierbarkeit wird dabei durch die hierarchische Aufteilung des Umgebungsmodells in mehrere XML-Dateien sichergestellt.

Da *Knoten* bzw. *Nodes* sowohl Bestandteile des graphbasierten Umgebungsmodells als auch jeder XML-Datei sind, soll kurz auf die verwendete Begrifflichkeit eingegangen werden. Zur eindeutigen Unterscheidung werden die Knotenpunkte im Graphen in dieser Arbeit als *Nodes* bezeichnet, während die Elemente der Baumstruktur einer XML-Datei mit dem Begriff *Knoten* referenziert werden. Jedem *Knoten* innerhalb einer XML-Datei können weiterhin mehrere *Attribute* zugeordnet werden. Beispielsweise ist in Listing 2.1 auf der nächsten Seite dem *Knoten* „graph“ das *Attribut* „territory“ zugeordnet.

Eine „XML Schema Definition (XSD)“, die die Struktur eines modellierten Bereichs festlegt, findet sich im Anhang dieser Arbeit in Abschnitt A.1 „XML Schema Definition des Umgebungsmodells“. Der Aufbau eines solchen Bereichs und die Funktion der einzelnen *Knoten* und *Attribute* wird in den folgenden Unterabschnitten erläutert.

Listing 2.1: Hierarchische Aufteilung der Stockwerke innerhalb eines Gebäudes

```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
2 <graph territory="Uni_Regensburg" name="Rechenzentrum">
3   <level id="1" storey="0"/>
4   <level id="2" storey="1"/>
5   <level id="3" storey="2" name="Turm_A"/>
6   <level id="4" storey="2" name="Turm_B"/>
7   <level id="5" storey="-1"/>
8 </graph>
```

2.4.2 Hierarchische Aufteilung

Wie in Abschnitt 2.3 „Spezifikation des Umgebungsmodells“ genauer beschrieben, wird die Umgebung in drei hierarchische Ebenen unterteilt: Die erste Hierarchieebene bilden die verschiedenen Einsatzgebiete des Navigationssystems. Auf dieser Ebene wird beispielsweise das Gebiet „Universität Regensburg“ vom Gebiet „Verkehrsverbund Nürnberg“ unterschieden. Die zweite Hierarchieebene unterteilt das Gebiet weiterhin in kleinere disjunkte Zonen. Im Bereich der Universität Regensburg werden auf dieser Ebene beispielsweise das Campusgelände und die einzelnen Gebäude unterschieden. Im Projekt *NADINE* werden die Verkehrsknotenpunkte voneinander abgetrennt. Falls vorhanden, werden einzelne Ebenen eines Gebäudes dann auf der dritten Hierarchieebene unterschieden.

In der konkreten Umsetzung besteht jeder Bereich der ersten Hierarchieebene aus einer XML-Datei oder einem Zusammenschluss mehrerer. Jede XML-Datei beinhaltet wiederum eine Zone der zweiten genannten Hierarchieebene. Wenn das Gebiet der ersten Hierarchieebene vergrößert wird, erhöht sich somit die Anzahl der XML-Dateien, die diesem Bereich zugeordnet sind. Eine Zone der zweiten Hierarchieebene, im konkreten Anwendungsfall also beispielsweise ein einzelnes Gebäude im Bereich der Universität Regensburg, kann deshalb unabhängig von der Größe des gesamten Umgebungsmodells separat kopiert und weitergegeben werden. Die Größe der einzelnen Dateien des Gebiets „Universität Regensburg“ reicht dabei beispielsweise von 7 kB bis 500 kB.

In jeder XML-Datei gibt das dem Wurzelknoten zugeordnete Attribut „territory“ nun den Bereich der ersten Hierarchieebene an, dem die jeweilige Datei zugeordnet ist. Listing 2.1 liefert somit beispielhaft ein Gebäude, welches dem Gebiet „Universität Regensburg“ zugeordnet ist. Weiterhin ist der Name dieses Gebäudes im Attribut „name“ hinterlegt – im Beispiel also „Rechenzentrum“.

Die einzelnen „Level“-Knoten stellen die dritte aufgeführte Hierarchieebene dar. Durch die im „id“-Attribut hinterlegte Identifikationsnummer lassen sich diese eindeutig innerhalb der Datei bzw. innerhalb der zweiten Hierarchieebene referenzieren. Das „storey“-Attribut gibt die Position des Stockwerks in dem jeweiligen Gebäude an.

Dabei repräsentiert die „0“ im Regelfall das Erdgeschoss des Gebäudes, höhere Ganzzahlen stehen für höher liegende Stockwerke, Kellergeschosse werden demnach mit negativen Nummern versehen. Im Allgemeinen gibt diese Nummer somit Aufschluss über die Bezeichnung des Stockwerkes. So kann eine Etage mit einem „storey“-Attribut von „1“ bei der Präsentation der Route als „Erstes Stockwerk“ bezeichnet werden. Es gibt jedoch Situationen, in denen abweichende Stockwerksbezeichnungen notwendig sind. Beispielsweise existieren im Bibliotheksgebäude der Universität Regensburg aufgrund der Hanglage des Campus mehrere ebenerdige Stockwerke, die auf verschiedenen Höhenebenen liegen. Die Bezeichnung „Erdgeschoss“ wäre dadurch irreführend. Das zuunterst liegende Kellergeschoss wird deshalb an der Universität offiziell als „Ebene 1“ bezeichnet, die Stockwerke darüber sind fortlaufend nummeriert. Hinzu kommt, dass „Ebene 4“ in zwei Bereiche unterteilt ist – auf einem Zwischengeschoss befinden sich im Lesesaal weitere Arbeitsplätze. Es wird deshalb festgelegt, dass die im „storey“-Attribut angegebenen Ganzzahlen lediglich ordinalskaliert sind. Dadurch kann ermittelt werden, ob ein Zielstockwerk über oder unter dem aktuellen Stockwerk liegt. Die Abstände zwischen Stockwerken können aber variieren, sodass es möglich ist, auch halbe Stockwerke zu modellieren. Alternative Benennungen lassen sich dann bei Bedarf im „name“-Attribut hinterlegen. Durch diese optionale Angabe kann also beispielsweise ein Stockwerk mit „storey=0“ modelliert werden, das nicht dem Erdgeschoss entspricht. In größeren Gebäuden, wie dem Hauptbahnhof in Nürnberg, kommt es auch vor, dass zwei Bereiche, die nicht direkt verbunden sind, auf gleicher Höhenebene liegen. Eine Aufteilung dieser Bereiche auf dritter Hierarchieebene bzw. in mehrere „level“-Knoten bietet sich deshalb an, in einer solchen Situation kann mehrmals derselbe Wert für das „storey“-Attribut vergeben werden.

2.4.3 Graphbasiertes Modell

Jedem „level“-Knoten und somit jeder Etage sind nun mehrere „node“- und „edge“-Knoten zugeordnet. Listing 2.2 zeigt beispielhaft eine Etage, die zwei *Nodes* beinhaltet, die durch eine *Edge* miteinander verbunden sind.

Da die Modellierung layoutbasiert (siehe Unterabschnitt 2.3.2 „Graphbasiertes Modell“), also anhand einer eingebetteten Karte oder eines eingebetteten Architekturplans erfolgen soll, kann im „mapfile“-Attribut des „level“-Knotens der Dateiname der verwendeten Grafik für die jeweilige Etage angegeben werden. Die linke obere Ecke des eingebetteten Architekturplans wird im lokalen Koordinatensystem an der horizontalen Position $x=1$ und der vertikalen Position $y=1$ definiert. Das lokale Bezugssystem wird dann so skaliert, dass dessen Koordinaten den Pixel-Koordinaten der Grafik entsprechen. Ein Bild der Auflösung 640x480 erstreckt sich also im lokalen Bezugssystem vom Koordinatenpunkt (1, 1) bis zum Punkt (640, 480). Um auch vektorbasierte Pläne einbetten zu können, die sich beliebig skalieren lassen, kann

Listing 2.2: Beispiel für eine Etage, in der zwei Nodes durch eine Edge verbunden sind

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
2 <graph>
3   <level id="1" storey="0" mapfile="pt-eg.jpg" width="1754"
      ↳ height="2481">
4     <node id="1" x="1004" y="1469" type="Office"
          ↳ name="Beispielbüro" roomid="3.0.67_A"/>
5     <node id="2" x="1004" y="1488" type="Entry"/>
6     <edge id="1" source="1" sink="2" type="1"/>
7   </level>
8 </graph>
```

durch die *Attribute* „width“ und „height“ die Position des rechten unteren Punktes im lokalen Koordinatensystem festgelegt werden.

Auch den *Node*- und *Edge-Knoten* ist ein „id“-Attribut zugeordnet, das eine Identifikationsnummer spezifiziert, die jeweils innerhalb des Stockwerks eindeutig ist. Jeder *Edge* lassen sich so, mittels der *Attribute* „source“ und „sink“, die Identifikationsnummern zweier *Nodes*, welche durch die *Edge* verbunden werden, zuordnen. Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“ gibt eine Übersicht über die verschiedenen Arten von *Nodes* und *Edges*, die im Kontext dieser Arbeit unterschieden werden. Die jeweilige Kategorie wird durch das „type“-Attribut angegeben. Listing 2.2 zeigt somit eine Situation, in der das „Beispielbüro“ durch eine Raumtüre betreten werden kann. Lokale Koordinaten werden als Ganzzahlen in den *Attributen* „x“ und „y“ jedes *Node* hinterlegt.

Weiterhin kann jedem *Node* ein Name durch das „name“-Attribut und eine Raumnummer durch das „roomid“-Attribut zugeordnet werden. Dies ermöglicht die Suche nach einem bestimmten *Node*, der dann beispielsweise als Ziel angesteuert werden kann. Auch in Anweisungen kann ein Punkt auf der Route durch Angabe der Bezeichnung oder der Raumnummer referenziert werden. Um die Zielsuche im Navigationssystem weiter zu verbessern, werden *Nodes*, die als anzusteuernde Zielpunkte in Frage kamen, weiterhin verschiedenen Kategorien zugeordnet. Durch das Attribut „isdestination“ können hierfür alle durch Kommata abgetrennten Zielkategorien angegeben werden, denen ein *Node* zugeordnet ist. Weitere Stichworte, die die Suche nach einem bestimmten *Node* erleichtern sollen, können im Attribut „tags“, ebenfalls durch Kommata abgetrennt, aufgelistet werden. Untersuchungen, inwieweit dieses Vorgehen die Benutzbarkeit des Systems verbessert, werden im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht durchgeführt und verbleiben als Inhalt potentiell anschließender Forschungsarbeiten. Durch Angabe des „imageid“-Attributs kann einem *Node* zusätzlich ein Foto zugeordnet werden, das sich bei der Anzeige einer Route gegebenenfalls einblenden lässt.

Nodes aus unterschiedlichen Etagen können untereinander durch *Leveledges* verbunden werden, die außerhalb des „Level“-*Knotens* zu definieren sind. Die Identifikationsnummer einer *Leveledge*, die innerhalb einer XML-Datei eindeutig ist, wird im *Attribut* „id“ eingetragen. Durch Angabe des „type“-*Attributs* kann, genau wie bei *Nodes* und *Edges*, die Art des Etagenübergangs spezifiziert werden (siehe Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“). Listing 2.3 gibt ein Beispiel für einen Aufzug, der das Erdgeschoss mit dem ersten und zweiten Stockwerk verbindet. Da *Leveledges* unidirektional sind (siehe Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“), sind jeweils zwei *Leveledges* notwendig, um zwei Etagen miteinander zu verknüpfen. Dabei wird jede Etage nur jeweils mit der darunter und darüber liegenden Etage verbunden. Da die Relation „Es existiert eine Treppe von *Node* x zu *Node* y“ transitiv ist, lassen sich somit Redundanzen vermeiden. Ansonsten wären bei einer paarweisen Verknüpfung jeweils aller Stockwerke $n^2 - n$ viele *Leveledges* zur Modellierung von n Stockwerken notwendig.

Listing 2.3: Beispiel für drei Etagen, die durch einen Aufzug verbunden sind

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
2 <graph>
3   <level id="1" storey="0" mapfile="pt_eg.jpg" width="1754"
4     ↳ height="2481">
5     <node id="1" x="1000" y="1367" type="branch"/>
6   </level>
7   <level id="2" storey="1" mapfile="pt-1og.jpg" width="1754"
8     ↳ height="2481">
9     <node id="1" x="1065" y="1353" type="branch"/>
10    </level>
11    <level id="3" storey="2" mapfile="pt-2og.jpg" width="1754"
12      ↳ height="2481">
13      <node id="1" x="1030" y="1362" type="branch"/>
14    </level>
15    <leveledge id="1" sourcelevel="2" sinklevel="1" sourcenode="1"
16      ↳ sinknode="1" type="Elevator"/>
17    <leveledge id="2" sourcelevel="1" sinklevel="2" sourcenode="1"
18      ↳ sinknode="1" type="Elevator"/>
19    <leveledge id="3" sourcelevel="3" sinklevel="2" sourcenode="1"
20      ↳ sinknode="1" type="Elevator"/>
21    <leveledge id="4" sourcelevel="2" sinklevel="3" sourcenode="1"
22      ↳ sinknode="1" type="Elevator"/>
23  </graph>
```

Durch Hinterlegen der Identifikationsnummer einer *Node* im *Attribut* „sourcenode“ und der Identifikationsnummer der Etage im *Attribut* „sourcelevel“ wird der Anfang einer etagenübergreifenden *Leveledge* spezifiziert. Der Zielpunkt wird entsprechend in den *Attributen* „sinklevel“ und „sinknode“ eingetragen.

Listing 2.4: Beispiel für einen Verknüpfungspunkt, der XML-Dateien untereinander verbindet

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
2 <graph>
3   <level id="1" storey="0">
4     <node id="1" x="70" y="80" type="link" filename="Campusplan"
      ↳ level="1" nodeid="407"/>
5   </level>
6 </graph>
```

Um Abschnitte der zweiten Hierarchieebene, die in unterschiedlichen XML-Dateien gespeichert sind, zu verbinden, im konkreten Beispiel also Übergänge zwischen den Gebäuden der Universität Regensburg zu modellieren, wird eine spezielle *Node*-Kategorie verwendet. Wie im semantischen Modell bereits erwähnt (siehe Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“), können diese Verknüpfungspunkte auch eingesetzt werden, um *Nodes* unterschiedlicher Ebenen innerhalb einer XML-Datei nahtlos miteinander zu verbinden. Diese Art des Übergangs wird als unidirektional festgelegt. Um zwei XML-Dateien an einem Übergang zu verbinden, muss also in beiden Dateien ein Verknüpfungspunkt erstellt werden. Somit wird redundante Information gespeichert, was möglicherweise zu einer höheren Fehleranfälligkeit bei der Modellierung führt. Zur Sicherstellung der Skalierbarkeit wird dennoch der Ansatz mit unidirektionalen Verbindungspunkten gewählt. Da alle angrenzenden Bereiche in jeder XML-Datei hinterlegt sind, müssen zur Routenberechnung so nicht zwingend alle XML-Dateien komplett eingelesen werden. Erst wenn festgestellt wird, dass eine optimale Route möglicherweise durch einen bestimmten Bereich verläuft, weil bei der Pfadsuche ein solcher Verknüpfungspunkt selektiert wird, kann dieser neue Bereich dann verarbeitet werden. Listing 2.4 zeigt einen Verknüpfungspunkt, der eine Verbindung zu einem *Node* mit der Identifikationsnummer „407“ im Geschoss mit der Identifikationsnummer „1“ in der Datei „Campusplan.xml“ herstellt.

2.4.4 Areanodes

In Stahl und Haupert (2006) wird ein Ansatz zur Modellierung der Umgebung beschrieben, in dem Wege durch Polygone repräsentiert werden. Als Motivation führen die Autoren eine Schwachstelle des in Krüger et al. (2004) vorgestellten Forschungsprototyps „BMW Personal Navigator“ auf, in welchem ein graphbasierter Ansatz verfolgt wird. Die Autoren schreiben, dass die Abstraktion, Wege auf *Edges* zu reduzieren, dazu führe, dass NutzerInnen speziell auf großen Plätzen Umwege anstatt der einfachen, direkteren Verbindung angezeigt werden. Auch Elias (2007) weist darauf hin, dass FußgängerInnen Freiflächen durchschreiten könnten und

deshalb nicht an strikte Trennlinien gebunden seien, wie sie durch Karten für Auto-Navigationssysteme vorgegeben werden.

Auch im praktischen Einsatz des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Navigationssystems ist das beschriebene Problem sowohl in Außen- als auch in Innenbereichen aufgetreten, wie in der linken Grafik in Abbildung 2.2 veranschaulicht wird. Die gelb markierten *Edges* verbinden zwei Bürotüren. Obwohl jede Tür von der jeweils anderen durch einen geradlinigen Weg erreicht werden könnte, führt der kürzeste Pfad im Graphen zuerst in die dem Ziel entgegengesetzte Richtung und weist weiterhin drei unnötige Abbiegungen auf. Nun könnten vorab alle direkten Verbindungen durch *Edges* modelliert werden, um dieses Problem zu umgehen. Dazu müssten alle *Nodes*, deren konvexe Hülle durch keine baulichen Strukturen, wie Mauern, unterbrochen wird, wechselseitig verbunden werden. Für eine solche Teilmenge paarweise verbundener *Nodes* prägten Luce und Perry (1949) den Begriff Clique. Die mittlere Grafik in Abbildung 2.2 veranschaulicht dieses Vorgehen. Alle Zielpunkte im linken und rechten Bereich werden jeweils zu einer Clique verbunden. NutzerInnen kann im Navigationssystem dadurch nun der gelb markierte Weg präsentiert werden. Analog zur wechselseitigen Verbindung von Stockwerken, die in Unterabschnitt 2.3.2 „Graphbasiertes Modell“ Erwähnung findet, würde die Anzahl der notwendigen *Edges* so aber quadratisch ($\sum_1^{n-1} i = \frac{n^2-n}{2}$) in Abhängigkeit der Zahl n der zu verbindenden *Nodes* ansteigen. Um den Modellierungsaufwand gering zu halten, wird deshalb eine spezielle *Node*-Kategorie definiert, die die wechselseitige Verbindung von *Nodes* durch *Edges* ermöglicht, deren Anzahl nur linear mit der Zahl der *Nodes* wächst. Indem mehrere *Nodes* mit einer gemeinsamen „Areanode“ verbunden werden, werden diese als Elemente einer Clique gekennzeichnet. Bei der Routenberechnung wird diese Kennzeichnung dann berücksichtigt, um die direkte Verbindung zweier Punkte innerhalb einer Clique als Pfad vorzuschlagen. Die rechte Grafik in Abbildung 2.2 zeigt, wie sich die beiden Cliques mittels „Areanodes“ modellieren lassen.

2.4.5 Transformation lokaler Koordinaten in ein globales Referenzsystem

In Unterabschnitt 2.3.4 „Geometrische Merkmale“ wird die Notwendigkeit, lokale Geokoordinaten in ein globales Bezugssystem transformieren zu können, begründet. C. Becker und Dürr (2005) schreiben, dass hierfür die relative Position und Orientierung eines lokalen in Bezug auf das globale Bezugssystem spezifiziert werden müssten. Stahl und Haupert (2006) stellen einen Editor zur Erstellung von dreidimensionalen Umgebungsmodellen vor und gehen dabei ebenfalls auf die Transformation von Koordinaten ein. Sie beschreiben, dass in dem von ihnen entworfenen Umgebungsmodell drei Referenzpunkte verzeichnet werden müssten, die lokalen Koordinaten jeweils globale Koordinaten zuordnen. Zusätzlich könne die Skalierung angegeben werden, um Distanzen in Pixelkoordinaten in die Einheit „Meter“ zu

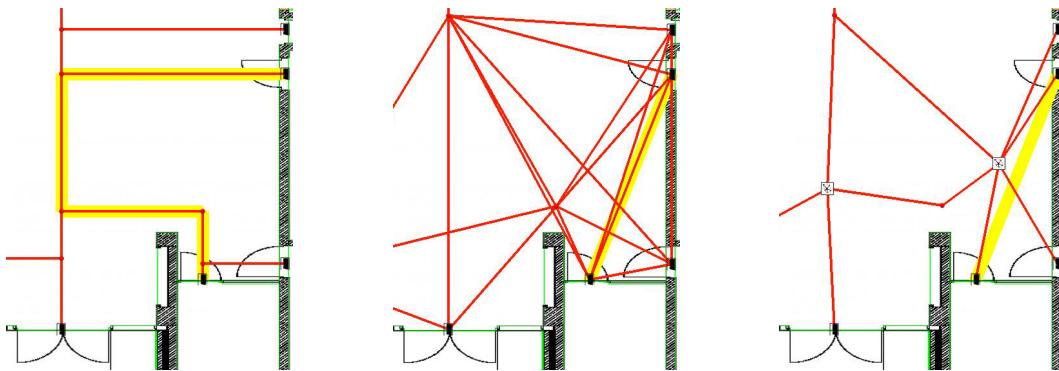


Abbildung 2.2: Da der Aufwand, die umständliche Wegführung (links) durch die Erstellung zusätzlicher Edges zu verhindern, quadratisch steigt (Mitte), werden spezielle „Arealenodes“ zur Kennzeichnung von Cliques verwendet (rechts).

überführen. Stahl und Haupert schreiben, dass bei Karten, die nicht genordet sind, weiterhin ein Kompass ausgerichtet werden könne, durch den die Orientierung der Karte angegeben werde.

In Li et al. (2014) wird auf Konzepte des „IndoorGML“-Standards eingegangen. Es wird angegeben, dass für die Transformation von Koordinaten eines lokalen Bezugssystems – das von den Autoren als „relative coordinate reference system“ bezeichnet wird – folgende Parameter spezifiziert werden müssten:

- Ursprung der Rotation
- Rotationswinkel
- Skalierung
- Translation

Im Kontext des „IndoorGML“-Standards handelt es sich bei diesen Parametern jeweils um Vektoren im dreidimensionalen Raum.

Um die im Rahmen dieser Arbeit spezifizierten Umgebungsmodelle in ein globales Koordinatensystem einzubetten, werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Wie in Unterabschnitt 2.3.4 „Geometrische Merkmale“ beschrieben, wird zunächst für jeden Bereich ein Maßstab hinterlegt. Hierfür ist es notwendig, in jeder eingebetteten Karte bzw. in jedem verwendeten Architekturplan mindestens zwei Punkte zu finden, deren Abstand ermittelt werden kann. Wie in Stahl und Haupert (2006) beschrieben, können Distanzen innerhalb eines lokalen Bezugssystems dadurch in der Einheit „Meter“ angegeben werden. Dies ermöglicht die Ermittlung von (kürzesten) Pfaden, die Ebenen unterschiedlicher lokaler Bezugssysteme durchlaufen.

Aufgrund der zusätzlich zur Verfügung gestellten Verortungspunkte der U-Bahn-Höfe in Nürnberg wird dieser Ansatz aber erweitert. Durch eine Transformation in ein

globales Bezugssystem können so Distanzen zwischen Koordinaten unterschiedlicher Bezugssysteme berechnet werden.

Dabei wird die von Stahl und Haupert (2006) genannte Vorgehensweise, mehrere Referenzpunkte im lokalen Bezugssystem anzugeben, verfolgt. Zur technischen Umsetzung wird eine spezielle *Node*-Kategorie für „geographische Koordinaten“ erstellt (siehe Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“). Dadurch können *Nodes* im lokalen Referenzsystem platziert werden, deren Zuordnung zu einem globalen Bezugssystem bekannt ist. Jeder Referenzpunkt speichert in den *Attributen* „x“ und „y“ lokale Pixelkoordinaten, die einem Punkt im globalen Bezugssystem zugeordnet sind, dessen Koordinaten in den *Attributen* „lon“ und „lat“ hinterlegt sind.

Im Rahmen dieser Arbeit ist dann häufig ein GPS-Empfänger verwendet worden, um Koordinaten an einem bestimmten Punkt zu ermitteln. Da das „Global Positioning System“ (GPS) „WGS 84“ als Referenzsystem verwendet (siehe Intellingence Agency of EUA, 1984), wird „WGS 1984, EPSG:4326“ auch als Bezugssystem zur Verortung der Referenz-*Nodes* genutzt. Somit müssen die von GPS-Empfängern gelieferten Koordinaten bei der Umgebungsmodellierung nicht in ein weiteres globales Referenzsystem umgerechnet werden. Alternativ sind geographische Länge und Breite der einzutragenden Referenzpunkte häufig anhand der frei verfügbaren „OpenStreetMap“-Karten (OpenStreetMap contributors, 2017) zugeordnet worden.

Es gilt nun, eine Funktion $f: \vec{l} \rightarrow \vec{g}$ zu bestimmen, die Koordinaten $\vec{l} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$ des

lokalen Referenzsystems in Koordinaten $\vec{g} = \begin{pmatrix} lon \\ lat \\ 1 \end{pmatrix}$ des globalen transformiert. Dabei

sind affine Transformationen mathematisch speziell einfach, durch Multiplikation mit einer Matrix, realisierbar:

$$\begin{pmatrix} lon \\ lat \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

Die zusätzliche dritte Zeile wird dabei ergänzt, um die Invertierbarkeit der Matrix und damit die Rücktransformation $\vec{l} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \vec{g}$ zu ermöglichen. Dadurch lässt sich auch eine Transformationsmatrix von lokalen in andere lokale Koordinatensysteme berechnen, um beispielsweise Pfade durch Gebäude auf der Karte des Universitätscampus darzustellen: $\mathbf{T}_{\text{lokal nach lokal}} = \mathbf{T}_{\text{Zielbene}}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{\text{Quellebene}}$.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass eine affine Transformation im Allgemeinen nicht geeignet ist, Punkte eines lokalen Referenzsystems in Punkte eines geodätisches Referenzsystem abzubilden. Da Parallelität und Kollinearität bei affinen Transformationen erhalten bleiben, führt die Abbildung von Koordinaten einer ebenen in Koordinaten einer elliptischen Bezugsfläche zu Verzerrungen. In dem im

Rahmen dieser Arbeit definierten Umgebungsmodell setzen sich größere räumliche Bereiche aber aus kleineren Arealen mit jeweils lokalem Bezugssystem zusammen. Der Fehler ist somit unabhängig von der Gesamtfläche des im Umgebungsmodell abgebildeten Bereichs und skaliert nicht. Für die Nutzung in unterschiedlichen Anwendungen werden die lokalen Koordinaten in die Referenzsysteme „WGS 1984 (EPSG 4326)“, „WGS 1984 Pseudo-Mercator (EPSG 3857)“ und „DHDN/Gauß-Krüger (EPSG 31466 – EPSG 31469)“ abgebildet. Die hierbei durch Verzerrungen auftretenden Fehler machen sich im praktischen Einsatz des Systems unabhängig vom verwendeten Referenzsystem nicht bemerkbar und liegen unter den Fehlern, die beispielsweise durch Messungsgenauigkeiten bei der Verortung der Referenzpunkte erzeugt werden.

Zur Bestimmung der Matrix \mathbf{T} können nun die im Umgebungsmodell eingetragenen Referenzpunkte herangezogen werden. Es seien x_i und y_i die Koordinaten des i -ten Messpunktes im lokalen und lon_i und lat_i die Koordinaten des i -ten Messpunktes im globalen Koordinatensystem. Die Koeffizienten t der Matrix sollen nun so gewählt werden, dass gilt:

$$\begin{pmatrix} lon_i \\ lat_i \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{1i} \\ \varepsilon_{2i} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix}$$

Dabei sind ε_{1i} und ε_{2i} Fehler, die, unter Einhaltung möglicher Beschränkungen, minimiert werden sollen.

In einem ersten Ansatz werden t_{11}, t_{12}, t_{13} und t_{21}, t_{22}, t_{23} mit der Methode der kleinsten Quadrate so festgelegt, dass der jeweils quadratische Fehler $\sum \varepsilon_{1i}^2$ bzw. $\sum \varepsilon_{2i}^2$ minimiert wird. Dabei werden zunächst keine weiteren Beschränkungen getroffen. Neben den Operationen „Rotation“, „Skalierung“ und „Translation“, welche laut Li et al. (2014) zur Koordinatentransformation notwendig sind, ist somit auch eine „Scherung“ der Koordinaten möglich. Zur eindeutigen Festlegung der Transformationsmatrix sind mit diesem Verfahren drei Referenzpunkte nötig. Um die Ergebnisse des Verfahrens zu evaluieren, werden bei jeder Berechnung der Transformationsmatrix die Residuen ε_{1i} und ε_{2i} bestimmt und daraus die Abweichung jedes Referenzpunktes in der Einheit „Meter“ berechnet. Somit ist es sinnvoll, mehr als drei Referenzpunkte zur Transformation jedes lokalen Koordinatensystems zu erstellen, sodass sich ungenau oder falsch verortete Referenzpunkte detektieren lassen. Im praktischen Einsatz hat sich gezeigt, dass sich mit diesem Verfahren Abweichungen ergeben, die in den Modellen der Universität Regensburg bei durchschnittlich 0,8 m liegen. An einigen Stellen ergeben sich Residuen mit bis zu 1,5 m, die sich auf die Unterschiede der Architekturpläne und der zur Verortung verwendeten „OpenStreetMap“-Karten zurückführen lassen. Um darüber hinaus beurteilen zu können, ob das Verfahren geeignet ist, um berechnete Pfade während der Navigation in Karten einzubetten, werden die *Nodes* und *Edges* der Ebenen eines

Gebäudes anhand der berechneten globalen Koordinaten dreidimensional dargestellt. So lassen sich schnell Abweichungen einer bestimmten Etage erkennen (siehe Abbildung 2.3 auf der nächsten Seite). Weiterhin wird das Graphennetz auf eine „OpenStreetMap“-Karte projiziert. So können Abweichungen der verzeichneten Wege und somit Probleme bei der Transformation der Koordinaten erkannt und gegebenenfalls verbessert werden.

Da es in einzelnen Etagen teilweise aufwändig ist, die Koordinaten der Referenzpunkte im globalen Bezugssystem zu bestimmen, wird der Ansatz erweitert. In Etagen mit weniger als drei Referenzpunkten können zusätzliche Referenzpunkte generiert werden, falls in der darüber- oder darunterliegenden Etage bereits erfolgreich eine Transformationsmatrix ermittelt worden ist. Hierfür werden die Koordinaten aller Aufzüge im globalen Bezugssystem bestimmt und auf die *Nodes*, welche durch eine *Leveledges* verbunden sind, übertragen. Zur Veranschaulichung soll folgendes Beispiel mit einem zweistöckigen Gebäude dienen: Im Erdgeschoss ist bereits eine Transformationsmatrix erstellt worden, da ausreichend viele Referenzpunkte verzeichnet worden sind. Falls die Etagen nun durch mindestens drei Aufzüge verbunden sind, kann die Position der Aufzugschächte auf das erste Obergeschoss übertragen werden. Somit lässt sich die Transformationsmatrix im ersten Stockwerk anhand der Lage der Aufzüge im globalen Koordinatensystem erstellen. Da häufig nicht genügend viele Aufzüge vorhanden sind, werden zusätzlich die durch *Leveledges* verbundenen Treppenhäuser genutzt, um globale Koordinaten auf angrenzende Stockwerke zu übertragen. Da jedoch Treppen, im Gegensatz zu den Aufzugschächten, nicht geradlinig in die angrenzenden Stockwerke laufen, kommt es dadurch zu Versatzstücken und somit zu Fehlern bei den automatisch generierten Referenzpunkten. In den großflächigen Gebäuden der Universität existieren meist sehr viele Treppenhäuser. Durch die Versatzstücke ergeben sich so zwar größere Residuen, im praktischen Einsatz zeigt sich aber, dass sich aufgrund der Mittlung durch die Methode der kleinsten Quadrate meist brauchbare Ergebnisse erzielen lassen. In einigen Fällen kommt es allerdings zu systematischen Fehlern. Abbildung 2.3 (links) zeigt zur Veranschaulichung ein Gebäude, in dem zwei gegenüber liegende Treppenhäuser einen Versatz erzeugen, der sich über jede Etage fortpflanzt. Die dreidimensionale Darstellung lässt erkennen, dass aufgrund der Scherungsoperation, die beim angewendeten Verfahren möglich ist, die weiter oben liegenden Etagen zunehmend verzerrt abgebildet werden. In einem weiteren Ansatz wird deshalb die zusätzliche Beschränkung, keine Scherung der Koordinaten zuzulassen, zur Berechnung der Transformationsmatrix T getroffen. Zur Ermittlung des Optimums anhand einer erneuten Minimierung der summierten quadratischen Fehler mit der genannten Beschränkung wird der in Arun, Huang und Blostein (1987) beschriebene Algorithmus verwendet. Die mittlere Grafik in Abbildung 2.3 zeigt, dass sich die Verzerrungen durch diesen Ansatz verhindern lassen. Dennoch führen die Ver-

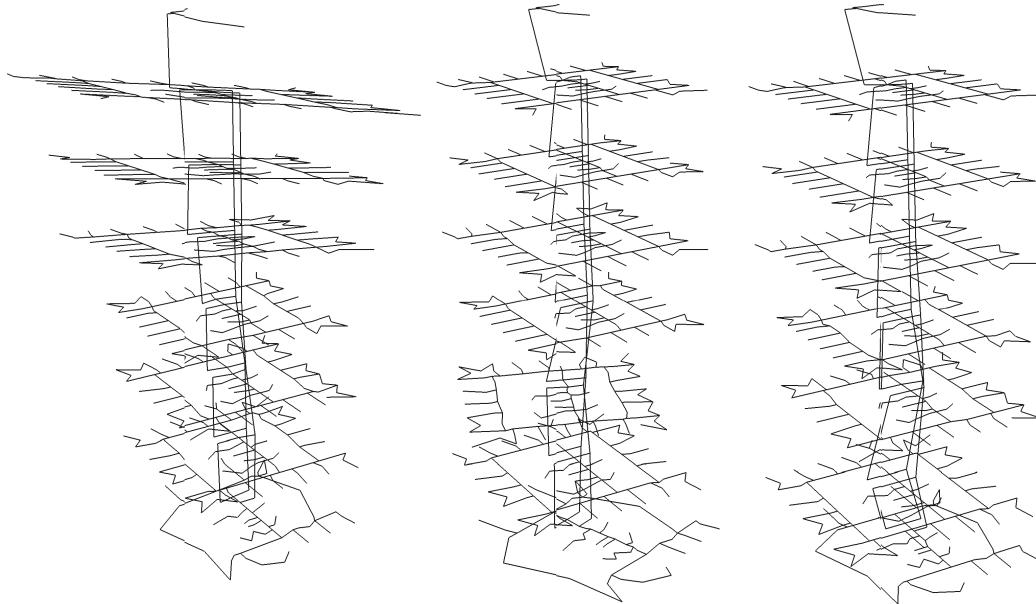


Abbildung 2.3: Die dreidimensionale Darstellung visualisiert die Transformation jeder Etage eines Gebäudes in ein globales gemeinsames Koordinatensystem (rechts). Durch systematische Versatzstücke bei der automatischen Generierung zusätzlicher Referenzpunkte anhand von Treppenhäusern kann es jedoch zu Verzerrungen kommen (links). Eine Transformation ohne Scherung führt zu Verbesserungen, dennoch kommt es bei der Rotation der oberen Etagen zu deutlich sichtbaren Fehlern (Mitte).

satzstücke der ungleich platzierten Treppenhäuser zu einer falschen Drehung der oberen Etagen. Erst durch zusätzliche, manuell eingetragene Referenzpunkte ist es im dargestellten Beispiel möglich, das Gebäude so zu transformieren, dass alle Etagen auf einer Karte des Universitätscampus richtig dargestellt werden. Für die Modellierung der Umgebung wird deshalb der Ansatz ohne Scherung verwendet, dennoch sind im praktischen Einsatz Referenzpunkte fast in allen Etagen manuell eingetragen worden, um Fehler möglichst gering zu halten. Eine zusätzliche Angabe der Skalierung oder Rotation, die in Stahl und Haupert (2006) beschrieben wird, ist durch diese Vorgehensweise nicht mehr notwendig, da sich sowohl die Rotation als auch die Länge von Pfaden durch Transformation in ein globales Koordinatensystem ermitteln lässt.

Die berechneten Transformationsmatrizen \mathbf{T} werden dann in den Level-Knoten hinterlegt, wie in Listing 2.5 auf der nächsten Seite gezeigt.

Listing 2.5: Beispielhafte Angabe von Transformationsvorschriften lokaler Koordinaten in die globalen Bezugssysteme „WGS 1984“, „WGS 1984 Pseudo-Mercator“ und „Gauß-Krüger“

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
2 <graph>
3   <level id="1" storey="0">
4     <pixelToWGS84>
5       <xlat>-1.8056195037645E-8</xlat>
6       <ylat>-6.0318555918114E-6</ylat>
7       <wlat>49.00471919729</wlat>
8       <xlon>9.1678117791774E-6</xlon>
9       <ylon>-1.9495763136392E-8</ylon>
10      <wlon>12.087381770025</wlon>
11    </pixelToWGS84>
12    <pixelToEPSG3857>
13      <xx>1.0205561388006</xx>
14      <yx>-0.0021702584240005</yx>
15      <wx>1345561.1834758</wx>
16      <xy>-0.0030645702790053</xy>
17      <yy>-1.0244172735314</yy>
18      <wy>6275662.7828715</wy>
19    </pixelToEPSG3857>
20    <pixelToGK>
21      <xrw>0.67080240137064</xrw>
22      <yrw>-0.00056518602217075</yrw>
23      <wrw>4506499.8461692</wrw>
24      <xhw>-0.00056518602217071</xhw>
25      <yhw>-0.67080240137064</yhw>
26      <whw>5429712.9548577</whw>
27    </pixelToGK>
28  </level>
29 </graph>
```

2.5 Modellierungsapplikation

Zur einfachen Erstellung konformer Umgebungsmodelle, die den in Abschnitt 2.3 „Spezifikation des Umgebungsmodells“ festgelegten Spezifikationen entsprechen, wird eine Applikation mit grafischer Bedienoberfläche implementiert.

Die Modelle sollen dabei von einer Vielzahl unterschiedlicher Personen erstellt und bearbeitet werden. Wie in Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“ erwähnt, sind einige ortskundige BusfahrerInnen um Unterstützung gebeten worden, Haltestellen in der Pilotregion Nürnberg zu modellierten. Die Modelle der Universitätsgebäude sind in großen Teilen von unterschiedlichen studentischen Hilfskräften erstellt worden. Die Umgebungsmodelle werden deshalb zentral auf einem Server gespeichert. Durch eine webbasierte Modellierungsapplikation mit Nutzer-

2. Modellierung der Umgebung

verwaltung können so verschiedene Personen über den Browser an den Modellen arbeiten. Ein solcher webbasiertes Ansatz wird auch als Vorteil der in Stahl und Haupert (2006) beschriebenen Modellierungssoftware hervorgehoben.

Abbildung 2.4 zeigt die implementierte Applikation. Exemplarisch ist ein Modell eines Universitätsgebäudes geladen, das visualisiert wird. Der angezeigte Ausschnitt des Umgebungsmodells lässt sich in dieser Ansicht verschieben und die Skalierung des dargestellten Bereiches variieren. Neue *Nodes*, *Edges* und *Leveledges* lassen sich dem Modell durch Klicks auf die entsprechenden Stellen in der Visualisierung hinzufügen. Dabei wird die angezeigte Grafik anhand einer XML-Datei erstellt, die, wie in Unterabschnitt 2.4.1 „XML-Format“ beschrieben, aufgebaut ist. Bei jeder Modifikation wird diese Datei entsprechend angepasst und die grafische Darstellung neu erzeugt.

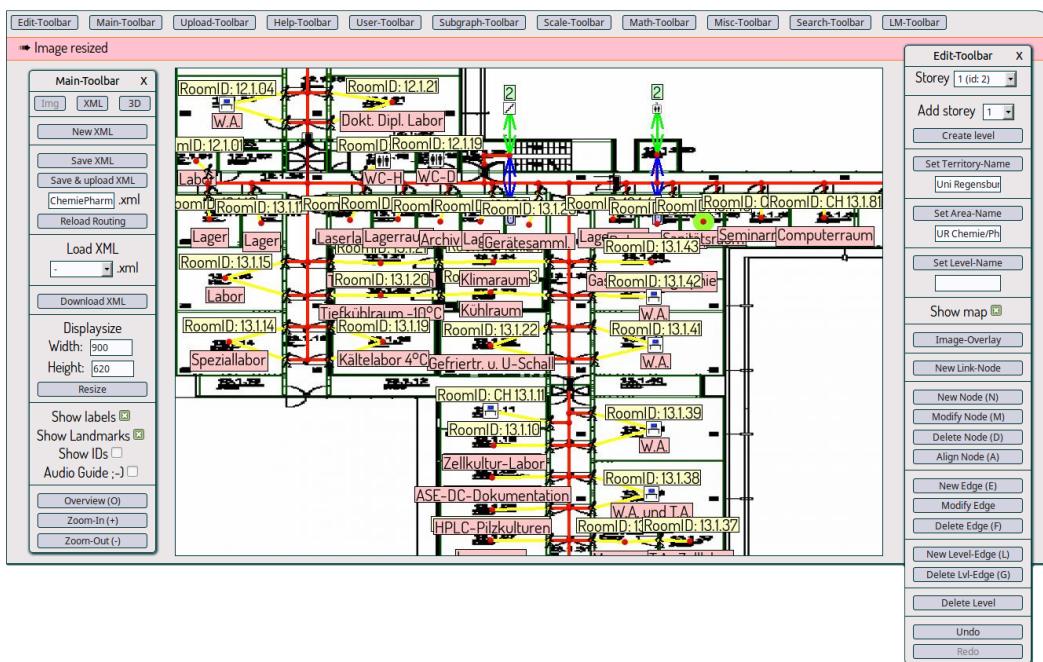


Abbildung 2.4: Die webbasierte Applikation zur Modellierung der Umgebung soll die Erstellung spezifikationskonformer Modelle erleichtern.

Bei Bedarf lassen sich die XML-Dateien auch direkt editieren. Wie in Abbildung 2.5 (links) veranschaulicht, lässt sich die Ansicht hierfür umschalten. Zusätzlich lässt sich in die dreidimensionale Darstellung wechseln (Abbildung 2.5 (rechts)), die sich, wie in Unterabschnitt 2.4.5 „Transformation lokaler Koordinaten in ein globales Referenzsystem“ beschrieben, mitunter eignet, Fehler bei der berechneten Koordinatentransformation zu erkennen.

Neben der Erstellung neuer Elemente der in Unterabschnitt 2.4.2 „Hierarchische Aufteilung“ beschriebenen Hierarchieebenen liefert die Applikation zahlreiche Funktionen, um alle *Knoten* und *Attribute* des in Unterabschnitt 2.4.3 „Graphba-

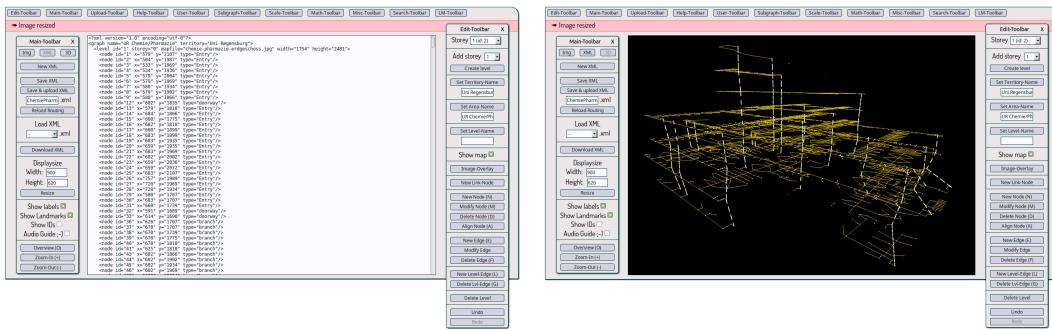


Abbildung 2.5: Jede Änderung anhand der visualisierten Darstellung wirkt sich unmittelbar auf die zugrunde liegende XML-Datei aus, die sich auch direkt editieren lässt (links). Weiterhin lässt sich zur dreidimensionalen Darstellung umschalten, die sich zur Kontrolle der Koordinatentransformation eignet (rechts).

siertes Modell“ spezifizierten Graphen zu erzeugen und zu modifizieren. Hierfür lassen sich einzubettende Grafiken und Fotografien, die *Nodes* zugeordnet sind, verwalten. *Edges* lassen sich für eine einheitliche Darstellung automatisiert parallel zueinander ausrichten und auch das in Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“ beschriebene semantische Modell lässt sich um neue Kategorien erweitern. Die in Unterabschnitt 2.4.5 „Transformation lokaler Koordinaten in ein globales Referenzsystem“ erläuterte Transformationsmatrix kann, nachdem ausreichend viele *Nodes* als Referenzpunkte erstellt worden sind, automatisiert berechnet und in der XML-Datei hinterlegt werden. Anhand dieser lassen sich weiterhin verschiedene Hilfsfunktionen bereitstellen. So können die Geokoordinaten ausgewählter *Nodes* in unterschiedlichen Referenzsystemen ausgegeben werden, was beispielsweise bei Veranstaltungen genutzt wird, um relevante Ziele in Übersichtskarten einzutragen. Als sinnvoll hat sich auch eine Funktion erwiesen, mit der die Position eines *Node* im lokalen Koordinatensystem so gesetzt werden kann, dass dessen globale Position einem anderen *Node* in einem abweichenden lokalen Koordinatensystem entspricht. Bei der Erstellung von *Nodes* zur Verknüpfung verschiedener XML-Dateien lassen sich Versatzstellen so verhindern (siehe Abbildung 2.6).

Um sicherzustellen, dass alle in den Umgebungsmodellen modellierten Bereiche auch durch Wege verbunden und somit erreichbar sind, wird eine, wie in Unterabschnitt 2.3.2 „Graphbasiertes Modell“ beschriebene, Funktion implementiert, die überprüft, ob der Graph zusammenhängend ist und gegebenenfalls Stellen, die nicht erreicht werden können, farblich hervorhebt.

Eine weitere Funktion der entwickelten Applikation ergibt sich aus dem in dieser Arbeit angestrebten Ziel, Pfade zu ermitteln, die dem natürlichen Verlauf von Pfaden entsprechen, der von Personen präferiert wird. Hierfür wird zunächst ein Referenzstandard erhoben. Dieser stellt eine Sammlung an Pfaden dar, denen die Eigenschaften präferierter Routen inhärent sind, da sie von ortskundigen ProbandIn-

2. Modellierung der Umgebung

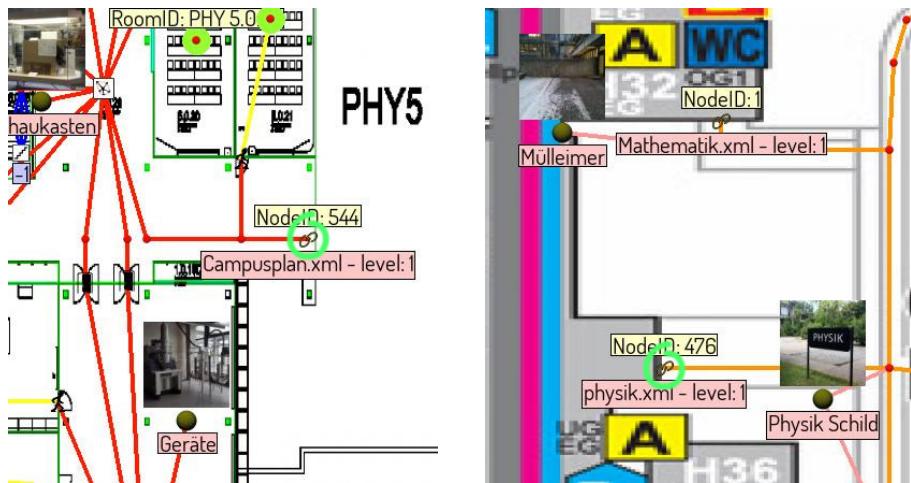


Abbildung 2.6: Im Physikgebäude (links) und am Campusplan (rechts) existiert jeweils ein Node der Kategorie „Verknüpfungspunkt“ (grün markiert), der die Elemente der zweiten Hierarchieebene verbindet. Um sicherzustellen, dass diese Nodes die gleiche Position im globalen Koordinatensystem aufweisen, können die Positionen automatisiert abgeglichen werden.

nen favorisiert werden. Eine genauere Beschreibung des Vorgehens zur Erzeugung desselben findet sich in Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“. Diese Sammlung optimaler Pfade kann dann genutzt werden, um die Eignung eines Algorithmus, Pfade zu berechnen, die ähnlich zu durch NutzerInnen präferierte Pfade sind, messbar zu machen. Erst anhand einer solchen quantifizierten Güte eines Systems kann das eigentliche Ziel, das Ähnlichkeitsmaß zu maximieren, verfolgt werden. Um

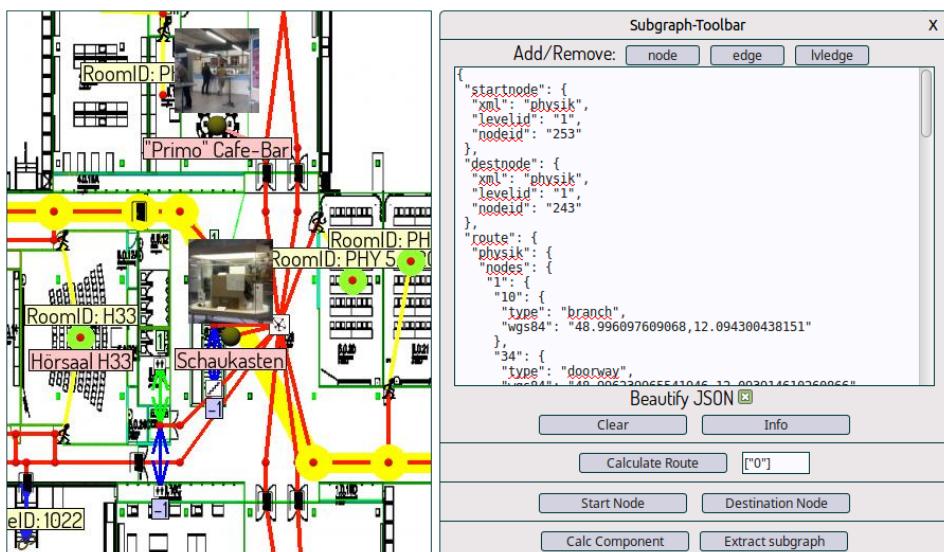


Abbildung 2.7: Zur Auswahl und Speicherung von Pfaden bietet die Applikation zahlreiche Funktionen.

die automatisierte Verarbeitung der Pfade des Referenzstandards zu ermöglichen, müssen diese digital, in einheitlicher Form vorliegen. Mithilfe der Modellierungsapplikation können deshalb alle *Nodes*, *Edges* und *Leveledges* entlang eines frei wählbaren Pfades markiert und anschließend gespeichert werden. Hierfür werden Funktionen zur manuellen Markierung einzelner Entitäten bereitgestellt. Weiterhin kann ein Pfad aus mehreren kleineren Abschnitten zusammengesetzt werden, für deren Markierung jeweils eine Suche nach dem kürzesten Pfad genutzt werden kann. Die ausgewählten Elemente entlang des Pfades sowie der Start- und Zielpunkt der Route werden dann im JSON-Format gespeichert, welches sich in unterschiedlichen Programmiersprachen leicht verarbeiten lässt. Da die genaue gewählte Syntax willkürlich festgelegt und somit austauschbar ist, soll diese hier nicht weiter erläutert werden. Abbildung 2.7 zeigt die in der Applikation zur Erhebung von Pfaden bereitgestellten Methoden, einen Ausschnitt der im JSON-Format vorliegenden Sammlung markierter Pfadelemente sowie den in der grafischen Darstellung hervorgehobenen ausgewählten Pfad.

3. Präferenzbasierte Pfadplanung

In diesem Kapitel wird die Bedeutung des Begriffs der präferenzbasierten Pfadplanung erörtert und im Rahmen dieser Arbeit definiert und diskutiert. Dabei sei, um den Umfang dieser Arbeit zu beschränken, festgelegt, dass die Pfadplanung die grundsätzliche Intention der NutzerInnen erfüllen soll, ein einzelnes definier tes Ziel zu erreichen. Es sollen insbesondere keine Wege generiert werden, deren Ziel in der Beschreibung derselben zur Erlangung von Zerstreuung liegt. In Abschnitt 3.2 „Nutzerstudien“ wird deshalb zusätzlich darauf eingegangen, inwieweit diese Beschränkung zu einer sinnvollen Verbesserung berechneter Routen führen kann. Weiterhin sind Notfallsituationen, wie Feuerwehreinsätze oder Evakuierungen, kein Gegenstand dieser Forschungsarbeit. Es ist anzunehmen, dass hierfür gänzlich abweichende Vorgehensweisen sinnvoll wären. Auch auf die Berechnung von Rundwegen mit mehreren möglichen Zielorten, die beispielsweise die Präferenz erfüllen könnten, einen Zwischenstopp bei einer Toilette einzulegen, wird im weiteren Verlauf nicht eingegangen – wobei der aufgezeigte Ansatz sicherlich erweitert werden könnte.

Im folgenden Abschnitt wird nun zunächst das wissenschaftliche Umfeld betrachtet, das eine Grundlage des weiteren Vorgehens bildet. In Abschnitt 3.2 „Nutzerstudien“ werden dann die Ergebnisse der genannten Online-Befragung vorgestellt, anhand derer vorab ermittelt wird, ob positive Gewichtungen der durch das Um gebungsmodell bereitgestellten Merkmale grundsätzlich geeignet sind, Routen an Nutzerpräferenzen anzupassen.

Darauf folgend wird in Abschnitt 3.3 „Pfadplanung“ das technische Vorgehen zur Berechnung von Pfaden anhand des spezifizierten Umgebungsmodells erläutert. In Abschnitt 3.4 „Limitationen der präferenzbasierten Pfadplanung“ wird die Bedeutung dieses Ansatzes dann abschließend diskutiert, wobei auch Limitationen und mögliche Erweiterungen aufgezeigt werden.

3.1 Forschungsstand

Grundsätzlich lässt sich der Verlauf von Routen optimieren, indem die Weglänge oder die Zeit, die notwendig ist, eine Strecke zurückzulegen, minimiert wird. Diese simplen Strategien resultieren in Pfaden, die im Folgenden als kürzeste (minimale

Streckenlänge) bzw. als schnellste (minimaler Zeitbedarf) Routen bezeichnet werden. Anhand der in diesem Abschnitt vorgestellten Forschungsarbeiten wird jedoch aufgezeigt, dass eine solche Pfadplanung weder von realen Personen verfolgt wird, noch die Bedürfnisse von NutzerInnen eines Navigationssystems in optimaler Weise erfüllt.

Hierfür werden in Unterabschnitt 3.1.1 „Alternativen zu kürzesten und schnellsten Routen“ zunächst Arbeiten vorgestellt, die das Verhalten von Personen analysieren und aufzeigen, dass zur Simulation von Verkehrsströmen viele verschiedene Kriterien betrachtet werden sollten. In Unterabschnitt 3.1.2 „Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen bei der Navigation“ wird anhand weiterer Arbeiten erörtert, inwieweit sich diese Erkenntnisse auf die Routenplanung zur Nutzung in Navigationssystemen übertragen lassen. Auf eine Übersicht über Nutzerpräferenzen im Hinblick auf Fahrzeugrouten, die schon länger Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten sind als Fußwegrouten, wird dann in Unterabschnitt 3.1.3 „Fahrzeugnavigation“ eingegangen. Darauf folgend werden Arbeiten zu präferenzadaptiven Fußgänger routen in Unterabschnitt 3.1.4 „Fußgängernavigation“ vorgestellt. In Unterabschnitt 3.1.5 „Datengetriebene Ansätze“ wird die Möglichkeit, verschiedene Routeneigenschaften datengetrieben zu optimieren, aufgezeigt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend in Unterabschnitt 3.1.6 „Fazit“ resumiert.

3.1.1 Alternativen zu kürzesten und schnellsten Routen

Algorithmen, die favorisierte Routen von VerkehrsteilnehmerInnen ermitteln bzw. vorhersagen können, spielen neben der Anwendung in Navigationssystemen eine wichtige Rolle beim Entwurf von Verkehrsmodellen in der Verkehrsplanung. So schreiben Zhu und Levinson (2015), dass Überlegungen zu Infrastrukturmaßnahmen oder zu Anpassungen von Verkehrsrichtlinien auf einer Simulation von Verkehrsströmen und dadurch auf einer korrekten Vorhersage von Nutzerentscheidungen basieren würden. In diesem Forschungsfeld existieren zahlreiche Publikationen, die aufzeigen, dass eine Minimierung der Strecke oder der Zeitkosten die Entscheidungskriterien von VerkehrsteilnehmerInnen nicht optimal widerspiegelt:

Jan, Horowitz und Peng (2000) zeigen anhand einer Analyse von Logdaten, die durch 100 mit GPS-Sensoren ausgestatteten Fahrzeugen erzeugt worden sind und über 3000 Fahrten umfassen, dass die von FahrerInnen gewählten Routen (räumlich) meist erheblich von den berechneten schnellsten Pfaden abweichen. Sie betonen die Notwendigkeit einer Folgestudie, um die Gründe dieser Abweichungen genauer zu erkunden.

Zhu und Levinson (2015) greifen diese Studie auf und analysieren 25157 aufgezeichnete Routen, die anhand von 143 mit GPS-Sensoren ausgestatteten Fahrzeugen gesammelt worden sind. Die Daten lassen erkennen, dass kürzeste Routen nur gewählt werden, wenn diese mit der schnellsten Route übereinstimmen. Jedoch handelt

es sich nur bei 34 % der gesammelten Daten um die schnellsten Routen. Die Autoren argumentieren, dass es eine Vielzahl unterschiedlicher Präferenzen zu berücksichtigen gelte, um die gesammelten Routen nachzubilden zu können.

Eine Analyse von 237 aufgezeichneten Routen, die vom Heimatort der ProbandInnen zu deren Arbeitsstätte verlaufen, wird von Papinski und Scott (2011) vorgestellt. Die Autoren geben an, dass die Routen signifikant länger (räumlich als auch zeitlich) als die kürzesten und auch als die schnellsten Routen seien. Dabei würden unter anderem signifikante Unterschiede in der mittleren und maximalen Geschwindigkeit, im Nutzungsanteil verschiedener Straßentypen („highway“, „expressway“ etc.) und in der Anzahl von Abbiegungen auftreten. Die Autoren schließen aus den Erkenntnissen, dass Systeme, die auf kürzesten oder schnellsten Routen basieren, nicht geeignet seien, um Nutzerentscheidungen in realistischen Situationen wiederzugeben.

R. G. Golledge (1995) zeigt Laborstudien auf, in denen 32 ProbandInnen präferierte Routen auf abstrakten Karten ausgewählt haben. Anschließend haben die TeilnehmerInnen vorgegebene Entscheidungsgründe, wie beispielsweise „kürzeste Distanz“, „geringste Zeitkosten“, „am wenigsten Abbiegungen“ oder „szenisch reizvoll“, auf einer 7-stufigen Likert-Skala bewerten sollen. Dabei ist jeweils anzugeben gewesen, wie ausschlaggebend jedes Kriterium im Allgemeinen und weiterhin für die Routenwahl in der zuvor gestellten Aufgabe ist. Golledge stellt fest, dass ProbandInnen die vermeintlich als beliebt eingeschätzten Kriterien „geringste Zeitkosten“ und „szenisch reizvoll“ gering, mit den durchschnittlichen Werten 2,6 und 1,9, bewerten würden. Höhere Bewertungen dagegen die Einflussfaktoren „kürzeste Distanz“ (4,4), „zuerst wahrgenommen“ (4,3), „minimale Zahl an Abbiegungen“ (3,5) und „kürzester Abschnitt zuerst“ (engl. „shortest leg first“) (3,4) erhalten. Im Fazit schreibt der Autor, dass die von Personen herangezogenen Entscheidungsstrategien von den meisten Computermodellen nicht korrekt berücksichtigt würden. Er spricht sich deshalb für eine weitere Untersuchung von Kriterien aus, die den Verlauf gewählter Routen beeinflussen würden.

Die Nutzerbestrebung, einfache Routen zu wählen, beispielsweise durch eine Minimierung von Abbiegungen, ist im Speziellen Gegenstand verschiedener Studien. So zeigen Sadalla und Staplin (1980) auf, dass die Anzahl von Abbiegungen in einer Route signifikant mit deren wahrgenommener Länge zusammenhängt. Dalton (2003) kommt zu dem Ergebnis, dass NutzerInnen bei der Wahl eines bestimmten Pfades versuchen, den Winkel zu Ihrem Ziel zu minimieren. Als eine mögliche Begründung führt er auf, dass dadurch auch die Komplexität der Route gering gehalten werde. Turner (2009) untersucht das Verhalten von Motorradkurierern und stellt fest, dass diese vorrangig den eingeschlagenen Winkel zum Zielpunkt anstatt der Manhattan-Distanz minimieren würden. Turner spricht sich im Fazit für die Untersuchung weiterer Einflusskriterien, wie beispielsweise Landmarken, aus.

3.1.2 Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen bei der Navigation

Bei der Entscheidung für eine bestimmte Route wählen NutzerInnen nicht zwangsläufig die für ihre Bedürfnisse am besten geeignete Route. So greifen R. Golledge und Gärling (2002) die in R. G. Golledge (1995) genannten Kriterien, die im letzten Abschnitt beschrieben worden sind, auf, schreiben jedoch, dass die getroffenen Nutzerentscheidungen, die zur Wahl einer bestimmten Route führen, häufig nicht auf rationaler Optimierung basieren würden.

Auch die von Sadalla und Staplin (1980) genannte Schwierigkeit, die Länge von Routen abschätzen zu können, könnte Entscheidungen begünstigen, die den rationalen Intentionen der NutzerInnen möglicherweise entgegen stehen.

Die genannten Arbeiten von R. Golledge und Gärling (2002) und Sadalla und Staplin (1980) deuten darauf hin, dass sich Algorithmen zur Vorhersage von Routen, die sich beispielsweise zur Schätzung von Verkehrsfluss oder Verkehrsdichte einsetzen lassen, im Allgemeinen von Algorithmen, die sich zur Nutzung in Navigationssystemen eignen, unterscheiden. Es kann grundsätzlich weder ein Zusammenhang der für die Routenwahl relevanten Kriterien, noch eine Ähnlichkeit der ermittelten Routenverläufe unterstellt werden.

Auch im Kontext der Fußgängernavigation muss beachtet werden, dass es für Menschen nicht trivial ist, verschiedene Pfadverläufe gegeneinander abzuwählen. So zeigen Hölscher, Tenbrink und Wiener (2011) in einer empirischen Studie mit zwölf TeilnehmerInnen, die angewiesen worden sind, die kürzeste Fußweg-Route zu planen, dass es deutliche Abweichungen von den beschriebenen zu den rechnerisch tatsächlich kürzesten Routen in Außenbereichen gebe. So komme es bei den Routen, die von den mit der Umgebung vertrauten TeilnehmerInnen ohne weitere Hilfsmittel beschrieben worden sind, zu 31 % längeren Pfaden. Bei einem darauffolgenden Versuch, die kürzeste Route vor Ort zu ermitteln, indem diese von denselben Teilnehmern vom Start- zum Zielpunkt abgegangen wird, komme es noch zu Abweichungen von 13 %, in allen Fällen würden dabei die zuvor beschriebenen Routen korrigiert. Dass sich je nach Planungsstrategie deutliche Unterschiede in den gewählten Routen ergeben, wird in einem zweiten Experiment mit 24 TeilnehmerInnen bestätigt. In diesem ermitteln die Autoren, welche Routen die FußgängerInnen bei der prospektiven Planung für sich selbst als auch für andere Personen auswählen und welche sie im Gegensatz dazu jeweils vor Ort ablaufen. Abweichend seien sie dabei nicht angewiesen worden, die kürzeste Route zu bestimmen. Auch hierfür sei es den ProbandInnen nicht erlaubt gewesen, Karten zu betrachten oder andere Personen um Unterstützung zu bitten. Die ProbandInnen seien abschließend befragt worden, ob sie in den jeweiligen Aufgaben Fehler gemacht hätten. Als Ergebnis zeige sich, dass die TeilnehmerInnen die Planung vor Ort signifikant besser einschätzen würden. Interessant für den Kontext präferenzadaptiver Navigation ist weiterhin die von den Autoren aufgezeigte Bandbreite unterschiedlicher Entscheidungskriterien. Hierfür seien die

ProbandInnen gefragt worden, warum sie eine bestimmte Route gewählt hätten und welche Kriterien besonders wichtig dabei gewesen seien. Während beim Abgehen der Route und bei der Planung für sich selbst das Kriterium „kürzeste Route“ vorne liege, seien die Merkmale „einfach“, „wenig Abbiegungen“ und „Landmarken“ bei der Planung für andere Personen entscheidend. Auch aufgrund der Erkenntnisse von Hölscher et al. (2011) muss also hinterfragt werden, inwieweit aus einer Analyse von Routen, die von NutzerInnen eingeschlagen werden, Selektionskriterien für den Pfadplanungsalgorithmus eines Navigationssystems abgeleitet werden können. Einerseits müssen die beschriebenen Planungsschwierigkeiten bei der Erstellung eines Referenzstandards beachtet werden. So ist bei der in Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“ beschriebenen Erhebung präferierter Routen explizit darauf geachtet worden, dass ProbandInnen die Wege vor Ort abgehen und verschiedene Alternativen in Betracht ziehen können. Andererseits zeigt sich aufgrund der unterschiedlichen Planungskriterien bei Routen für sich selbst im Gegensatz zu denen für andere Personen, dass die Lieblingsrouten von mit der Umgebung vertrauten Personen möglicherweise nicht ideal geeignet sind, um von einem Navigationssystem präsentiert zu werden. Jedoch ist es in der Praxis schwierig, einen Referenzstandard zu erheben, der die Anforderungen umgebungsfremder Personen auf ideale Weise erfüllt. Auch für ortskundige Personen ist es vermutlich nicht trivial, sich in die Situation potentieller NutzerInnen eines Navigationssystems einzudenken.

Trotz der geschilderten Problematik kann es deshalb sinnvoll sein, favorisierte Routen als Grundlage einer Erstellung von Pfaden für umgebungsforeign Personen heranzuziehen. So argumentieren beispielsweise Armeni und Chorianopoulos (2013) für den Einsatz digitaler Karten, die anhand aufgezeichneter Nutzerdaten dynamisch angepasst werden, beispielsweise durch eine optische Hervorhebung beliebter Straßen. Dazu führen sie ebenfalls eine empirische Studie mit sieben gut mit der Umgebung vertrauten TeilnehmerInnen durch, die gebeten worden sind, eine möglichst schnelle Route durch die Stadt Korfu zu finden. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die Routen der ProbandInnen zwar länger als die rechnerisch kürzesten Route seien, dass die TeilnehmerInnen auf Ihren Routen aber dennoch schneller zum Ziel kämen, da es weniger beispielsweise durch Autos verursachte Hindernisse gebe.

Die vorgestellte Literatur zeigt also einerseits auf, dass es für Personen schwierig ist, verschiedene Routeneigenschaften gegeneinander abzuwagen (R. Golledge & Gärling, 2002; Sadalla & Staplin, 1980), im Speziellen, wenn sie nicht vor Ort sind (Hölscher et al., 2011). Es wird deshalb auf Heuristiken, wie beispielsweise eine Minimierung des Winkels zum Ziel, zurückgegriffen (Dalton, 2003; Turner, 2009). Andererseits beachten Personen bei der Planung einzuschlagender Pfade aber intuitiv Kriterien, die bei der rechnerischen Planung kürzester und vermeintlich schnellster Pfade ignoriert werden (Armeni & Chorianopoulos, 2013; R. Golledge & Gärling,

2002; R. G. Golledge, 1995; Jan et al., 2000; Papinski & Scott, 2011; Zhu & Levinson, 2015). Es ist somit möglich, dass durch eine Berücksichtigung zusätzlicher Pfadeigenschaften Routen generiert werden können, die Nutzerbedürfnisse bei der Navigation noch besser erfüllen. Diese Erkenntnis zeigt sich nicht nur durch Analyse gesammelter Fahzeug- und Fußgänger routen. Die folgenden beiden Unterabschnitte sollen aufzeigen, dass im Kontext der Navigation ebenfalls zahlreiche Arbeiten existieren, die zu einer Verbesserung von Suchalgorithmen beitragen, indem Konzepte entwickelt werden, Routen an allgemeine Nutzerbedürfnisse oder auch an spezielle Anforderungen bestimmter Personengruppen anzupassen.

3.1.3 Fahrzeugnavigation

Ein für die Fahrzeugnavigation einflussgebendes Kriterium, das in zahlreichen Arbeiten Berücksichtigung findet, ist die Komplexität von Routen. Die Nutzerpräferenz, möglichst einfache Routen vorgeschlagen zu bekommen, lässt sich intuitiv zunächst leicht nachvollziehen. Um Komplexität jedoch minimieren zu können, muss diese zunächst operationalisiert werden – es bedarf einer genauen formalen Definition derselben. Es existieren verschiedene Ansätze, die zu dieser Bemessung und Reduzierung unterschiedliche, teils aneinander anknüpfende Konzepte verfolgen.

So bemängeln Duckham und Kulik (2003), dass die meisten Navigationssysteme ausschließlich auf einer Berechnung kürzester Pfade basieren würden, und stellen als Alternative einen Algorithmus zur Ermittlung möglichst „einfacher“ Routen vor, der in zahlreichen anknüpfenden Arbeiten anhand der gewählten Bezeichnung „simplest path algorithm“ referenziert wird. Zunächst veranschaulichen Duckham und Kulik anhand einiger Quellen die Tragweite der Bestrebung, den Begriff „einfach“ zu formalisieren bzw. die Komplexität von Routenanweisungen zu operationalisieren. So befasse sich beispielsweise Worboys (2003) allgemein mit der Messung des Informationsgehalts kommunizierter geographischer Angaben. Es sei möglich, ein Verfahren abzuleiten, das speziell den Informationsgehalt von Routenanweisungen quantifizierte. Diesen zu minimieren, könnte dann zu Routen führen, die sich durch wenige, einfache Anweisungen beschreiben ließen. Duckham und Kulik (2003) entscheiden sich jedoch gegen einen Ansatz zur Bemessung der Komplexität, in dem die notwendigen Routenanweisungen als Kriterium in Betracht gezogen werden. Aufbauend auf Mark (1985, 1986), der weiterhin an Streeter und Vitello (1986); Streeter, Vitello und Wonsiewicz (1985) anknüpft, würden stattdessen Paare von aufeinanderfolgenden *Edges* in Komplexitätsklassen eingeteilt, die dann verschieden gewichtet würden. Durch dieses Verfahren werde nicht die Komplexität freistehender *Nodes* oder *Edges*, sondern die routenabhängige Komplexität an Entscheidungspunkten bewertet. Eine simple Abbiegung werde beispielsweise mit „vier“ gewichtet, während eine Abbiegung an einer T-Kreuzung mit „sechs“ als komplizierter eingestuft werde. Durch eine Suche mit dem Dijkstra-Algorithmus würden dann kürzeste Pfade im Sinne der defi-

nierten Heuristik ermittelt. Die Autoren argumentieren, dass eine berechnete Route eine plausible Alternative zur kürzesten Route darstelle, da diese durchschnittlich nur 16 % länger sei und auch im Fall größerer Abweichungen nachvollziehbar erscheine. In diesem Ansatz werden somit verschiedene *Gewichtungsfaktoren* festgelegt, die zu einer besseren Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen führen. Allerdings ist diese Quantifizierung möglicherweise nicht optimal gewählt, so ist es beispielsweise fraglich, ob „sechs zu vier“ das Verhältnis der bei NutzerInnen verursachten Schwierigkeiten beim Navigieren entlang T-Kreuzungen zu einfachen Abbiegungen wiedergibt. Eine Optimierung dieser Werte durch einen datengetriebenen Ansatz könnte somit zu einer Verbesserung dieses Algorithmus beitragen.

Ein an Duckham und Kulik (2003) anknüpfender Ansatz findet sich in Richter und Duckham (2008). Anstatt den direkten Verlauf von Routen zu betrachten, werde der einfachste Pfad berechnet, indem die Komplexität der zur Routenbeschreibung notwendigen Anweisungen minimiert werde. Grundlage der Generierung von Anweisungen sowie die Operationalisierung deren Komplexität würden dabei die Publikationen Richter (2007); Richter und Klippel (2005) bilden. Die durch eine Dijkstra-Suche ermittelten Routen seien durchschnittlich ca. 13 % länger als die kürzesten Routen. Die Zahl notwendiger Anweisungen werde im Vergleich zur kürzesten Route und auch im Vergleich zu dem in Duckham und Kulik (2003) beschriebenen Algorithmus um mehr als die Hälfte reduziert.

Auch Haque, Kulik und Klippel (2007) greifen Duckham und Kulik (2003) auf, betrachten als Kriterium allerdings nicht die Komplexität, sondern die Ambiguität potentieller Routenanweisungen. Sie schreiben, dass eine Anweisung wie „Biegen Sie rechts ab!“ nicht immer eindeutig beschreibe, welcher Pfad gewählt werden müsse, da gegebenenfalls mehrere Abzweigungen nach rechts existieren würden. Als Folge stellen die Autoren einen Algorithmus vor, um Routen zu berechnen, die sich möglichst nachvollziehbar beschreiben lassen.

Krisp, Keler und Karrais (2014) konstatieren, dass aktuelle Fahrzeugnavigationssysteme in der Regel die schnellsten oder kürzesten Routen berechnen würden. Sie sprechen sich dafür aus, andere Kriterien in Betracht zu ziehen, um Routen besser an individuelle NutzerInnen und Nutzergruppen anzupassen. Krisp und Keler (2015) entwickeln ein solches Verfahren zur Berechnung von Routen, in denen schwierige Kreuzungen vermieden würden, welche insbesondere Fahranfängern Probleme bereiten. Mittels eines Kerndichteschätzers werde hierfür zunächst die Dichteverteilung von *Nodes* in „OpenStreetMap“-Umgebungsmodellen ermittelt. In Bereichen mit kreuzenden Straßenbahngleisen oder Fahrradwegen gebe es beispielsweise eine erhöhte Anzahl nah zusammenliegender *Nodes* und somit eine höhere Dichte. Durch eine Routensuche mit dem Dijkstra-Algorithmus würden dann Pfade ermittelt werden, die keine Kreuzungen mit hoher Dichte enthielten. Die Autoren gehen dabei auch auf die allgemeinere Möglichkeit ein, Kreuzungen, je nach Dich-

te, mit höheren *Gewichtungsfaktoren* zu versehen. Analog zu der von Duckham und Kulik (2003) vorgenommenen Gewichtung unterschiedlicher Kreuzungsarten kann dadurch abhängig von der Komplexität einer Kreuzung ein höherer Umweg in Kauf genommen werden, um diese zu umfahren. Dieser allgemeine Ansatz, den Routenverlauf durch gewichtete Pfadelemente zu steuern, ist in der vorliegenden Arbeit bereits in Unterabschnitt 2.2.5 „Graphbasiertes Modell“ vorgestellt worden. Er wird in mehreren der im folgenden vorgestellten Arbeiten verwendet und ist Grundlage des in Abschnitt 3.3 „Pfadplanung“ beschriebenen Vorgehens. Das entwickelte Verfahren zur datengetriebenen Festlegung solcher *Gewichtungsfaktoren* wird daran anschließend in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ beschrieben. Krisp und Keler weisen am Ende Ihrer Publikation auf die Möglichkeit hin, dass sich der Routenverlauf durch personalisierte *Gewichtungsfaktoren* besser an individuelle Bedürfnisse anpassen lasse. Als Motivation einer solchen Anpassung führen die Autoren die Tatsache auf, dass ängstliche FahrerInnen möglicherweise ungern in Seitenstraßen ausweichen. Andererseits könnte die kürzeste Route von anderen NutzerInnen durchaus präferiert werden. Auch der in der vorliegenden Arbeit verfolgte Ansatz eignet sich dazu, Routen an bestimmte Nutzergruppen anzupassen. Diese Möglichkeit wird in Unterabschnitt 3.4.1 „Berücksichtigung individueller Präferenzen“ diskutiert. Krisp et al. (2014) gehen dann weiterhin auf den Aspekt ein, dass zusätzliche Merkmale, wie beispielsweise kreuzende Straßenbahnschienen oder Fahrradwege, genutzt werden könnten, um berechnete Routen an Präferenzen anzupassen. Diese Wahl einflussnehmender Routenmerkmale ist eine grundsätzliche Schwierigkeit, die in zahlreichen Arbeiten behandelt wird.

Jiang und Liu (2011) beschreiben ein weiteres Verfahren zur Routenberechnung, das die Minimierung von Abbiegungen zum Ziel hat. Da eine natürliche Straße nicht zwingend geradlinig sei, argumentieren die Autoren, dass der lokale geometrische Verlauf nicht als Kriterium zur Klassifikation von Abbiegungen ausreiche. Ein Straßenabschnitt dürfe somit nicht alleine aufgrund seiner Krümmung als Abbiegung deklariert werden. Vorab würden deshalb beispielsweise Straßennamen als semantisches Merkmal zur Erkennung von sogenannten „natürlichen Straßen“ herangezogen. Darauf aufbauend werde eine Abbiegung dann als Übergang von einer „natürlichen Straße“ zu einer anderen festgelegt.

Einfachere Routen für FahrerInnen zu berechnen, ist ebenfalls das Ziel von Patel, Chen, Smith und Landay (2006). Neben möglichst kompakten Beschreibungen des Routenverlaufs wählen sie hierfür bevorzugt Pfade aus, die Etappen und Landmarken enthalten, die den NutzerInnen bereits bekannt sind. Hierfür wird die Kostenfunktion

$$C(r) = \alpha_d(d_u + \beta_d * d_f) + \alpha_t(t_u + \beta_t * t_f) + \alpha_s(s_u + \beta_s * s_f)$$

definiert, die einen Kompromiss aus Distanz d , Zeitkosten t und Etappenzahl s abbildet, welche wiederum in bekannte Bereiche (d_f, t_f, s_f) und unbekannte ($d_u,$

t_u, s_u) unterteilt sind. Die *Gewichtungen* $\alpha_d, \alpha_t, \alpha_s$ legen dabei das Verhältnis der Einflusskriterien zueinander fest, die *Gewichtungen* $\beta_d, \beta_t, \beta_s$ bestimmen, wie sehr der Bekanntheitsgrad in die Bewertung einfließt. Auch durch diese Forschungsarbeit verbleibt die konkrete Quantifizierung der *Faktoren* als offene Fragestellung. Im Ausblick gehen die Autoren deshalb darauf ein, dass deren Optimum von persönlichen, individuellen Nutzerpräferenzen abhänge und dass dieses durch maschinelle Lernverfahren ermittelt werden sollte. Auch durch diese Arbeit wird somit das in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ beschriebene Verfahren motiviert, *Gewichtungsfaktoren* bei der Pfadplanung anhand einer geeigneten Datengrundlage festzulegen. Eine Betrachtung individueller Nutzerpräferenzen, die die Autoren anstreben, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht durchgeführt. Anders als bei der Fußgängernavigation in Innenbereichen ist bei der Fahrzeugnavigation eine Lokalisierung der FahrerInnen durch GPS möglich, sodass Daten einzelner NutzerInnen einfacher gesammelt werden können. Wie bereits erwähnt, wird in Unterabschnitt 3.4.1 „Berücksichtigung individueller Präferenzen“ auf die mögliche Übertragbarkeit auf kleinere Nutzergruppen eingegangen.

Rogers, Langley, Johnson und Liu (1997) schlagen einen zu Patel et al. (2006) ähnlichen Ansatz vor, um Routen anhand maschineller Lernverfahren an persönliche Nutzerpräferenzen anzupassen. Durch eine Analyse aufgezeichneter GPS-Daten ermitteln sie, welche Straßen FahrerInnen jeweils geläufig seien. Sie schreiben, dass diese Straßen dann durch entsprechende Gewichtung der *Edges* in einem Pfadsuchalgorithmus präferiert werden könnten. Fahrzeugnavigation bietet im Gegensatz zur Fußgängernavigation in Innenbereichen den Vorteil, dass globale Positionierungsdaten fast immer verfügbar sind. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Datenakquise, durch die ein Modell zur Bewertung jeder einzelnen Straße iterativ verbessert werden kann, ohne dass einflussgebende Eigenschaften, wie beispielsweise die Kurvigheit oder der Belag der Straßen, bekannt sein müssen. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit muss hingegen viel Aufwand betrieben werden, um eine Sammlung an Routen zu erstellen, die als „Ground Truth“ für maschinelle Lernverfahren genutzt werden kann (siehe Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“). Schon aufgrund dieser begrenzten Daten ist es notwendig, die Eignung von Pfaden nicht auf Ebene einzelner Straßen bzw. Fußwege zu bemessen. Stattdessen soll die Eignung bestimmter Pfade in Abhängigkeit verschiedener Attribute bewertet werden, sodass sich die trainierten *Gewichtungsfaktoren* auf andere Orte übertragen lassen. Anstelle also, analog zu Rogers et al. (1997), die Erkenntnis zu gewinnen, dass beispielsweise ein spezieller Gang vom Foyer des Mathematik-Gebäudes zum Treppenhaus von NutzerInnen oder einem bestimmten Nutzer gemieden wird, ermöglicht das in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ vorgestellte Verfahren, zu bestimmen, inwieweit beispielsweise Aufzüge allgemein umgangen werden.

Ein weiterer Ansatz, der mit den Arbeiten von Patel et al. (2006); Rogers et al. (1997) vergleichbar ist, findet sich in Julia Letchner, John Krumm (2006). Anhand aufgezeichneter GPS-Daten werden an individuelle FahrerInnen angepasste Routen berechnet. Hierfür würden *Edges*, die von den FahrerInnen bevorzugt genutzt worden sind, bei der Routenberechnung niedriger gewichtet. Im Unterschied zu Patel et al. (2006) und Rogers et al. (1997) besteht die Idee deshalb nicht darin, die Route durch bekannte Abschnitte zu vereinfachen. Die zugrunde liegende Annahme ist vielmehr, dass Routen, die von NutzerInnen in der Vergangenheit gewählt worden sind, aufgrund bestimmter präferierter Merkmale bewusst gegenüber anderen Routen bevorzugt würden. Somit solle das Verfahren zu Routen führen, die von NutzerInnen bevorzugt werden, ohne dass dem System die hierfür Einfluss gebenden Kriterien bekannt sind. Julia Letchner, John Krumm (2006) schreiben, dass ansonsten explizit bestimmt werden müsse, welche Kriterien berücksichtigt werden sollten und welche quantitative Relevanz diese jeweils für einen bestimmten Nutzer hätten. Eine Einschränkung dieser Herangehensweisen ist jedoch erneut, dass zu jeder Umgebung auch genügend aufgezeichnete Routen vorliegen müssen. Individuelle Vorschläge können NutzerInnen in für sie unbekannten Umgebungen somit nicht unterbreitet werden. Im Speziellen auf die Fußgängernavigation in Innenbereichen lässt sich dieses Verfahren im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht übertragen, da hierfür eine kontinuierliche Positionierung der NutzerInnen nötig wäre. Sobald eine bessere Positionierung in Innenbereichen flächendeckend greifbar wird, beispielsweise durch die Arbeit von Jackermeier und Ludwig (2018a, 2018b), könnte das in Abschnitt 3.3 „Pfadplanung“ beschriebene Verfahren in zukünftigen Arbeiten durch eine Bewertung auf Ebene einzelner *Nodes* und *Edges* erweitert werden. So könnten *Edges*, die von NutzerInnen überproportional vermieden werden, beispielsweise auf Baustellen oder auch generelle Fehler in den Umgebungsmodellen hinweisen.

Nur wenige Arbeiten zu Fahrzeugnavigationssystemen führen Merkmale auf, die nicht mit dem allgemeinen Ziel gewählt worden sind, komplexe Routenabschnitte zu vermeiden bzw. NutzerInnen einfachere Routen als die kürzesten präsentieren zu können. Ein Beispiel liefert das von Keler und Mazimpaka (2016) vorgestellte Verfahren zur Ermittlung möglichst sicherer Routen. Anhand verschiedener Kriterien, wie Verbrechensstatistiken und Polizeistationen, werde zunächst ein Sicherheits-Index erstellt. Dadurch könnten *Edges* der verwendeten „OpenStreetMap“-Karten in unsichereren Gebieten bei der Pfadsuche höher gewichtet werden. Zusätzlich würden bestimmte Brennpunkte bei der Routensuche komplett vermieden.

Die Szenerie einer Fahrzeugroute wird von Da Silva, De Souza Baptista, De Menezes und De Paiva (2008) neben den Aspekten kurz, schnell und einfach bei der Berechnung von Routen berücksichtigt. Einfache Routen werden dabei mit dem von Duckham und Kulik (2003) beschriebenen Verfahren ermittelt, während die Szenerie anhand der Anzahl an Sehenswürdigkeiten entlang der Route bemessen

wird. NutzerInnen des beschriebenen Navigationssystems hätten die Möglichkeit anhand jeweils einer fünfstufigen Skala von 0,0 bis 1,0 den Einfluss zu bestimmen, den diese vier Aspekte bei der Berechnung der *Gewichtungsfaktoren* von *Edges* und Abbiegungen hätten. Dieser Ansatz zur Ermittlung von Routen hängt somit erneut von verschiedenen *Faktoren* ab, die teils von NutzerInnen gewählt werden, teils aber durch sinnvoll erscheinende Werte vorgegeben sind. So fließt in die Berechnung des schnellsten Pfades beispielsweise das aktuelle Wetter ein, wobei „leichter Regen“ den *Faktor* 0,95 und „starker Regen“ 0,85 aufweist.

Zusammenfassend zeigt sich, dass es zahlreiche Alternativen zu schnellsten oder kürzesten Routen bei der Fahrzeugnavigation gibt, die jeweils verschiedene Vorteile bieten. Obwohl meist das Ziel verfolgt wird, einfachere Routen zu generieren, gibt es unterschiedliche Aspekte, die sich bei der Berechnung von Pfaden in Betracht ziehen lassen. Beispiele hierfür sind die Art von Abbiegungen, die Ambiguität von Anweisungen oder das Vorhandensein von Landmarken entlang der Route.

Parallel zu den Bestrebungen, die von Navigationssystemen vorgeschlagenen Fahrzeugrouten zu verbessern, existieren zahlreiche Arbeiten, die eine Anpassung an Bedürfnisse von FußgängerInnen verfolgen. Meist kommen dabei ähnliche Verfahren zum Einsatz. Aufgrund der Relevanz für die vorliegende Forschungsarbeit wird im nun folgenden Unterabschnitt detaillierter auf solche Publikationen eingegangen.

3.1.4 Fußgängernavigation

Die im vorherigen Abschnitt aufgezeigte Literatur zeigt, dass anhand formaler Definitionen von Komplexität geeignete Merkmale gefunden werden können, um generierte Routen besser an Bedürfnisse von VerkehrsteilnehmerInnen anpassen zu können. Die unterschiedlichen Herangehensweisen machen allerdings weiterhin deutlich, dass die Definition einer operationalisierten Komplexität kein trivial zu lösendes Problem darstellt. Nicht zuletzt abhängig vom zugrundeliegenden Umgebungsmodell lassen sich hierfür zahlreiche unterschiedliche Aspekte miteinbeziehen. Durch Auswahl und Gewichtung geeigneter Merkmale kann eine Heuristik zur Bewertung von Routen definiert und dann genutzt werden, um die Resultate einer Pfadsuche zu steuern. Diese Herangehensweise beschränkt sich nicht auf die Fahrzeugnavigation. Auch die Anpassung von Fußwegrouten an allgemeine oder individuelle Nutzerbedürfnisse wird in zahlreiche Forschungsarbeiten thematisiert. Ansätze, die bei der Fahrzeugnavigation bzw. in Außenbereichen sinnvolle Resultate liefern, lassen sich allerdings nicht immer direkt auf die Fußgängernavigation, speziell in Innenbereichen, übertragen. So kann beispielsweise die in Duckham und Kulik (2003) getroffene Einteilung von Kreuzungen im Straßenverkehr nicht auf die Umgebungsmodelle angewandt werden, die im Rahmen dieser Arbeit von den Gebäuden der Universität Regensburg erstellt worden sind: Verzweigungen der Wege ergeben sich meist in größeren, weitläufigen Bereichen, wie Hallen und Foyers, sodass sich eine Klassifizierung von

Abbiegungen schwieriger gestaltet. Auch die von Haque et al. (2007) beschriebene Messung der Ambiguität von Routenanweisungen müsste zumindest an die speziellen Gegebenheiten eines bestimmten Umgebungsmodells angepasst werden, um die große Zahl an Pfaden, die von einer Halle ausgehen, entsprechend klassifizieren und somit bewerten zu können.

Millonig und Schechtner (2007) weisen darauf hin, dass sich die Ermittlung optimaler Routen bei der Fußgängernavigation allerdings schon deshalb komplexer als bei der Fahrzeugnavigation gestalte, da neben der Vermeidung von Abbiegungen andere Kriterien an Relevanz gewinnen. Die Autoren schreiben, dass FußgängerInnen aufgrund von Unterschieden in der räumlichen Wahrnehmung unterschiedliche Strategien bei der Pfadplanung verfolgen würden. Diese könnten beispielsweise vom Alter, Geschlecht, vom sozialen und kulturellen Hintergrund sowie von der aktuellen Umgebung abhängen. Dadurch zeigen die Autoren die Schwierigkeit auf, Routen an die allgemeinen Bedürfnisse eines Durchschnittsnutzers anzupassen. Dieser Aspekt ist im Speziellen für die vorliegende Arbeit von Bedeutung. So wird das erarbeitete Konzept in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ exemplarisch erprobt, indem Routen an die allgemeinen Präferenzen von NutzerInnen des Navigationsystems an der Universität Regensburg angepasst werden. Um trotz der Varianz im Verhalten individueller NutzerInnen Routen ermitteln zu können, die von einer überdurchschnittlichen Anzahl von Personen bevorzugt werden, empfehlen Millonig und Schechtner eine Analyse von Fußgängerströmen. Dies rechtfertigt einerseits den in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ beschriebenen datengetriebenen Ansatz, unterstreicht aber ergänzend zu Krissp und Keler (2015) den Nutzen einer Übertragung des Verfahrens auf unterschiedliche Personengruppen, die Inhalt zukünftiger Arbeiten sein könnte.

Eine von Agrawal, Schlossberg und Irvin (2008) durchgeführte Befragung von FußgängerInnen bezüglich ihrer Präferenzen bestätigt, dass die Bedürfnisse facettenreicher sind, als bei der ausschließlichen Fahrzeugnavigation. Einerseits wird die „Kürze der Route“ am häufigsten als Einflusskriterium bei der Routenwahl genannt, wobei der Begriff von den Autoren gleichbedeutend mit der am schnellsten zurücklegbaren Route verwendet wird. Darüber hinaus zeigt die Arbeit aber weitere Aspekte auf, wie Sicherheit, Komfort und Attraktivität, wobei diese Reihenfolge die Häufigkeit der Nennungen widerspiegelt.

Heye und Timpf (2003) teilen den allgemeinen Aspekt der Komplexität von Fußwegrouten in drei Klassen ein. So wird die physische Komplexität („physical complexity“) von Routen, welche durch räumliche Gegebenheiten verursacht wird, von persönlicher Komplexität („personal complexity“), die durch Anforderungen bestimmter Nutzergruppen, wie Menschen mit Behinderungen, beeinflusst wird, abgegrenzt. Eine weitere Klasse bildet jene der temporären Komplexität („temporal complexity“), die durch vorübergehende Aspekte, wie Wetterverhältnissen oder

Baustellen, hervorgerufen wird. Die Autoren entwickeln dann eine Methode zur Messbarmachung der Komplexität von Routen im öffentlichen Nahverkehr, wobei im Speziellen die physische Komplexität der Routen untersucht wird. Anhand empirischer Daten wird ein Maß spezifiziert, das die Komplexität einer Route als Summe der Komplexität der einzelnen Umstiegspunkte definiert. Die Komplexität jedes Umstiegspunktes ergibt sich dabei durch Addition verschiedener Merkmale, wie beispielsweise der Anzahl an Haltestellen am jeweiligen Umstiegspunkt oder der zu überquerenden Straßen beim Umsteigen. Im Ausblick der Arbeit Heye und Timpf (2003) wird beschrieben, dass bereits Daten zu 50 Umstiegspunkten gesammelt worden seien. Anhand der erstellten Merkmalsvektoren könnten einerseits *Gewichtungen* der verschiedenen Einflussfaktoren ermittelt werden, sodass sich Nutzerbewertungen verschiedener Routen algorithmisch vorhersagen lassen würden. Weiterhin wird auf die Möglichkeit eingegangen, persönliche, individuelle Nutzerpräferenzen bei der Bemessung der Routenkomplexität durch Anpassung der Gewichtungen zu berücksichtigen. Im von den Autoren beschriebenen Ansatz finden sich mehrere Parallelen zu der im Zentrum der hier vorliegenden Forschungsarbeit stehenden Generierung präferenzbasierter Fußgängeroutes. Auch in der Arbeit von Heye und Timpf wird die Eignung einer Route im Hinblick auf Nutzerbedürfnisse operationalisiert. Zur Ermittlung einer Route wird der Streckenverlauf dann so angepasst, dass die Eignung maximiert bzw. das definierte Komplexitätsmaß minimiert wird. Aufgrund des unterschiedlichen Kontextes der Arbeiten unterscheiden sich die zur Komplexitätsbewertung herangezogenen Merkmale. Während für die Arbeit von Heye und Timpf Eigenschaften der Umstiegspunkte im öffentlichen Nahverkehr relevant sind, werden in der vorliegenden Arbeit zahlreiche Merkmale in Betracht gezogen, deren Einfluss zunächst unbekannt ist. So wird zur Eignungsquantifizierung der Fußwegrouten die jeweilige Anzahl und Länge der in Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“ aufgelisteten Kategorien von *Nodes* und *Edges* ermittelt. Wie bereits Unterabschnitt 3.1.3 „Fahrzeugnavigation“ erkennen lässt, stellt die Ermittlung geeigneter Merkmale sowie deren Gewichtung, um ein Maß zu finden, das die Bewertungen und somit die Bedürfnisse der NutzerInnen in möglichst optimaler Weise nachbildet, eine häufig auftretende Schwierigkeit dar. Heye und Timpf verfolgen hier einen datengetriebenen Ansatz: In der vorgestellten Publikation basiert die Bewertung der Umstiegspunkte auf den Erkenntnissen einer vorab durchgeführten Befragung von NutzerInnen hinsichtlich ihrer Präferenzen. So ist die Zahl zu überquerender Straßen beispielsweise ein häufig genanntes Einflusskriterium. Im Ausblick der Arbeit wird weiterhin angegeben, dass die genauen *Gewichtungen* der Einflussfaktoren anhand von Nutzerprofilen erfolgen sollten und dass diese so zu wählen seien, dass die definierte Heuristik die Bewertung von ProbandInnen widerspiegelt. Ein ähnliches Vorgehen wird in der vorliegenden Arbeit verfolgt. Um zu ermitteln, ob sich die Merkmale, die sich direkt aus dem spezifizierten Umgebungsmodell ableiten lassen,

grundsätzlich eignen, um Routen an Nutzerpräferenzen anzupassen, wird zunächst die in Abschnitt 3.2 „Nutzerstudien“ vorgestellte Befragung durchgeführt. Darauf aufbauend wird dann das Ziel verfolgt, *Gewichtungen* dieser Merkmale datengetrieben anzupassen. Prinzipiell wäre es hierfür möglich gewesen, Routen, wie von Heye und Timpf (2003) im Ansatz skizziert wird, direkt von NutzerInnen bewerten zu lassen, beispielsweise auf einer Skala von 1 bis 100 Punkten. Mittels linearer Regression hätten dann beispielsweise *Gewichtungsfaktoren* berechnet werden können, die den quadratischen Fehler der Heuristik minimieren. Aufgrund der Komplexität der sich für ProbandInnen ergebenden Aufgabe, Routen, die durch verschiedene Gebäude der Universität verlaufen, zu bewerten, wird allerdings ein alternatives Vorgehen verfolgt. So sollen ProbandInnen in einer anschließenden Studie, welche in Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“ beschrieben ist, lediglich eine von ihnen favorisierte Route beschreiben. Die *Gewichtungsfaktoren* werden dann so gewählt, dass die Pfade, die anhand einer Minimierung der sich ergebenden Heuristik generiert werden, möglichst den Kriterien der von NutzerInnen genannten Pfade entsprechen. Eine genauere Beschreibung des Vorgehens findet sich in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“.

Ein weiteres Verfahren zur Ermittlung von Routen im öffentlichen Nahverkehr wird von Ludwig, Zenker und Schrader (2009); Zenker und Ludwig (2009a, 2009b) aufgezeigt. Die entwickelte Applikation „Rose“ (ROuting SErvice) berechne Routen, die neben einem einzelnen Ziel auch mehrere Zielorte enthalten könne, die nacheinander angesteuert würden. Hierbei würden sich verschiedene Nutzerpräferenzen berücksichtigen lassen, die anhand einer Umfrage ermittelt worden sind. Neben Einflussfaktoren wie „kurze Fußwege“ und „kurze Gesamtdauer“ würden Kriterien, die die Fahrten im öffentlichen Nahverkehr betreffen, wie „wenig Umstiege“ und „kurze Umstiegszeiten“ einbezogen werden. Auch in diesen Forschungsarbeiten wird auf die gewichtete Summe verschiedener (Routen-)Eigenschaften eingegangen. Die Autoren schreiben, dass diese eine verbreitete Möglichkeit darstelle, um eine eindimensionale Bewertungsskala in multiattributiven Modellen zu erhalten. Ein einfacher Ansatz sei deshalb, Präferenzen von NutzerInnen abzufragen und als *Gewichtungsfaktoren* heranzuziehen. Jedoch wird konstatiert, dass es für NutzerInnen schwierig sei, die von einem solchen System getroffenen Entscheidungen nachzuvollziehen. Aufgrund der unterschiedlichen Einheiten der verschiedenen Merkmale sei es auch für Entwickler nicht trivial, *Gewichtungen* festzulegen. Als Alternative nutzen die Autoren deshalb die von ihnen entwickelte entscheidungsorientierte Programmiersprache „MADL“ (siehe Zenker, 2010). NutzerInnen könne dadurch ein Pareto-Optimum vorgeschlagen werden, in dem eine bestimmte Eigenschaft, beispielsweise die Anzahl der Umstiege, minimiert werde. Auch durch die in Abschnitt 3.3 „Pfadplanung“ beschriebene Routengenerierung wird grundsätzlich ein Pareto-Optimum ermittelt, da es beispielsweise nicht möglich ist, einen Aufzug zu umgehen, ohne einen anders

gearteten Umweg in Kauf zu nehmen. Die Minimierung einer einzelnen Eigenschaft ist aber, im Gegensatz zu den im Projekt „Rose“ berücksichtigten Kriterien, nur in Einzelfällen zielführend: Bei einer Person, die grundsätzlich Angst hat, Aufzüge zu verwenden, könnte es beispielsweise tatsächlich sinnvoll sein, deren Zahl durch einen gegen unendlich gehenden *Gewichtungsfaktor* zu minimieren. Meist stellt sich die Situation jedoch komplexer dar. NutzerInnen könnten Aufzüge beispielsweise erst ab einer bestimmten Anzahl von zu überwindenden Stockwerken in Erwägung ziehen. Dieses Verhalten lässt sich weder durch eine generelle Minimierung von Treppen noch von Aufzügen nachbilden. Die Notwendigkeit, Nutzerpräferenzen im Rahmen der vorliegenden Arbeit datengetrieben zu erlernen, zeigt sich deshalb auch anhand der in den Publikationen zum Projekt „Rose“ beschriebenen Problemstellungen. Die Wahl der *Faktoren*, deren gemeinsame Einheit sich als zu akzeptierender Umweg betrachten lässt, bleibt durch diesen Ansatz explizit weder den NutzerInnen noch dem Entwickler überlassen. Stattdessen ergibt sich diese implizit anhand einer Sammlung bzw. eines Referenzstandards von exemplarischen Routen, die für eine bestimmte Zielgruppe an NutzerInnen optimal sind.

Da Routen mit öffentlichen Verkehrsmitteln meist auch Fußwege beinhalten, können Kriterien, die Einfluss auf die Präferenz von Fußgänger-Routen nehmen, grundsätzlich auch in Navigationssystemen für Bus und Bahn genutzt werden. Jedoch wird durch Heye und Timpf (2003); Ludwig et al. (2009); Zenker und Ludwig (2009a, 2009b) aufgezeigt, dass zusätzlich weitere Merkmale, wie Umstiegszeiten, berücksichtigt werden sollten. Auch für die algorithmische Vorgehensweise ergeben sich aufgrund einzuhalten Abfahrtszeiten Unterschiede, wie beispielsweise durch die Arbeiten von Berger, Grimmer und Müller-Hannemann (2010); Disser, Müller-Hannemann und Schnee (2008); Zenker (2010) gezeigt wird. Navigationssysteme, die ausschließlich aus Fußwegen bestehende Routen generieren, werden ebenfalls in zahlreichen Arbeiten thematisiert.

Ein solcher Ansatz zur Ermittlung von Fußgänger routen in Innenbereichen findet sich in Lyardet, Szeto und Aitenbichler (2008). Das hierfür zugrunde liegende Umgebungsmodell ähnelt dem im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit spezifizierten Modell: Der hybride Ansatz (siehe Unterabschnitt 2.2.6 „Modellkombinationen“) beinhaltet einerseits ein graphbasiertes Modell, das herangezogen werde, um Routen zu berechnen. Ein geometrisches Modell ermögliche dann die Transformation symbolischer in geographische Koordinaten. Im Speziellen wird darauf eingegangen, dass statt den kürzesten Pfaden Routen unter der Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren ermittelt würden. Die Autoren definieren hierfür ein Nutzermodell, das die drei Aspekte „körperliche Fähigkeiten“, „Zugangsrechte“ und „Präferenzen“ umfasst. Im beschriebenen Algorithmus würden zunächst alle potentiell möglichen Routen ermittelt, diese würden dann anhand verschiedener Gegebenheiten und anhand bestimmter Nutzerpräferenzen bewertet, um das Optimum auswählen zu

können. Auf konkrete Nutzerpräferenzen wird allerdings nur exemplarisch und zur Veranschaulichung des Vorgehens eingegangen. Die automatisierte Ermittlung der Ausprägung bestimmter Präferenzen eines Nutzers wird im Ausblick aufgeführt.

Caduff und Timpf (2005a, 2005b) stellen einen Algorithmus zur Generierung von Routen vor, die einfach zu beschreiben und nachzuvollziehen sind. Hierfür werden mehrere Einflussfaktoren berücksichtigt, die sich aus Landmarken entlang möglicher Routen ergeben. Die Autoren motivieren dieses Verfahren durch zahlreiche Quellen, die die Notwendigkeit einer klaren Routenbeschreibung und weiterhin die Relevanz von Landmarken, um diese zu erreichen, aufzeigen. Eine Route, die mittels eines angepassten Dijkstra-Algorithmus berechnet werde, enthalte unterschiedlich gewichtete Landmarken, sodass deren Qualität im Hinblick auf eine klar zu beschreibende Route berücksichtigt werde. Zur Bewertung einer einzelnen Landmarke würden hierfür die Merkmale „Distanz zur Landmarke“, „Blickrichtung relativ zur Landmarke“ und „Salienz der Landmarke“ herangezogen. Zur Pfadplanung müssten diese Merkmale zunächst quantifiziert werden, beispielsweise werde die „relative Blickrichtung zur Landmarke“ hierfür in die vier Klassen „vorne“, „hinten“, „links“ und „rechts“ unterteilt, denen dann unterschiedliche Konstanten zugewiesen würden. Die so quantifizierten Merkmale würden dann weiterhin durch *Faktoren* (a , b und c) gewichtet, hierfür wird die Gewichtungsfunktion $w_i = a * Distance + b * Orientation + c * Salience$ angegeben. Auch dieser Arbeit liegt somit der Ansatz zugrunde, eine Route durch Minimierung einer Kostenfunktion zu ermitteln, wodurch in diesem Fall die Eignung der enthaltenen Landmarken in der Summe maximiert wird. Erneut wird somit die Forschungsfrage aufgeworfen, wie die einzelnen *Faktoren* zu gewichten sind. Diese Schwierigkeit, zu deren Lösung die hier vorliegende Forschungsarbeit einen möglichen Ansatz aufzeigen soll, steht nicht im Vordergrund der Arbeit von Caduff und Timpf. Die Autoren gehen dennoch kurz darauf ein und schreiben, dass die *Gewichtungsfaktoren* a , b und c den persönlichen Präferenzen eines Nutzers zugeordnet werden sollten. Wie in Zenker und Ludwig (2009b) beschrieben, ist es jedoch schwierig, diese *Faktoren* intuitiv festzulegen. Das in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ beschriebene Verfahren könnte deshalb auch auf dieses Szenario übertragen und genutzt werden, um diese *Gewichtungen* datengetrieben zu ermitteln.

Ein weiteres Verfahren, einfachere Fußgängeroutes zu generieren, in dem das Risiko, sich zu verlaufen, minimiert wird, findet sich in Vanclooster, De Maeyer, Fack und Van de Weghe (2013); Vanclooster et al. (2014). Die Autoren greifen hierfür auf eine Heuristik zurück, die von Grum (2005) für die Risikobewertung von Pfaden in Außenbereichen entwickelt worden ist. Diese berechnet sich durch Addition der Gesamtlänge der Route mit einer aufsummierten Risikobewertung der einzelnen Kreuzungspunkte:

$$\text{Gesamtrisiko} = \text{gesamte_Routenlänge} + \sum_i \text{Risiko_Kreuzungspunkt}(i)$$

Der Idee folgend, dass Personen, die falsch abbiegen, ihren Irrtum bei der nächsten Abbiegung bemerken und dann umkehren würden, errechne sich die Bewertung jedes Kreuzungspunktes durch die Vorschrift:

$$\text{Risiko_Kreuzungspunkt}(i) = \frac{2 * \sum \text{Länge_des_falschen_ausgehenden_Weges}}{\text{Anzahl_aller_möglichen_ausgehenden_Wege}}$$

Diese Routenbewertung wird von Vanclooster et al. (2013, 2014) auf Innenbereiche übertragen und evaluiert. Es zeige sich allerdings, dass es dadurch nicht zu signifikanten Veränderungen komme. Berechnete Routen seien im Durchschnitt um 4 % länger als die kürzesten, die durchschnittliche Zahl möglicher (Fehl-)Entscheidungen werde nur unmerklich verringert. Die Autoren diskutieren deshalb verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten des verfolgten Ansatzes. So versehen die Autoren beispielsweise die Gesamtlänge der Route und die aufsummierten Risikofaktoren der Kreuzungspunkte mit *Gewichtungen*, welche dann variiert werden. Im Hinblick auf zukünftige Arbeiten wird unter anderem der Hinweis gegeben, dass bessere Ergebnisse durch weitere Parameter und geeignete *Gewichtungsfaktoren* erzielt werden könnten.

Die Schönheit der Umgebung ist ein weiterer Einflussfaktor, der von Quercia, Schifanella und Aiello (2014) bei der Routenberechnung herangezogen wird. Um die hierfür notwendigen Informationen in einem graphbasiertes Umgebungsmodell zu hinterlegen, sei zunächst mittels einer Onlineplattform abgefragt worden, welche abgebildeten Orte als schön („beautiful“), ruhig („quiet“) und fröhlich („happy“) wahrgenommen würden. Dabei geht es auch in diesem Ansatz primär darum, NutzerInnen zu einem Ziel Ihrer Wahl zu führen und nicht um die Generierung ansprechender Spazierstrecken zum Zeitvertreib. In einem weiteren Schritt berechnen die Autoren deshalb ausgehend von der kürzesten Route einen Pfad, der die genannten Eigenschaften der Umgebung durch das Inkaufnehmen kleiner Umwege verbessere. Die ermittelten Routen seien dadurch im Durchschnitt um 12 % länger als die kürzesten. Weiterhin stellen die Autoren fest, dass diese relative Abweichung abnehme, je weiter Start- und Zielpunkt auseinander liegen – diese Tendenz bildet sich auch in der in Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“ vorgestellten Sammlung präferierter Nutzeroutes ab. Das beschriebene Verfahren wird dann anhand von Nutzerbewertungen evaluiert. Es zeige sich, dass die ermittelten Pfade der Kategorien schön, ruhig und fröhlich in drei jeweils zugeordneten, konstruierten Szenarien, in denen eine schöne, ruhige bzw. aufmunternde Route benötigt wird, signifikant bessere Ergebnisse als die kürzeste Route erzielen würden. Abschließend wird auf die Problematik eingegangen, dass der Ansatz aufgrund der notwendigen Nutzerbewertungen als Datengrundlage nur schlecht skaliere. An zwei praktischen Beispielen wird gezeigt, dass alternativ Bewertungen von georeferenzierten Fotos der Internetplattform „Flickr“ als Grundlage dienen könnten.

Malaka und Zipf (2000) stellen ein Touristenführer-System vor, das neben Routen für Kraftfahrzeuge und Fahrräder auch Routen für FußgängerInnen und RollstuhlfahrerInnen generieren kann. Die Autoren schreiben, dass das Navigationssystem auch Präferenzen und Interessen einzelner NutzerInnen berücksichtigen solle. Hierfür werden harte Restriktionen, die aufgrund physikalischer Eigenschaften oder Verkehrsregeln zu Barrieren führen würden, von weichen Restriktionen, deren Relevanz abhängig von individuellen Nutzerpräferenzen als auch vom Zeitpunkt der Navigation sei, unterschieden. Die Identifikation und Modellierung dieser Attribute stelle dabei einen notwendigen ersten Schritt zur Ermittlung personalisierter Routen dar. Als Beispiele für weiche Restriktionen werden ästhetische Aspekte, das soziale Milieu des Gebietes, Abneigung gegen motorisierten Verkehr, architektonisch interessante Gebäude und schöne Aussichtspunkte genannt. Eine empirische Ermittlung dieser Attribute bzw. deren Ausprägungen ist nicht Teil der Arbeit von Malaka und Zipf (2000). Allerdings zeigt auch diese exemplarische Auflistung die Bandbreite potentieller Einflussfaktoren auf.

Ein weiteres Navigationssystem für FußgängerInnen in Innen- und Außenbereichen wird in Baus, Krüger und Wahlster (2002) beschrieben. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der geeigneten Präsentation der Route und auf dem Zusammenspiel verschiedener Methoden zur Lokalisierung des Nutzers. Dennoch werden auch in dieser Arbeit einige Kriterien aufgeführt, die zu Abweichungen von der kürzesten Route führen würden. So schreiben die Autoren, dass die kognitive Belastung reduziert werde und die Parameter „Gehgeschwindigkeit“, „Vertrautheit mit der Umgebung“ und „Zeitdruck“ berücksichtigt würden.

In zahlreichen Arbeiten wird detaillierter auf Einflusskriterien eingegangen, die betrachtet werden können, um Routen an Bedürfnisse spezieller Nutzergruppen anzupassen. So nutzen Karimi und Ghafourian (2010) die in Dudas et al. (2009) aufgeführte Ontologie, die anhand des „American Disability Act“-Standards entwickelt worden sei. Die vorgestellte Routenberechnung in Innenbereichen richtet sich an ältere Personen sowie Personen mit eingeschränkter Mobilität, Sehkraft oder eingeschränkten kognitiven Fähigkeiten. Hierfür würden mittels des sogenannten „ONALIN-FN“-Algorithmus zuerst alle unzugänglichen Elemente entfernt. Der „ONALIN-PR“-Algorithmus nutze zur Ermittlung der Route dann eine Dijkstrasche, wobei Elemente verschieden gewichtet würden. Die Autoren schreiben, dass diese *Gewichtungen* Präferenzen eines Nutzers repräsentieren würden und in einem Nutzerprofil zusammen mit den jeweiligen speziellen Bedürfnissen hinterlegt werden könnten. Die Ermittlung dieser *Gewichtungsfaktoren* ist allerdings nicht Teil der von Karimi und Ghafourian (2010) vorgestellten Arbeit.

Auch das von Anagnostopoulos et al. (2005) beschriebene System soll Bedürfnisse verschiedener Personengruppen wie beispielsweise mobilitätseingeschränkter, blinder und älterer Menschen berücksichtigen. Zur Routenberechnung würden zu-

nächst Routen ermittelt, die alle durch ein bestimmtes Nutzermodell gestellten Anforderungen erfüllen. Anschließend folge eine Bewertung anhand von Nutzerpräferenzen, um die am besten eingestufte Route auszuwählen. Die Autoren gehen darauf ein, dass hierfür eine Qualitätsmetrik herangezogen werden müsse, die vom jeweiligen Nutzer abhänge. Als Beispiel wird neben der minimalen Weglänge aufgeführt, dass NutzerInnen die Präferenz haben könnten, entlang ihres Weges Aufgaben aus Ihrem Kalender zu erledigen. Die Arbeit setzt allerdings andere thematische Schwerpunkte, weshalb auch hier nicht näher auf eine mögliche Operationalisierung solcher Präferenzen eingegangen wird.

Kikiras et al. (2006) stellen ein durch eine Ontologie spezifiziertes Nutzermodell vor, das in das von Anagnostopoulos et al. (2005) beschriebene Navigationssystem eingebunden werden könne. Dieses umfasst einerseits Nutzereigenschaften im Hinblick auf eine geeignete Präsentation der Route. Andererseits beinhaltet das Modell Kriterien, die sich auf die Ermittlung des optimalen Routenverlaufs auswirken. Diese Kriterien unterteilen die Autoren in Fähigkeiten der Nutzer, die indizieren, welche Pfade grundsätzlich möglich sind, und Präferenzen, die in einem nächsten Schritt die Bewertung zur Wahl der geeignetsten Route steuern. Als typische Präferenzen nennen die Autoren unter anderem „schnellste Route“, „kürzeste Route“, „Vorhandensein bestimmter Pfadelemente“ (als Beispiel hierfür geben die Autoren Hauptkorridore und Treppen an), „Vermeidung von Treppen“, „Vermeidung von besonders belebten Bereichen“, „beliebtester oder unbeliebtester Pfad unter allen Nutzern“, „Landmarken entlang der Route“. Die Autoren schreiben, dass die Pfadlänge immer als wichtiges Auswahlkriterium verbleibe, dass bestimmte Pfadegenschaften anhand dieser Präferenzen aber zu Bonus- sowie Strafpunkten bei der Bewertung potentieller Routen führen würden. Auf eine Messbarmachung der exemplarisch genannten Eigenschaften wird dabei nicht weiter eingegangen.

Die bisher vorgestellten Arbeiten machen deutlich, dass die Vermeidung bestimmter Routenabschnitte, durch höhere Gewichtung bei der Pfadsuche, sowohl bei der Fahrzeug- als auch bei der Fußgängernavigation einen verbreiteten Ansatz darstellt. Kikiras et al. (2006) und Anagnostopoulos et al. (2005) zeigen hierzu eine mögliche alternative Betrachtungsweise von Nutzerpräferenzen auf, da Routen vorab berechnet und erst in einem zweiten Schritt bewertet werden. Dadurch entfällt die Anforderung, dass *Gewichtungsfaktoren* positiv sein müssen, die sich beispielsweise bei Verwendung eines Dijkstra- oder A*-Algorithmus stellt. Die durch die Autoren beschriebenen Kriterien lassen sich soweit jedoch auch mit ausschließlich positiv gewichteten Pfadelementen realisieren. Die genannte Präferenz für bestimmte Pfadelemente oder für das Vorhandensein von Landmarken kann ebenfalls durch eine entsprechende Vermeidung von Pfaden ohne diese Elemente bzw. ohne Landmarken umgesetzt werden. Um Pfade zu berechnen, die keine Elemente einer bestimmten Kategorie enthalten, können deren *Gewichtungen* beliebig hoch (auch unendlich)

gewählt werden. Routen für RollstuhlfahrerInnen enthalten so beispielsweise nur dann Stufen, wenn es ansonsten keine mögliche Route zum Ziel gibt. Ein solcher Ansatz kann jedoch eine sinnvolle Alternative zu einer kostenminimierenden Pfadsuche darstellen, beispielsweise, wenn nicht die Erreichung eines Zielpunktes im Vordergrund steht, sondern wenn Spazierwege generiert werden sollen. Auf diesen Aspekt wird in Unterabschnitt 4.5.3 „Übertragbarkeit“ im Kontext der Generierung von Routen durch ein Einkaufszentrum eingegangen. Allgemein kann ein datengebauter Ansatz, wie er in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ beschrieben wird, aber auch durch die Quantifizierung der von den Autoren genannten Bonus- und Strafpunkte motiviert werden.

Auf Bedürfnisse von blinden und älteren Menschen wird in Petrie et al. (1996) eingegangen. Hierfür sind zunächst Interviews mit potentiellen NutzerInnen des zu entwickelnden Reiseführers durchgeführt worden. Zwar bildet die Routenberechnung nicht den Fokus der Arbeit, die Autoren berichten aber, dass die Möglichkeit, bei der Pfadplanung bestimmte Einschränkungen vorgeben zu können, großen Anklang gefunden hat. Sie beschreiben exemplarisch die Anwendung, als Alternative zur kürzesten Route die sicherste Route vorzuschlagen. Dabei wird auf die Notwendigkeit eingegangen, hierfür geeignete Merkmale zu identifizieren. Als Beispiele werden Vermeidungen belebter Straßen und sogenannter „clockwise crossings“ aufgeführt, bei denen es sich um Straßenüberquerungen handelt, die für viele blinde Personen besonders schwierig sind. Weitere Präferenzen würden sich aus bestimmten Mobilitätseinschränkungen oder persönlichen Wünschen ergeben.

Routen speziell für RollstuhlfahrerInnen werden in S. Yang und Mackworth (2007) und Yayan, Akar, Inan und Yazici (2014) ermittelt. Dabei gehen Yayan et al. (2014) eher auf technische Details ein, die zur Steuerung eines Rollstuhls notwendig sind. Berechnet werden dann kürzeste Routen. Der Schwerpunkt von S. Yang und Mackworth (2007) liegt dagegen auf einem hierarchischen Pfadplanungs-Algorithmus. Eine Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen erfolgt in diesen Ansätzen ausschließlich im Sinne einer generellen Vermeidung von Pfadabschnitten, die nicht passiert werden können.

In diesem Unterabschnitt ist gezeigt worden, dass für die Routenberechnung in Navigationssystemen für FußgängerInnen zahlreiche unterschiedliche Kriterien herangezogen werden. Während sich bei der Fahrzeugnavigation viele Arbeiten mit der durch Kurven verursachten Komplexität befassen, hängen Kriterien bei der Fußgängernavigation auch vom gewählten Einsatzgebiet und von der angesprochenen Zielgruppe ab. So werden beispielsweise bei der Berücksichtigung von Bussen und Straßenbahnen andere Merkmale berücksichtigt als bei der Navigation in Innenbereichen; RollstuhlfahrerInnen haben weiterhin andere Bedürfnisse als TouristInnen. Insgesamt bildet sich für den Kontext dieser Arbeit heraus, dass zur Generierung präferenzadaptiver Routen zwei grundlegende Arbeitsschritte notwendig sind. So

müssen Kriterien gefunden werden, die Einfluss auf die Erfüllung von Nutzerbedürfnissen in einer bestimmten Umgebung haben. Diese Kriterien gilt es dann jeweils geeignet zu gewichten, um durch deren Zusammenspiel eine Heuristik zu definieren, die Nutzerpräferenzen widerspiegelt. Im nächsten Abschnitt wird deshalb eine Arbeit vorgestellt, die sich im Detail mit der Optimierung solcher *Gewichtungsfaktoren* befasst.

3.1.5 Datengetriebene Ansätze

Die vorgestellten Arbeiten zeigen auf, dass sich aus der Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen bei der Pfadsuche die Notwendigkeit ergibt, einflussnehmende Kriterien der Umgebung geeignet zu operationalisieren. Grundlage dieser Ansätze bildet die Idee einer Funktion, die jeder möglichen Route R , bestehend aus *Nodes* und *Edges*, mit gegebenem Start- und gegebenem Zielort eine Nutzerbewertung zuordnet. Zur Nutzung einer solchen Funktion bei der Pfadplanung sei diese formal so definiert, dass eine bessere Bewertung sich in kleineren Werten äußert. Diese Vorschrift kann dabei von den individuellen Anforderungen eines Nutzers bestimmt sein oder die durchschnittliche Präferenz einer Nutzergruppe wiedergeben. Einer Person selbst ist diese Funktion und deren Parameter dabei nicht explizit bekannt. Vielmehr stellt sie ein Konstrukt dar, das sich bei der Abwägung verschiedener alternativer Pfade manifestiert. Die favorisierte Route eines Nutzers ergibt sich dann formal durch die Wahl aufeinanderfolgender *Nodes* und *Edges*, die zu einer Minimierung der Funktion führen:

$$\text{Favorisierte_Route} = \arg \min_R (\text{Nutzerbewertung}(R))$$

Durch die Spezifikation einer Heuristik, die Nutzerbewertungen bis auf einen sich ergebenden Fehler ε vorhersagt, lassen sich an Präferenzen angepasste Pfade dann automatisiert ermitteln.

$$\text{Heuristik}(R) = \text{Nutzerbewertung}(R) + \varepsilon$$

Der Fehler ε indiziert somit, wie gut sich eine Heuristik eignet, die Nutzerbewertung einer bestimmten Route abzubilden. Eine Möglichkeit zur Optimierung einer Heuristik ist also, die Summe der quadratischen Fehler zu minimieren. Praktisch ist dies jedoch auf direktem Wege nicht möglich, da die Nutzerbewertung als latentes Konstrukt nicht gemessen werden kann. Den quantitativen Grad der Zufriedenheit mit einer bestimmten Route von NutzerInnen anhand einer Bewertungsskala abzufragen, würde wohl viele NutzerInnen überfordern, wie in Unterabschnitt 3.1.4 „Fußgängernavigation“ diskutiert worden ist. Es existieren deshalb alternative Ansätze, um Manifestationen der Bewertungsfunktion zur Erstellung einer Heuristik heranzuziehen. Die bereits erwähnten Arbeiten von Julia Letchner, John Krumm (2006); Patel et al. (2006); Rogers et al. (1997) verfolgen die Idee, dass eine von

NutzerInnen gewählte Route auch durch eine Minimierung der Heuristik zustande kommen sollte. Im Idealfall gilt formal also die Gleichung:

$$\arg \min_R (\text{Nutzerbewertung}(R)) = \arg \min_R (\text{Heuristik}(R))$$

Die datengetriebene Optimierung erfolgt dann anhand einer Heuristik, die konkrete Pfadelemente gut bewertet, die von ProbandInnen gewählt worden sind. Die Heuristik kann dadurch aber nur in Bereichen herangezogen werden, in denen bereits von NutzerInnen favorisierte Routen gesammelt worden sind.

Ein Ansatz, der ebenfalls auf von ProbandInnen favorisierte Routen zurückgreift, sich aber auch auf neue Gebiete übertragen lässt, da Kategorien von Pfadelementen gewichtet werden, wird in Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) verfolgt. Grundlage der datengetriebenen Optimierung bilde eine Sammlung von Fahrzeugrouten verschiedener ProbandInnen. Diese Daten seien mittels GPS aufgezeichnet worden, sodass eine manuelle Erhebung, wie sie für die Fußgängernavigation in Innenbereichen im Rahmen dieser Arbeit notwendig ist (siehe Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“), entfällt. Die Autoren schreiben, dass in kommerziellen Navigationssystemen zahlreiche Kriterien, wie beispielsweise Geschwindigkeitsbegrenzungen, Verkehrszahlen und Abbiegungsarten berücksichtigt würden und Pfadelemente bestimmter Kategorien deshalb, je nach Anbieter, mit unterschiedlichen positiven *Gewichtungsfaktoren* versehen seien. Generell würden sich diese *Gewichtungen* an die durchschnittlichen NutzerInnen des Navigationssystems richten. Zur Berücksichtigung persönlicher Präferenzen würden manche Navigationssysteme anbieten, bestimmte Teilmengen dieser *Gewichtungsfaktoren* durch dichotome Entscheidungen, wie beispielsweise „Autobahnen bevorzugen“, abzuändern. Die Autoren motivieren ihren datengetriebenen Ansatz dann, indem sie einerseits betonen, dass all diese *Gewichtungen* an persönliche Nutzerpräferenzen angepasst werden könnten, andererseits aber auf das Problem eingehen, dass es NutzerInnen überfordere, diese große Zahl an *Gewichten* sinnvoll zu justieren. Um diese Schwierigkeiten zu veranschaulichen, die auch in Zenker und Ludwig (2009b) referenziert worden sind, führen Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) als Beispiel auf, dass NutzerInnen die Relation ihrer Präferenzen, eine Kehrtwende zu vermeiden und eine Mautstraße zu umfahren, quantifizieren müssten. Anhand einer Analyse protokollierter Fahrten eines bestimmten Nutzers würden sich optimale *Gewichtungen* stattdessen automatisiert ermitteln lassen. Die Autoren schreiben, dass dieser Ansatz nach ihrem Kenntnisstand der erste sei, in dem verschiedene *Gewichtungen* zur Routenberechnung anhand von GPS-Verläufen erlernt werden. Neben dem grundsätzlichen Vorgehen liefert der Ansatz zahlreiche Aspekte, die sich auf die in dieser Arbeit angestrebte Präferenzadaption im Kontext der Fußgängernavigation übertragen lassen. So ermitteln die Autoren eine sinnvolle Anzahl für die gesammelten Routen des Referenzstandards. Aufgrund der aufwändigen Erhebung und Digitalisie-

rung solcher von NutzerInnen präferierter Routen bei der Fußgängernavigation wird auf diesen Aspekt speziell in Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“ eingegangen. Weiterhin definieren die Autoren eine Funktion zur Bemessung der Ähnlichkeit von berechneten Routen und von NutzerInnen bevorzugten Routen. Anhand der eingeführten Formalismen lässt sich dieser Zusammenhang wie folgt darstellen:

$$\text{Ähnlichkeit}(\arg \min_R (\text{Nutzerbewertung}(R)), \arg \min_R (\text{Heuristik}(R)))$$

Durch eine Minimierung dieser Ähnlichkeitsfunktion erfolge dann die Optimierung der in der Heuristik verwendeten *Gewichtungsfaktoren*. In Abschnitt 4.3 „Qualitätsmaß“ wird entsprechend eine solche Funktion zum Vergleich von Fußwegrouten definiert, dabei wird der von Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) verfolgte Ansatz genauer beschrieben und dessen Übertragbarkeit diskutiert. Die Suche eines Minimums des Ähnlichkeitsmaßes bzw. des Qualitätsmaßes der Heuristik erfolge laut der Autoren dann durch Koordinatenabstieg. Detaillierter wird hierauf im Zuge der Beschreibung eines ähnlichen Verfahrens in Abschnitt 4.4 „Optimierung“ eingegangen. Zuletzt lässt sich die Evaluation des Verfahrens auf die vorliegende Arbeit übertragen. Anhand eines Kreuzvalidierungsverfahrens zeigen die Autoren, dass generierte Routen zu einer höheren Übereinstimmung mit von NutzerInnen gewählten Routen führen. Dabei werden die optimierten Routen nicht mit den kürzesten oder schnellsten, sondern mit den Routen des Kartendienstes „Bing Maps“ verglichen. Das in Unterabschnitt 4.5.1 „Evaluation“ beschriebene Evaluationsverfahren lehnt sich grundsätzlich an den beschriebenen Ansatz an. In Ermangelung einer alternativen Ausgangslage werden die durch das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Verfahren optimierten Routen jedoch mit den kürzesten Pfaden verglichen. Weiterhin wird aufgrund der höheren Laufzeit der in dieser Arbeit beschriebenen Optimierung anstelle einer Kreuzvalidierung eine feste Aufteilung der von NutzerInnen gesammelten Routen in eine Trainings und eine Testmenge vorgenommen. Diese Performanzunterschiede lassen sich einerseits mit dem von Delling, Goldberg, Pajor und Werneck (2015) entwickelten Pfadsuchalgorithmus „Customizable Route Planning (CRP)“ begründen. Bei der Abfrage einer einzelnen Route führt das in Abschnitt 3.3 „Pfadplanung“ beschriebene Verfahren zu keiner merklichen Wartezeit. Aufgrund der hohen Zahl nötiger Routenabfragen während der Gewichtungsoptimierung könnte die Laufzeit durch einen verbesserten Suchalgorithmus allerdings erheblich verkürzt werden. Zusätzlich steigern Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) die Performanz ihrer Optimierung durch eine Heuristik zur Ähnlichkeitsbewertung generierter Routen. Diese Laufzeitverbesserungen werden insbesondere relevant, wenn nicht nur ein einzelner *Gewichtungsvektor* für den durchschnittlichen Nutzer berechnet werden soll, sondern wenn viele unterschiedliche *Gewichtungsvektoren* anhand von Sammlungen gewählter Pfade jeweils einzelner

NutzerInnen trainiert werden. Die Autoren zeigen insbesondere die Eignung ihres Ansatzes zu einer solchen individuellen Anpassung auf. Vergleichbar dazu lässt sich auch das hier erarbeitete Verfahren auf verschiedene Nutzergruppen und einzelne NutzerInnen übertragen. Bis zum Vorhandensein der bereits erwähnten Positionierung in Innenbereichen, wie sie in Hinblick auf das in Kapitel 2 „Modellierung der Umgebung“ spezifizierte Umgebungsmodell durch Jackermeier und Ludwig (2018a, 2018b) verfolgt wird, verbleiben Anpassungen an individuelle Personen sowie die genannten Laufzeitverbesserungen jedoch als Inhalt möglicher zukünftiger Forschungsarbeiten.

3.1.6 Fazit

In Abschnitt 3.1 „Forschungsstand“ ist zunächst aufgezeigt worden, dass sich von FahrerInnen und FußgängerInnen bevorzugte Routen im Allgemeinen nicht durch Ermittlung kürzester oder schnellster Pfade vorhersagen lassen (Armeni & Chorianopoulos, 2013; Dalton, 2003; R. Golledge & Gärling, 2002; R. G. Golledge, 1995; Hölscher et al., 2011; Jan et al., 2000; Papinski & Scott, 2011; Turner, 2009; Zhu & Levinson, 2015). Jedoch gibt es Hinweise, dass NutzerInnen bei der Wahl einer bestimmten Route nicht immer die für sie optimale Entscheidung treffen (R. Golledge & Gärling, 2002; Hölscher et al., 2011; Sadalla & Staplin, 1980). Kriterien, die durch Analyse protokollierter Pfade gewonnen werden, führen bei Pfadplanungsalgorithmen zur Nutzung in Navigationssystemen deshalb möglicherweise nicht zu Routen, die Nutzerbedürfnisse möglichst gut erfüllen. Dennoch wird in zahlreichen Arbeiten betont, dass auch bei der Implementierung von Navigationssystemen neben Weglänge und Zeitkosten weitere Kriterien berücksichtigt werden sollten, wie die im Folgenden zusammenfassende Auflistung zeigt. Dabei kann es in Abhängigkeit spezifischer Nutzergruppen sowie individueller NutzerInnen zu unterschiedlich ausgeprägten Anforderungen und Präferenzen kommen (Delling, Goldberg, Goldszmidt et al., 2015; Julia Letchner, John Krumm, 2006; Krisp & Keler, 2015; Patel et al., 2006; Rogers et al., 1997). Ein verbreiteter Ansatz, der auch in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen wird, ist es, Pfadelemente verschieden zu gewichten, um dann eine kostenminimierende Route zu planen (Caduff & Timpf, 2005a, 2005b; Da Silva et al., 2008; Duckham & Kulik, 2003; Grum, 2005; Haque et al., 2007; Heye & Timpf, 2003; Jiang & Liu, 2011; Julia Letchner, John Krumm, 2006; Karimi & Ghafourian, 2010; Keler & Mazimpaka, 2016; Krisp & Keler, 2015; Lyardet et al., 2008; Patel et al., 2006; Petrie et al., 1996; Richter & Duckham, 2008; Vanclooster et al., 2013, 2014). Dabei lassen sich, in Abhängigkeit des durch die Umgebung, das Umgebungsmodell und die angesprochene Zielgruppe gegebenen Kontextes, jedoch viele unterschiedliche Kriterien betrachten, wie Tabelle 3.1 exemplarisch veranschaulicht.

3. Präferenzbasierte Pfadplanung

komplexe Abbiegungen

Duckham und Kulik (2003); Grum (2005); Krisp und Keler (2015); Vanclooster et al. (2013, 2014)

szenisch reizvoll

Agrawal et al. (2008); Da Silva et al. (2008); R. G. Golledge (1995); Malaka und Zipf (2000); Quercia et al. (2014)

Landmarken

Caduff und Timpf (2005a, 2005b); Hölscher et al. (2011); Kikiras et al. (2006); Turner (2009)

unsicherer Pfade

Agrawal et al. (2008); Keler und Mazimpaka (2016); Malaka und Zipf (2000); Petrie et al. (1996)

minimale Zahl an Abbiegungen

R. G. Golledge (1995); Hölscher et al. (2011); Sadalla und Staplin (1980)

dem Nutzer bereits bekannte Pfade

Baus et al. (2002); Chang et al. (2011); Patel et al. (2006)

von NutzerInnen oder einem individuellen Nutzer bevorzugte Pfade

Julia Letchner, John Krumm (2006); Kikiras et al. (2006)

ruhig

Malaka und Zipf (2000); Quercia et al. (2014)

Winkel zum Ziel

Dalton (2003); Turner (2009)

Vorhandensein/Vermeidung bestimmter Abschnitte (z.B. Treppen)

Kikiras et al. (2006)

doppeldeutige Anweisungen

Haque et al. (2007)

komplexe Anweisungen

Richter und Duckham (2008)

Änderung des Straßennamens

Jiang und Liu (2011)

kürzester/längster Abschnitt zu Beginn der Route

R. G. Golledge (1995)

Tabelle 3.1: Kriterien aus vorgestellten Arbeiten, die Einfluss auf Nutzerentscheidungen bei der Wahl einer Route nehmen können.

Durch diese Palette unterschiedlicher Einflussfaktoren wird die Forschungsfrage aufgeworfen, welche quantitative Gewichtung der jeweiligen Kriterien bei der Pfadsuche zu einem optimalen Kompromiss verschiedener Gesichtspunkte führt. Julia Letchner, John Krumm (2006); Patel et al. (2006); Rogers et al. (1997) umgehen diese Schwierigkeit durch datengetriebene Ansätze, bei denen statt Pfadkategorien konkrete, unikale Pfadelemente verschieden gewichtet werden. Statt „unsichere Straßen“ zu vermeiden, wird also beispielsweise die Information genutzt, dass Nutzer „Kowalski“ gerne durch die „Kupfergasse“ fährt. Ein Nachteil dieser Vorgehensweisen ist jedoch, dass sich die gewonnenen Erkenntnisse nicht auf neue, für die NutzerInnen unbekannte Umgebungen übertragen lassen. In Unterabschnitt 3.1.5 „Datengetriebene Ansätze“ wird deshalb die Arbeit von Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) vorgestellt, in der *Gewichtungen* verschiedener Kriterien anhand von aufgezeichneten Fahrzeugrouten optimiert werden.

Insgesamt zeigt sich durch die einschlägigen Forschungsarbeiten die allgemeine Notwendigkeit, das optimale Zusammenspiel verschiedener Pfadeigenschaften zu operationalisieren. Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ zeigt einen möglichen Ansatz für eine datengetriebene Ermittlung optimaler Verhältnisse von Kriterienausprägungen im Kontext von Fußwegrouten durch Innen- und Außenbereiche auf. Anhand einer empirischen Datengrundlage werden dort, ähnlich zu dem von Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) aufgezeigten Verfahren, *Gewichtungsfaktoren* zur Generierung von Fußgänger routen anhand des in Kapitel 2 „Modellierung der Umgebung“ spezifizierten Modells ermittelt.

3.2 Nutzerstudien

Um Routen im Rahmen der vorgestellten Arbeit an Nutzerpräferenzen anpassen zu können, ist es notwendig, Eigenschaften eines Pfades, die Einfluss auf Präferenzen nehmen, bei der Planung zu berücksichtigen. Hierfür soll eine Heuristik definiert werden, welche die Eignung einer potentiellen Route im Hinblick auf Präferenzen anhand solcher relevanter Eigenschaften bewertet. Der Erfolg eines datengetriebenen Verfahrens zur Optimierung der *Gewichtungen* der in der Heuristik herangezogenen Eigenschaften hängt deshalb von der grundsätzlichen Eignung dieser Merkmale ab. Abschnitt 3.1 „Forschungsstand“ zeigt auf, dass zur Anpassung von Routenverläufen an Nutzerbedürfnisse in einschlägigen Quellen zahlreiche unterschiedliche Kriterien herangezogen werden. Jedoch geht aus den vorgestellten Arbeiten nicht hervor, welche Merkmalsausprägungen insbesondere hoch mit der Befriedigung von Nutzerpräferenzen korrelieren. Es lässt sich nicht ableiten, welche Kriterien im Speziellen berücksichtigt werden können, um Fußwegrouten in Innen- und Außenbereichen besser an Nutzerbedürfnisse anzupassen und welche Kriterien hierfür voraussichtlich ungeeignet sind. Weiterhin muss beachtet werden, dass viele Kriteri-

en nicht direkt aus dem für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Kartenmaterial oder Architekturplänen abgeleitet werden können. So beinhaltet das in Abschnitt 2.3 „Spezifikation des Umgebungsmodells“ definierte Modell eine *Node*-Kategorie für Landmarken. Flächendeckend zu ermitteln, entlang welcher Pfade auffällige Landmarken existieren, ist aber mit großem Aufwand verbunden. Trotz der durch die Literatur begründbaren Eignung von Landmarken als Einflusskriterium werden diese deshalb beispielsweise im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht als Merkmal in Betracht gezogen.

Wie zu Beginn dieses Kapitels beschrieben worden ist, sollen durch die im Rahmen dieser Dissertationsschrift erarbeitete Pfadplanung Routen für Nutzer generiert werden, die ein einzelnes definiertes Ziel erreichen möchten. Algorithmisch werden deshalb aufsummierte Kosten verschieden gewichteter Pfadelemente minimiert. Wie in Abschnitt 3.1 „Forschungsstand“ aufgezeigt worden ist, handelt es sich dabei um einen verbreiteten Ansatz, der in Abschnitt 3.3 „Pfadplanung“ noch genauer beschrieben wird. Diese Vorgehensweise setzt allerdings eine positive Gewichtung aller Routenabschnitte voraus. Auch dadurch ergibt sich eine Einschränkung der Präferenzen, die durch den vorgestellten Ansatz berücksichtigt werden können, beispielsweise ist es so auf direktem Wege nicht möglich, Routen zu ermitteln, die möglichst lang durch unterschiedliche Bereiche verlaufen, was bei Spazierwegen möglicherweise sinnvoll sein könnte.

Um eine bessere Übersicht über mögliche Präferenzen in dem Szenario eines Gebäudekomplexes mit Außen- und Innenbereichen zu erhalten, werden Nutzerpräferenzen anhand einer Online-Befragung ermittelt. Die Resultate dieser Studie sind bereits in Ullmann (geb. Müller), Ohm, Schwappach und Ludwig (2016) veröffentlicht. Es wird dann diskutiert, inwieweit sich die ermittelten Präferenzen anhand positiver *Gewichte* berücksichtigen lassen, die sich aus der zur Verfügung stehenden Datengrundlage ableiten lassen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass der Erfolg des datengetriebenen Verfahrens nicht mangels geeigneter Kriterien ausbleibt. In Unterabschnitt 3.4.2 „Berücksichtigung verschiedener Merkmale“ wird detaillierter darauf eingegangen, welche Merkmale im Rahmen dieser Arbeit konkret herangezogen werden, welche weiteren Kriterien in möglichen zukünftigen Arbeiten hinzukommen könnten und welche Anforderungen sich dadurch ergeben würden.

Aufgrund der Möglichkeit, TeilnehmerInnen aus Nürnberg für die Studie mit Unterstützung des am Projekt *NADINE* beteiligten Verkehrsbetriebs zu akquirieren, wird der Nürnberger Hauptbahnhof den ProbandInnen als beispielhaftes Szenario eines Navigationssystems genannt. Mittels digitaler Anzeigetafeln sind Passagiere von Bussen und Straßenbahnen gebeten worden, die eingeblendete Internetadresse aufzurufen und an der Befragung teilzunehmen. Abbildung 3.1 zeigt ein Bildschirmfoto der erstellten Internetplattform. Die Anzahl möglicher Aspekte ist dabei nicht

auf drei beschränkt – beim Ausfüllen der Eingabezeilen werden dynamisch weitere Felder eingeblendet.

The screenshot shows a web-based survey interface. At the top left is the logo 'UR walking'. Below it is a navigation bar with links: Startseite, Umfragen, Kontakt, Registrieren, and Anmelden. The main content area begins with a heading: 'Vielen Dank für Ihr Interesse an der folgenden Umfrage der Universität Regensburg!'. It asks users about their preferences for navigating indoor buildings. A text input field is provided for users to list up to three criteria. A green button at the bottom right labeled 'Umfrage absenden' (Send survey) is visible. At the bottom of the page, there are copyright notices: '© 2012-2013 Universität Regensburg' and 'Impressum'.

Abbildung 3.1: Bildschirmfoto der erstellten Web-Umfrage zur Ermittlung möglicher Nutzerpräferenzen

Insgesamt sind anhand dieser Umfrage 75 Kriterien von 21 TeilnehmerInnen gesammelt worden. Dabei sind nicht alle Einträge verwertbar, da beispielsweise Wünsche zur Präsentation der Route in einem Navigationssystem enthalten sind. Tabelle 3.2 zeigt die gesammelten Aspekte, die händisch in verschiedene Kategorien eingeteilt worden sind. Die Ergebnisse der aufgezeigten Nutzerstudie spiegeln dabei mehrere Kriterien, die auch in den in Abschnitt 3.1 „Forschungsstand“ vorgestellten Arbeiten aufgeführt werden, wie beispielsweise die Vermeidung unsicherer oder die Bevorzugung szenisch reizvoller Pfade. Aufgrund der geringen Probandenzahl können die Umfrageresultate jedoch nicht als Rangliste verschiedener Einflussfaktoren betrachtet werden – die Quantifizierung einer solchen Beliebtheit unterschiedlicher Kriterien erfolgt in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“. Vielmehr wird die in Tabelle 3.1 auf Seite 82 dargestellte Liste an Einflusskriterien aus verschiedenen Forschungsarbeiten um Merkmale ergänzt, die insbesondere zu einer Verbesserung von Fußwegrouten durch Gebäudekomplexe beitragen können.

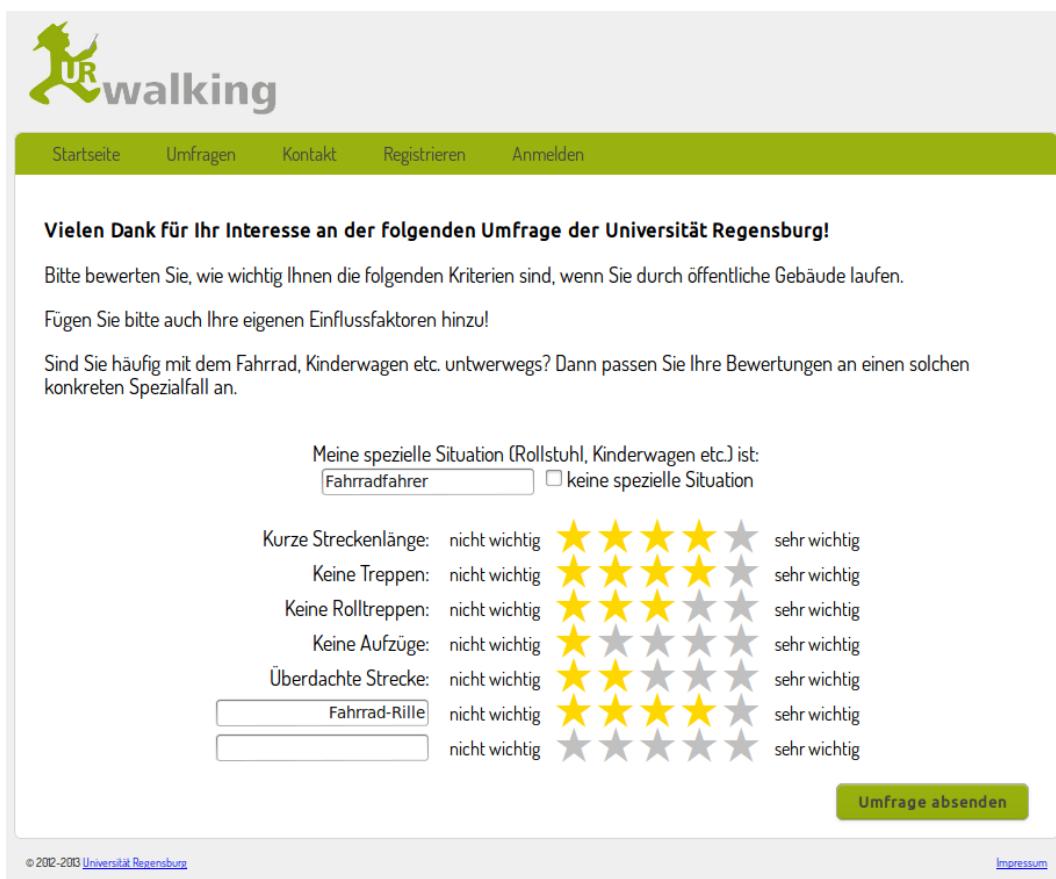
Wie bereits in Unterabschnitt 3.1.4 „Fußgängernavigation“ erörtert worden ist, lassen sich Präferenzen zur Bevorzugung bestimmter Pfadelemente meist durch eine Vermeidung von Abschnitten ohne die jeweiligen Elemente modellieren. Es liegt nahe, dass eine Person, die angibt, Treppen zu präferieren, eigentlich kein Interesse daran hat, auf einer Route möglichst häufig Treppen auf und ab zu laufen. Vielmehr

Kategorie	Anzahl der Nennungen
Vermeidung bestimmter Abschnitte	19
belebte Bereiche	4
unsichere Bereiche	4
Aufzüge	4
Rolltreppen	3
versperzte Bereiche (z.B. durch Baustellen)	3
Nichtraucher-Bereiche	1
kürzeste oder schnellste Route¹	16
Bevorzugung bestimmter Abschnitte	15
Rolltreppen	4
sichere Bereiche	3
Aufzüge	2
vor Regen geschützte Bereiche	2
schöne Umgebung	1
Außenbereiche	1
Korridore mit Fenstern (zur Orientierung)	1
Breite Korridore	1
Zwischenziele entlang der Route	5
Geeignet für spezielle Situationen	2
mit Fahrrad unterwegs	1
mit Gepäck unterwegs	1
einfache Routen	1

Tabelle 3.2: Ergebnisse des Onlinefragebogens

¹Da angenommen wird, dass den UmfrageteilnehmerInnen der formale Unterschied zwischen kürzester und schnellster Route nicht bekannt ist, werden diese beiden hier nicht separat aufgeführt.

ist mit der Formulierung wohl gemeint, dass Treppen lieber als Aufzüge genommen werden. Eine Vorliebe für Treppen kann also durch die Präferenz der Vermeidung von Aufzügen oder Rolltreppen ausgedrückt werden. Zahlreiche Aspekte, wie die Vermeidung oder Bevorzugung von Aufzügen, Rolltreppen oder Außenbereichen, können mittels eines Algorithmus zur Planung des kostenminimierendsten Pfades also direkt anhand des zugrundeliegenden Umgebungsmodells Berücksichtigung finden. Weiterhin hängt der Wunsch, unsichere Bereiche zu umgehen bzw. sichere Bereiche zu bevorzugen, möglicherweise mit Aspekten wie der Vermeidung von Unterführungen oder Straßenüberquerungen zusammen. Vergleichbar dazu könnte die Schönheit der Umgebung beispielsweise durch eine Vermeidung von Innenbereichen erhöht werden. Zusätzlich zu den von UmfrageteilnehmerInnen genannten Einflusskriterien, die direkt aus dem Umgebungsmodell abgeleitet werden können, lassen sich anhand der modellierten Datengrundlage also einige Merkmale berücksichtigen, die zumindest Einfluss auf latente Präferenzen wie die Schönheit der Umgebung nehmen.



The screenshot shows a web-based survey titled "UR walking". The header includes the logo and navigation links: Startseite, Umfragen, Kontakt, Registrieren, and Anmelden. The main content area starts with a thank you message: "Vielen Dank für Ihr Interesse an der folgenden Umfrage der Universität Regensburg!". It asks users to evaluate how important various criteria are when walking through public buildings. There is a note for users who often use a bicycle or stroller. A question asks about specific situations like rollstuhls, kinderwagen etc., with options for "Fahrradfahrer" and "keine spezielle Situation". Below this, a series of statements are rated on a scale from "nicht wichtig" (not important) to "sehr wichtig" (very important) using yellow stars. The statements are: Kurze Streckenlänge, Keine Treppen, Keine Rolltreppen, Keine Aufzüge, Überdachte Strecke, Fahrrad-Rille, and another unnamed statement. At the bottom right is a green "Umfrage absenden" button.

Abbildung 3.2: Bildschirmfoto der zweiten Web-Umfrage zur Bewertung von Einflussfaktoren

Aufbauend auf den Ergebnissen der Befragung soll in einer zweiten durch den Projektpartner beworbenen Online-Umfrage gezielter untersucht werden, ob sich

häufig genannte Aspekte, welche sich direkt aus den Umgebungsmodellen auslesen lassen, als Einflusskriterien bei der Pfadplanung eignen. Abbildung 3.2 auf der vorherigen Seite zeigt ein Bildschirmfoto der erstellten Internetseite. Es wird abgefragt, wie wichtig es den TeilnehmerInnen ist, die Streckenlänge zu minimieren, überdachte Strecken zu nehmen und weiterhin Treppen, Rolltreppen und Aufzüge zu vermeiden. Diese Kriterien können jeweils auf einer fünfstufigen Likert-Skala bewertet werden. Als Ergänzung der durch die erste Umfrage gesammelten Merkmalsliste können die ProbandInnen zusätzlich eigene Einflusskriterien hinzufügen und bewerten. Weiterhin ist es möglich, eine spezielle Situation zu nennen, in der man sich häufig befindet, welche Einfluss auf die Bewertung der Kriterien nimmt. Diesem Vorgehen liegt die Idee zugrunde, Cluster von NutzerInnen zu bilden, die gegebenenfalls gegensätzliche Präferenzen haben. Auf diesen Aspekt wird bei der Analyse der Daten aufgrund der erneut eher geringen Zahl von 30 TeilnehmerInnen allerdings nicht eingegangen. Insgesamt sind nur von zwei NutzerInnen spezielle Situationen genannt worden, ein Nutzer gab an, dass er im Rollstuhl sitze und ein weiterer bewertete die Kriterien im Hinblick auf zu tragendes Gepäck. Abbildung 3.3 stellt die Ergebnisse der durchgeföhrten Befragung dar. Zusätzlich sind als weite-

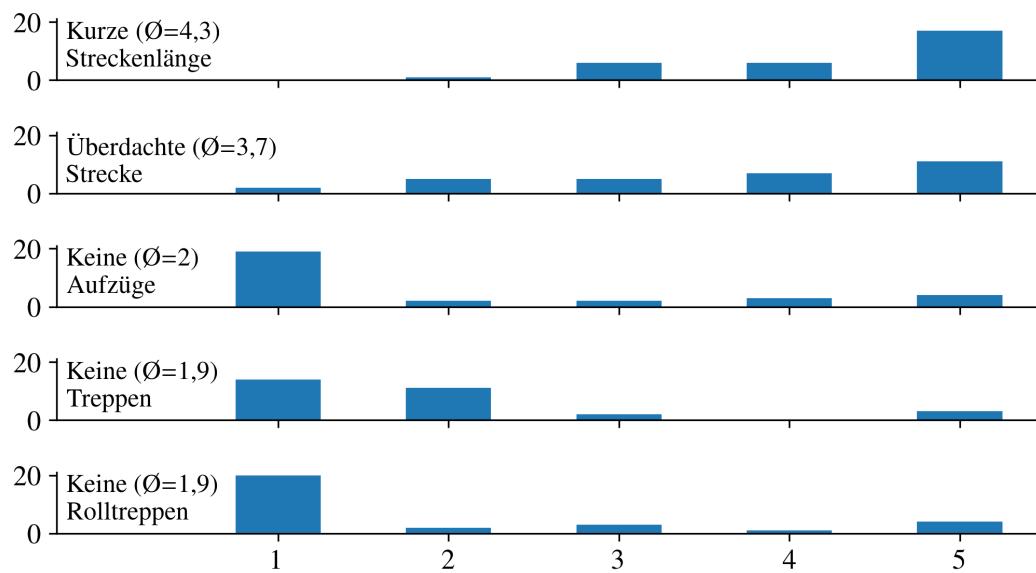


Abbildung 3.3: Ergebnisse der zweiten Nutzerbefragung

re Präferenzen genannt worden, dass Strecken ausreichend beschildert und dass Drehtüren sowie einsame Strecken vermieden werden sollten. Von zwei Personen wird aufgeführt, dass Kopfsteinpflaster umgangen werden sollte, jeweils mit den Begründungen, dass dieses für Stöckelschuhe und für Gepäck ungeeignet sei.

Auch die genannte Vermeidung von Drehtüren und Kopfsteinpflaster kann direkt aus dem Umgebungsmodell ausgelesen werden. Es liegt jedoch nahe, dass die Teil-

nehmerInnen der Umfrage bei der Eingabe zusätzlicher Kriterien durch die bereits aufgelisteten Pfadeigenschaften beeinflusst worden sind. Die angestrebte quantitative Analyse der Daten wird hier aufgrund der geringen Teilnehmerzahl nicht durchgeführt. Die beiden Nutzerstudien sollen zumindest qualitativ als Hinweis gesehen werden, dass die aus dem Umgebungsmodell ableitbaren Routeneigenschaften, wie enthaltene Treppen, Aufzüge, überdachte Wege oder Kopfsteinpflaster, Einfluss auf die Präferenzen von NutzerInnen haben können. Diese bei der Pfadplanung verschiedenen zu gewichteten, scheint deshalb ein erfolgversprechender Ansatz. Weiterhin kann die Bewertung der Kriterien „Keine Aufzüge“ (vier Nutzer), „Keine Treppen“ (drei Nutzer) und „Keine Rolltreppen“ (vier Nutzer) mit fünf Sternen, die jeweils stark vom Mittelwert abweicht, als Anzeichen gesehen werden, dass unterschiedliche NutzerInnen teils gegensätzliche Präferenzen haben. Dies bestätigt die Relevanz einer individuelleren Anpassung, für die sich Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015); Julia Letchner, John Krumm (2006); Krisp und Keler (2015); Patel et al. (2006); Rogers et al. (1997) aussprechen.

3.3 Pfadplanung

In diesem Abschnitt soll der Begriff der präferenzbasierten Pfadplanung innerhalb dieser Arbeit anhand des vorgestellten Forschungsumfeldes definiert werden. In Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ wird die hierfür spezifizierte Heuristik, die die Nutzerpräferenz, bestimmte Pfadelemente zu vermeiden, abbildet, formal dargestellt. In Unterabschnitt 3.3.2 „Hierarchische Pfadplanung“ wird auf einen hierarchischen Pfadplanungsalgorithmus eingegangen, der zunächst in Betracht gezogen, dann aber verworfen worden ist. Die dann umgesetzte Pfadplanung wird darauf folgend in Unterabschnitt 3.3.3 „Pfadplanung mit A*“ beschrieben. Abschließend skizziert Unterabschnitt 3.3.4 „Technische Umsetzung“ die als Client-Server-Architektur entwickelte Routenberechnung.

3.3.1 Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung

Wie in Abschnitt 3.1 „Forschungsstand“ aufzeigt worden ist, stellt die unterschiedliche Gewichtung verschiedener Pfadelemente einen verbreiteten Ansatz zur Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen bei der Pfadplanung dar, der in zahlreichen Arbeiten verfolgt wird. Routen können dann durch eine Minimierung der Pfadkosten ermittelt werden. Dieses grundsätzliche Vorgehen wird auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit umgesetzt. Die vorgestellten Arbeiten zeigen weiterhin viele unterschiedliche Kriterien auf, die durch dieses Vorgehen berücksichtigt werden können, um Routen an Nutzerbedürfnisse anzupassen. Die Erhebung der Merkmalsausprägungen ist jedoch häufig aufwändig, sodass viele potentiell Einfluss nehmenden Kriterien, wie die Schönheit von Wegen, nicht im Umgebungsmodell

hinterlegt worden sind. Die in Abschnitt 3.2 „Nutzerstudien“ vorgestellten Umfragen liefern Hinweise, dass durch die Vermeidung bestimmter Pfadelemente bereits eine bessere Anpassung von Pfadverläufen an Nutzerpräferenzen erfolgen kann, als dies bei kürzesten Routen der Fall ist. Als Kriterien zur Gewichtung von *Nodes*, *Edges* und *Leveledges* werden deshalb die in Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“ vorgestellten Kategorien herangezogen, die im spezifizierten Umgebungsmodell unterschieden werden. Anhand dieser soll das in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ vorgestellte Verfahren zur Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* trainiert und evaluiert werden. Diese *Faktoren* geben dann unter anderem Aufschluss auf den Einfluss der jeweiligen Kriterien. Beispielsweise ergibt sich bei der Optimierung ein relativ hoher *Faktor* für die Kategorie „Flurtür“, was darauf hindeutet, dass NutzerInnen diese Türen auf Ihren Routen eher vermeiden. Der vorgestellte Ansatz liefert dadurch weiterhin ein Werkzeug, um in zukünftigen Arbeiten die Eignung verschiedener Merkmale zur Routenanpassung zu evaluieren. Auf diesen Aspekt wird genauer in Unterabschnitt 4.5.2 „Interpretation“ eingegangen. Zusätzlich wird in Unterabschnitt 3.4.2 „Berücksichtigung verschiedener Merkmale“ auf weitere Kriterien, die gegebenenfalls aus dem spezifizierten Umgebungsmodell abgeleitet werden und die möglicherweise zu Verbesserungen der Routenanpassung beitragen könnten, eingegangen.

Gleichung 3.1 zeigt die Festlegung auf, dass Kosten, die ein auf einer Route liegender *Node* zu den Gesamtkosten einer Route beiträgt, durch einen konstanten *Faktor* bestimmt sind.

$$\text{Kosten}(\text{Node}) = s_{\text{Kategorie}(\text{Node})} \quad (3.1)$$

Es muss deshalb jeder möglichen Kategorie ein *Gewichtungsfaktor* s zugeordnet werden. Beispielsweise legt der *Faktor* $s_{\text{Flurtür}}$ die Kosten eines *Node* der Kategorie Flurtür fest. Da ein *Node* theoretisch gleichzeitig mehreren Kategorien zugeordnet werden kann, lässt sich die Kostenberechnung, wie in Gleichung 3.2 dargestellt, erweitern.

$$\text{Kosten}(\text{Node}) = \sum_{k \in \text{Kategorien}(\text{Node})} s_k \quad (3.2)$$

Eine solche mehrfache Zuordnung wird im implementierten Pfadplaneralgorithmus zwar technisch ermöglicht, ist bei der Modellierung der Universität Regensburg aber bisher nicht vorgenommen worden. So erlaubt die in Abschnitt 2.5 „Modellierungsapplikation“ vorgestellte Plattform aktuell nur die Zuordnung zu jeweils einer Kategorie. Der in Abschnitt 3.2 „Nutzerstudien“ und Unterabschnitt 3.1.4 „Fußgängernavigation“ beschriebenen Idee folgend, dass bestimmte Pfadelemente nie bevorzugt, sondern immer vermieden werden, handelt es sich bei der festgelegten Gewichtungsvorschrift um eine simple Heuristik zur Operationalisierung der Nutzerpräferenz, bestimmte Pfadelemente zu umgehen. Die *Faktoren* s müssen deshalb so gewählt werden, dass gilt: $s \geq 0$. Bei Übergängen zwischen verschiedenen

Bereichen, die durch zwei *Nodes* der Kategorie „Verknüpfungspunkt“ (siehe Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“) verbunden sind, muss zusätzlich beachtet werden, dass diesen prinzipiell unterschiedliche globale Koordinaten zugeordnet sein können. Zwar zeigt Abbildung 2.6 auf Seite 56, dass durch die entwickelte Modellierungsplattform versucht worden ist, solche Versatzstücke zu verhindern, falls es bei einem Paar solcher Verknüpfungs-*Nodes* aber dennoch zu einer räumlichen Abweichung kommt, wird dieser Abstand zu den Kosten hinzugezählt. Dadurch wird sichergestellt, dass durch die Luftlinie als Restkosten-Heuristik keine Pfadkosten überschätzt werden, was eine notwendige Bedingung für den verwendeten A*-Algorithmus darstellt.

Die durch eine *Edge* verursachten Kosten werden durch einen konstanten *Faktor* t und durch einen *Faktor* u , der in linearer Abhängigkeit zur Länge der *Edge* skaliert, berechnet, wie in Gleichung 3.3 dargestellt.

Eine Schwachstelle dieses Ansatzes ist, dass der konstante *Faktor* t mehrmals in die Kostenberechnung einfließt, wenn *Edges* derselben Kategorie direkt aufeinander folgen. Bei Straßenüberquerungen, die durch eine einzelne *Edge* modelliert werden, hat dies keine weiteren Auswirkungen. Allerdings ergibt sich die Anzahl einzelner *Edges*, die zum Modellieren eines längeren Weges verwendet werden, zu einem gewissem Maße willkürlich. Es wäre deshalb sinnvoller, den *Faktor* t bei Verketten von *Edges* gleicher Kategorie nur ein einziges Mal zu zählen, um so von der umgebungsunabhängigen Modellierung zu abstrahieren. Dieses Problem ist im Rahmen dieser Arbeit allerdings erst nach der Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* bemerkt worden und muss deshalb als eine mögliche Modifikation des verfolgten Verfahrens verbleiben.

$$\begin{aligned} \text{Kosten}(\text{Edge}) = & t_{\text{Kategorie}(\text{Edge})} \\ & + u_{\text{Kategorie}(\text{Edge})} * \text{Länge}(\text{Edge}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Gleichung 3.4 zeigt, wie mehrere Kategorien, denen eine *Edge* zugeordnet ist, bei der Pfadplanung berücksichtigt werden können.

$$\begin{aligned} \text{Kosten}(\text{Edge}) = & \sum_{k \in \text{Kategorien}(\text{Edge})} t_k \\ & + \prod_{k \in \text{Kategorien}(\text{Edge})} u_k * \text{Länge}(\text{Edge}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Erneut gilt für die *Gewichtungsfaktoren* $t \geq 0$, sodass es zu keinen negativen Pfadkosten kommen kann. Um die Luftlinie als optimistische Heuristik in einem A*-Algorithmus verwenden zu können, müssen die Kosten einer *Edge* mindestens ihrer Länge entsprechen. Es wird deshalb weiterhin festgelegt, dass für die *Gewichtungsfaktoren* u gilt: $u \geq 1$. Da die minimale Gewichtung von s und t bei 0, dem neutralen Element bezüglich der Addition, liegt, werden die konstanten *Gewichtungsfaktoren*

in den Gleichungen 3.2 und 3.4 aufaddiert. Ein *Node*, der beispielsweise zwei jeweils kostenneutral gewichteten Kategorien angehört, erhält somit auch in Summe die Kosten 0. Im Gegensatz dazu liegt die minimale Gewichtung der *Faktoren u* bei 1, dem neutralen Element bezüglich der Multiplikation. Zur Kostenberechnung einer *Edge*, die mehreren Kategorien angehört, werden die *Gewichtungsfaktoren* deshalb in den Gleichungen 3.1 und 3.3 miteinander multipliziert, sodass beispielsweise eine *Edge*, die zwei minimal gewichteten semantischen Kategorien angehört, insgesamt nur mit ihrer Länge in die Kostenberechnung einfließt. Mit dieser linear von der Länge einer *Edge* abhängenden Heuristik lassen sich verschiedene denkbare Präferenzen ausdrücken. Beispielsweise ist vorstellbar, dass RollstuhlfahrerInnen kurze Wege über Pflastersteine zwar in Kauf nehmen, generell aber ebene Wege bevorzugen. In diesem Fall scheint intuitiv ein niedriger Wert für den *Faktor t_{Kopfsteinpflaster}* und ein höherer Wert für den *Faktor u_{Kopfsteinpflaster}* sinnvoll. Bei der Überquerung einer Ampelkreuzung lässt sich dagegen durch einen höheren Wert für den *Faktor t* eine Wartezeit an der Ampel abbilden, die unabhängig von der Länge des Weges über die Straße ist.

Die Berechnung der Kosten von *Leveledges*, welche im Umgebungsmodell Übergänge zwischen verschiedenen Etagen repräsentieren, erfolgt durch die in Gleichung 3.5 dargestellte Heuristik.

$$\begin{aligned} \text{Kosten(Leveledge)} = & v_{\text{Kategorie(Leveledge)}} \\ & + w_{\text{Kategorie(Leveledge)}} * \text{Etagenzahl(Leveledge)} \\ & + \text{Versatz(Leveledge)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Da die genaue Ausdehnung von Treppen nicht anhand der zur Modellierung verwendeten Architekturpläne ermittelt werden kann, fließt zur Gewichtung von *Leveledges* anstatt der Länge die Anzahl von zu überwindenden Stockwerken mit in die Bewertung ein. Die Kosten einer Treppe, die vom Erdgeschoss in die fünfte Etage führt, berechnen sich also beispielsweise mit $v_{\text{Treppe}} + 5 * w_{\text{Treppe}} + \text{Versatz}$. Zwar werden die unterschiedlichen Höhenlagen verschiedener Stockwerke in der Restkosten-Heuristik des Pfadalgorithmus vernachlässigt, jedoch kommt es in den Modellen häufig vor, dass beispielsweise das Treppenhaus in der zweiten Etage andere globale Koordinaten aufweist als das im Erdgeschoss verzeichnete Treppenhaus. Dieser räumliche Versatz muss auf die Kosten addiert werden, um sicherzustellen, dass die Luftlinie als Restkosten-Heuristik genutzt werden kann, die reale Kosten nie überschätzt. Erneut

könnte die Kostenfunktion erweitert werden, sodass *Leveledges* zugleich mehreren Kategorien angehören können, wie Gleichung 3.6 zeigt.

$$\begin{aligned} \text{Kosten(Leveledge)} = & \sum_{k \in \text{Kategorien(Leveledge)}} v_k \\ & + \sum_{k \in \text{Kategorien(Leveledge)}} w_k * \text{Etagenzahl(Leveledge)} \\ & + \text{Versatz(Leveledge)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Da im semantischen Modell nur die Kategorien Treppe, Aufzug und Rolltreppe unterschieden werden, aus denen keine sinnvoll erscheinenden Mischformen gebildet werden können, wird diese erweiterte Heuristik in der Implementierung des Pfadsuchalgorithmus nicht umgesetzt, lediglich die erstgenannte Berechnung der Kosten von *Leveledges* kommt aktuell zum Einsatz. Die Idee dieser linear von der Etagenzahl abhängigen Heuristik lässt sich erneut mit einigen exemplarischen Szenarien veranschaulichen. So kann beispielsweise die durchschnittliche Länge von Treppen Einfluss auf die Ausprägung des *Faktors* w_{Treppe} nehmen. Im Gegensatz dazu ist bei der Nutzung eines Aufzugs eine gewisse Wartezeit unabhängig von der zu überwindenden Etagenzahl notwendig. Diese könnte durch einen höheren Wert des *Faktors* v_{Aufzug} abgebildet werden.

Es soll an dieser Stelle betont werden, dass es sich bei den Kostenfunktionen, die linear von der Pfadlänge oder von der Anzahl der Stockwerke abhängen, um eine getroffene Spezifikation handelt, die den Umfang der Arbeit begrenzt. Diese Heuristik ist gewählt worden, da sich die aufgezeigten Szenarien mit nur zwei zu optimierenden *Gewichtungsfaktoren* pro Kategorie der Pfadelemente abbilden lassen. Prinzipiell sind jedoch weit kompliziertere Heuristiken möglich, auf diese Limitierung wird deshalb in Unterabschnitt 3.4.3 „Separierbarkeit der Routenelemente“ eingegangen.

Die definierte Heuristik hängt insgesamt von den *Gewichtungsfaktoren* s, t, u, v und w ab. Dabei können 20 verschiedene *Gewichtungsfaktoren* s unterschieden werden, die sich anhand der *Node*-Kategorien, die in Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“ spezifiziert worden sind, ergeben. t und u können für 16 *Edge*-Kategorien separat gewichtet werden. Weiterhin existieren drei *Leveledge*-Kategorien, die in jeweils drei *Gewichtungsfaktoren* v und w resultieren. Ziel des in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ vorgestellten Verfahrens ist es, diese *Gewichtungsfaktoren* zu optimieren, sodass eine Routensuche, welche die durch die *Faktoren* entstehenden Kosten minimiert, zu Pfaden führt, die den von NutzerInnen präferierten Pfaden möglichst ähnlich sind. Konkret wird dabei jedoch nur eine Teilmenge aller *Gewichtungsfaktoren* in Betracht gezogen, wie in Abschnitt 4.4 „Optimierung“ genauer beschrieben wird.

3.3.2 Hierarchische Pfadplanung

Im Rahmen des Projektes *NADINE* hat es zunächst, wie in Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“ beschrieben, keine Möglichkeit gegeben, das Kartenmaterial der U-Bahnhöfe in einem globalen Koordinatensystem zu verorten. Es ist dadurch nicht möglich gewesen, Abstände zwischen Umgebungsmodellen mit jeweils unterschiedlichen lokalen Koordinatensystemen zu quantifizieren. Die Luftlinie hat sich bei der Pfadsuche somit nicht als Restkosten-Heuristik nutzen lassen – es ist deshalb im ersten verfolgten Ansatz kein A*-Algorithmus implementiert worden. Stattdessen ist versucht worden, die Performanz bei der Pfadplanung durch einen hierarchischen Ansatz zu verbessern. Hierarchische Verfahren werden beispielsweise von S. Yang und Mackworth (2007) im Hinblick auf die Navigation von RollstuhlfahrerInnen evaluiert. Die grundlegende Idee der hierarchischen Pfadplanung ist, die Umgebung in Bereiche aufzuteilen, die auf einer oder mehreren höheren Hierarchieebenen miteinander verbunden werden. Beginnend mit der höchsten Hierarchieebene werden die vorab ermittelten oder abgeschätzten Kosten der niedrigeren Hierarchieebene dann als Heuristik bei der Pfadplanung herangezogen. Abschließend können die detaillierten Pfadverläufe durch die Bereiche der darunterliegenden Hierarchieebenen unabhängig voneinander ermittelt werden. Ein beispielweise in S. Yang und Mackworth (2007) beschriebenes Problem hierbei ist, dass die tatsächlichen Kosten durch einen Bereich die zuvor herangezogene Heuristik übersteigen können. Es sei dann möglich, dass ein kürzerer bzw. kostengünstigerer Pfad existiere, der durch einen anderen Bereich verläuft, der aufgrund der Heuristik bei der Pfadplanung aber nicht in Betracht gezogen worden sei. Von der Pfadplanung ausgeschlossen werden könnten somit nur Wege durch Bereiche, deren minimale Kosten die maximal möglichen Kosten eines anderen Pfades übersteigen würden. Die Autoren berechnen deshalb vorab die minimalen und maximalen Kosten durch die jeweiligen aufgeteilten Bereiche.

Zur Implementierung einer hierarchischen Pfadsuche im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Pfadkosten durch die in Unterabschnitt 2.3.1 „Hierarchische Aufteilung“ definierten Bereiche, welche in separaten XML-Dateien gespeichert sind, vorab berechnet. Die Aufteilung in Stockwerke wird dabei nicht berücksichtigt, da kostenminimierende Pfade durch Gebäude hindurch im Regelfall komplett innerhalb des Erdgeschosses liegen. Es werden somit nur zwei Hierarchieebenen voneinander unterschieden. Da die Gewichtung der verschiedenen Pfadelemente erst zu einem späteren Zeitpunkt optimiert wird, muss zunächst eine Pfadsuche mit beliebig hohen *Node-* und *Edge-Kosten* ermöglicht werden. Demnach kann keine obere Schranke der aufsummierten Kosten durch einen Bereich ermittelt werden. Für jeweils jedes Paar aus Zugängen in einen Bereich werden deshalb nur die minimalen Kosten berechnet und gespeichert. Abbildung 3.4 zeigt anhand eines einfachen konstruierten Beispiels einen sich so ergebenden Graphen auf höchster Hierarchieebene.

Die violetten *Edges* repräsentieren Übergänge von Bereichen, welche, beispielsweise durch Türen, direkt miteinander verbunden sind. Die minimalen berechneten Pfadkosten durch einen Bereich werden in der Abbildung durch blaue Kanten visualisiert. Da beispielsweise vier Zugänge in den unter der Datei „1.xml“ abgespeicherten Bereich führen, ergeben sich durch paarweise Berechnung kürzester Pfade sechs jeweils mit den minimalen Kosten beschriftete *Edges*. Zur Ermittlung eines Pfades

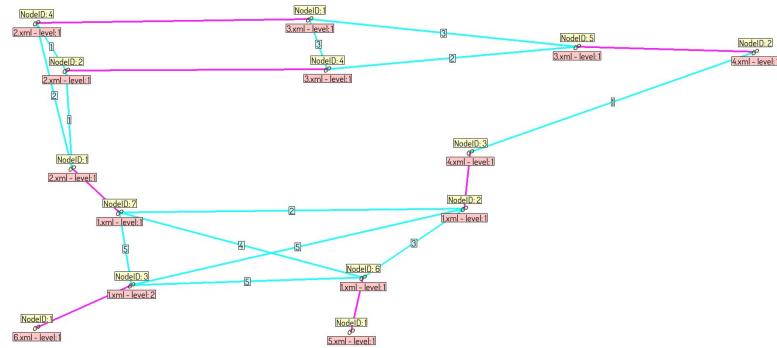


Abbildung 3.4: Minimale Kosten durch Bereiche werden vorab berechnet.

werden vorab die Kosten des Start- und Zielpunktes zu den Zugängen des Gebäudes, in denen diese jeweils liegen, berechnet.

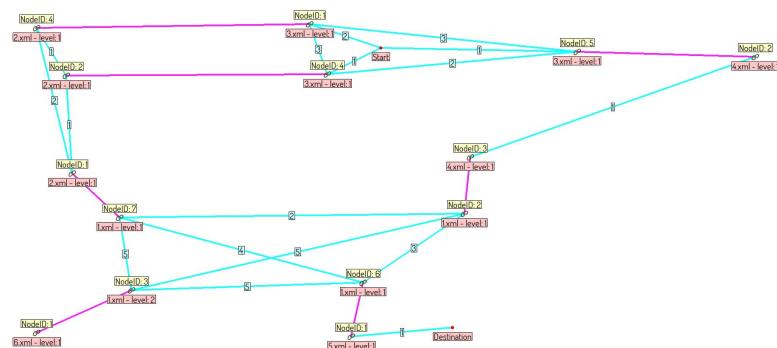


Abbildung 3.5: Für die Routensuche werden zunächst Kosten von Start- und Zielpunkt zu den Gebäudezugängen berechnet.

Alle potentiell möglichen Pfade werden dann auf der höheren dargestellten Hierarchieebene mittels eines Dijkstra-Algorithmus berechnet, der Pfad mit den geringsten Kosten wird ausgewählt. Darauf folgend wird der detaillierte Pfadverlauf durch die auf der gewählten Route liegenden Teilbereiche niedrigerer Hierarchieebene ermittelt. Minimalen Kosten werden dann durch die so berechneten tatsächlichen Kosten,

welche sich aufgrund festgelegter Präferenzen ergeben, korrigiert. Sofern berechnete tatsächliche Kosten durch einen Bereich nach wie vor geringer sind als die Kosten aller alternativen Pfade, kann darauf verzichtet werden, genaue Pfadverläufe durch weitere Bereiche zu berechnen, wie es beispielsweise bei einer reinen Suche mit dem Dijkstra-Algorithmus notwendig wäre. Es ist zunächst angenommen worden, dass die Performanz gegenüber einer Pfadsuche mittels des Dijkstra-Algorithmus aufgrund dieser Einsparungen gesteigert werden könnte. Es hat sich jedoch gezeigt, dass lediglich die Suche nach kürzesten Pfaden, bei denen die vorab berechneten minimalen Kosten nie korrigiert werden müssen, von dem beschriebenen Verfahren profitiert. Schon bei relativ kleinen Änderungen der Präferenzen, wie beispielsweise einer Erhöhung der Kosten für Flurtüren, kommt es zu Korrekturen der minimalen Pfadkosten, die es notwendig machen, nacheinander alle alternativen Pfade im Detail zu ermitteln.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist dieses Verfahren deshalb verworfen worden. Aufgrund der beschriebenen Zurverfügungstellung von Verortungspunkten im Verlauf des Projektes *NADINE* ist es möglich geworden, Distanzen zwischen Punkten zu berechnen und als Heuristik heranzuziehen. Als Alternative zur hierarchischen Pfadsuche wird deshalb ein einfacher A*-Algorithmus verwendet, auf den im folgenden Unterabschnitt kurz eingegangen wird.

3.3.3 Pfadplanung mit A*

Im praktischen Einsatz des Navigationssystems an der Universität Regensburg zeigt sich, dass eine Pfadsuche mit dem A*-Algorithmus (Hart et al., 1968) zu keinen merklichen Verzögerungen führt. Dies gilt selbst im ungünstigsten Fall, wenn die Heuristik aufgrund festgelegter Präferenzen stark von den tatsächlichen Kosten abweicht, sodass der Graph in alle Richtungen, wie bei einer Suche mittels des Dijkstra-Algorithmus, expandiert werden muss. Aufgrund der Verfügbarkeit globaler geographischer Koordinaten wird die Luftlinie als monotone Heuristik verwendet, Höhenunterschiede werden dabei vernachlässigt. Da dieser Ansatz nicht beliebig skaliert, dessen Performanz also nicht geeignet ist, um Routen in größeren Umgebungsmodellen zu berechnen, wird auf diese Limitierung in Unterabschnitt 3.4.4 „Skalierbarkeit der Pfadplanung“ eingegangen.

3.3.4 Technische Umsetzung

Für das entwickelte Navigationssystem ist eine Client-Server-Architektur umgesetzt worden. Verschiedene Client-Applikationen können Routenanfragen an den Server-Rechner stellen, dieser berechnet eine konkrete Route unter Berücksichtigung gegebener Präferenzen und liefert das Ergebnis im JSON-Format (Crockford, 2006) an den Client zurück. Der anfragende Client bringt die Route dann zur Anzeige

und unterstützt so die NutzerInnen bei der Navigation. Neben dem Routenverlauf können weitere Anfragen an den Server-Rechner gestellt werden. So lassen sich beispielsweise alle potentiellen Start- und Zielorte abfragen, aus denen ein Nutzer dann wählen kann.

Jeweils konkrete Ausprägungen der in Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ definierten *Gewichtungsfaktoren* werden am Server verschiedenen Profilen zugeordnet. Dadurch wird spezifiziert, welche allgemeinen *Gewichtungen* verwendet werden, wenn ein Nutzer keine zusätzlichen Auskünfte über seine Präferenzen gibt. Zusätzlich werden *Gewichtungen* für verschiedene Nutzergruppen festgelegt, wie beispielsweise „barrierefrei“ oder „es regnet“, die sich im Navigationssystem dann auswählen lassen. Die den Nutzerprofilen zugeordneten *Gewichtungsfaktoren* werden am Server-Rechner in einer XML-Datei hinterlegt. Im Anhang unter A.2 findet sich eine beispielhafte Spezifikation. Diese Liste wird vom Pfadplanungs-Server eingelesen, die Profile können von den Client-Applikationen dann abgefragt werden. Weiterhin ist es möglich, neue Präferenzen über HTTP-Post Anfragen an den Server zu senden, um Präferenzen dynamisch zu ändern, ohne das Umgebungsmodell neu einzulesen. Auf diese Weise werden zur Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* (siehe Abschnitt 4.4 „Optimierung“) schnell Pfade mit unterschiedlichen Präferenzen berechnet.

3.4 Limitationen der präferenzbasierten Pfadplanung

In diesem Abschnitt soll der Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgezeigt werden, indem Limitationen der spezifizierten präferenzbasierten Pfadplanung zusammengefasst und mögliche Erweiterungen dargestellt werden. Hierzu wird in Unterabschnitt 3.4.1 „Berücksichtigung individueller Präferenzen“ auf den in dieser Arbeit verfolgten Ansatz der *Gewichtungsoptimierung* im Hinblick auf allgemeine Nutzerpräferenzen, im Unterschied zu individuellen, eingegangen. In Unterabschnitt 3.4.2 „Berücksichtigung verschiedener Merkmale“ wird auf weitere Kriterien eingegangen, die zusätzlich verwendet werden könnten, um eine bessere Anpassung der Routen an Nutzerpräferenzen zu gewährleisten. So werden aktuell neben der Streckenlänge nur Kategorien berücksichtigt, die in Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“ spezifiziert worden sind. Weitere Pfadeigenschaften könnten jedoch leicht abgeleitet werden. Weiterhin wird eine mögliche Modifikation des Pfadplanungsalgorithmus dargelegt, die zur Berücksichtigung bestimmter Komplexitätsheuristiken von Abbiegungen nötig wäre. Die sich durch eine lineare Kostenheuristik zur Pfadplanung ergebende Limitation wird in Unterabschnitt 3.4.3 „Separierbarkeit der Routenelemente“ diskutiert, abschließend wird in Unterabschnitt 3.4.4 „Skalierbarkeit der Pfadplanung“ kurz auf eine mögliche Alternative zu dem verwendeten A*-Algorithmus eingegangen.

3.4.1 Berücksichtigung individueller Präferenzen

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine präferenzbasierte Pfadplanung ermöglicht, indem die in Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ festgelegten *Gewichtungsfaktoren* so optimiert werden, dass berechnete Pfade den von NutzerInnen präferierten Routen möglichst ähnlich werden. Die Optimierung der *Gewichtungen* hängt somit von der getroffenen Auswahl der von NutzerInnen präferierten Routen ab. Eine solche Sammlung wird in Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“ erstellt. Um den Umfang der vorliegenden Arbeit einzuschränken, wird dabei nicht zwischen Personen mit speziellen Präferenzen oder Bedürfnissen unterschieden. Die anhand dieser Sammlung optimierten Routen richten sich dadurch an keine bestimmte Nutzergruppe, sondern an Personen, die das Navigationssystem am Smartphone oder an einem Desktop-Computer aufrufen, um eine Route abzufragen, ohne vorab spezielle Präferenzen anzugeben.

Dieses Vorgehen wird verfolgt, obwohl offensichtlich Nutzergruppen mit verschiedenen Bedürfnissen existieren, wie Personen mit eingeschränkter Mobilität, und obwohl weiterhin die Präferenzen einzelner Individuen sehr unterschiedlich ausgeprägt sein können (siehe Delling, Goldberg, Goldszmidt et al., 2015; Krisp & Keler, 2015; Millonig & Schechtner, 2007). Die Intention dieser Herangehensweise liegt zunächst im praktischen Nutzen begründet, eine Route berechnen zu können, ohne Kenntnis über den konkret anfragenden Nutzer des Navigationssystems zu haben. Ein solcher müsste nämlich die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Personengruppe vorab angeben, zur Berücksichtigung individueller Bedürfnisse wären weiterhin Nutzerprofile notwendig. Eine Erhebung der über die in Abbildung 3.6 dargestellten browserbasierten Navigationsanwendung abgefragten Routen im Verlauf eines Monats zeigt jedoch auf, dass NutzerInnen dazu kaum bereit sind und bestätigt dadurch die Relevanz der Berücksichtigung allgemeiner, durchschnittlicher Bedürfnisse. So haben sich die NutzerInnen lediglich bei 20 der insgesamt mehr als 5400 angefragten Routen die Zeit genommen, eine spezielle Anforderung aus der am linken unteren Rand der Abbildung sichtbaren Liste auszuwählen.

Wie in Abschnitt 3.1 „Forschungsstand“ aufgeführt, sprechen sich Millonig und Schechtner (2007) im Hinblick auf die Analyse der Verhaltens allgemeiner, durchschnittlicher Personen für eine Untersuchung von Fußgängerströmen aus. Die in Abschnitt 4.1 beschriebene Ermittlung präferierter Nutzerrouten stellt deshalb eine praktische Möglichkeit dar, solche Nutzerströme auch in Innenbereichen zu erheben.

Ein weiterer Grund der Vorgehensweise, im Rahmen dieser Arbeit zunächst allgemeine Präferenzen zu untersuchen, ergibt sich aus der Frage der Übertragbarkeit des Verfahrens. Durch Evaluation der Optimierung wird gezeigt, dass die für DurchschnittsnutzerInnen berechneten Routen allgemein favorisierten Routen ähnlicher sind als kürzeste Routen. Das Verfahren eignet sich deshalb insbesondere gut, mit favorisierten Routen spezieller Nutzergruppen oder individueller NutzerInnen tra-

3.4. Limitationen der präferenzbasierten Pfadplanung

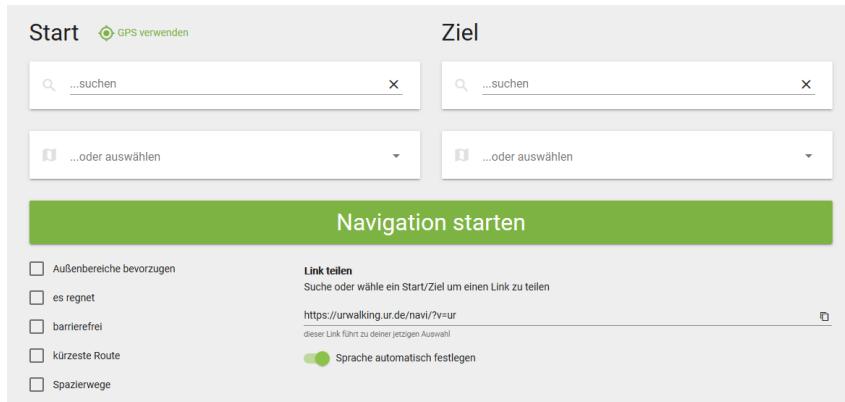


Abbildung 3.6: Die speziellen Anforderungen an die zu berechnende Route werden im praktischen Einsatz der Web-Applikation kaum genutzt.

niert zu werden, da sich deren klarer definierte Bedürfnisse in einer geringeren Varianz optimaler *Gewichtungen* ausdrücken. Beispielsweise kann es schwer sein, die Bedürfnisse allgemeiner NutzerInnen abzubilden, da es sowohl Personen gibt, die Aufzüge bevorzugen, als auch solche, die gerne Treppen steigen. Die Präferenzen von RollstuhlfahrerInnen lassen sich hingegen einfacher durch *Gewichtungsfaktoren* abbilden, da es innerhalb dieser Nutzergruppe eine klare Präferenz für Aufzüge geben wird. Indem gezeigt wird, dass der Ansatz für den schwierigen allgemeinen Fall funktioniert, wird somit die Übertragbarkeit auf speziellere Untergruppen gewährleistet.

Zuletzt bringt die Anpassung von Routen an allgemeine statt individuelle Präferenzen den Vorteil mit sich, dass es schlichtweg einfacher ist, ProbandInnen ohne spezielle Anforderungen zu akquirieren.

Mit dem Verfügbarwerden eines Positionierungssystems, das FußgängerInnen innerhalb von Gebäuden lokalisieren kann, könnten von Personen gewählte Routen allerdings sehr viel schneller erhoben werden, als mit der in Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“ durchgeföhrten Befragung. Im Hinblick auf eine Analyse von Fahrzeugrouten betonen Jan et al. (2000) die Vorteile einer mittels GPS im Gegensatz zu einer durch Interviews, Fragebögen oder Simulatoren erstellten Datensammlung. Die Autoren schreiben, dass die Daten einfacher zu erheben seien und weiterhin Reisezeit und Geschwindigkeit ermittelt und genutzt werden könnten, um dadurch Rückschlüsse auf die von NutzerInnen getroffenen Entscheidungen zu ziehen. Auch das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren könnte von einer größeren Datensammlung, die kontinuierlich die von NutzerInnen gewählten Routen aufzeigt, profitieren. Zwar muss beachtet werden, dass Personen, wie in Unterabschnitt 3.1.2 „Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen bei der Navigation“ beschrieben, möglicherweise nicht die für sie wirklich optimal geeigneten Routen wählen, dies könnte aber durch eine entsprechende Datenquantität ausgeglichen werden. Bei hinreichend

großem Datenbestand könnte das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren für von einzelnen NutzerInnen gesammelte Routenverläufe angewandt werden, um individuelle Präferenzen zu berücksichtigen. Weiterhin könnten Cluster ermittelt werden, um NutzerInnen sinnvoll zu gruppieren, sodass auch Personen, zu denen keine Daten vorliegen, zwischen spezielleren Präferenzen wählen können. Die von Jan et al. (2000) beschriebene Geschwindigkeit der NutzerInnen könnte auch für Fußgänger-routen Zusammenhänge zu getroffenen Entscheidungen offenlegen, die sich bei der Erstellung von Nutzergruppen möglicherweise nutzen lassen.

Eine Methode, um solche Cluster verschiedener NutzerInnen bei gleichzeitiger Optimierung von *Merkmalsgewichtungen* zu erstellen, wird von Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) beschrieben. Vergleichbar zu dem in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ vorgestellten Verfahren, optimieren die Autoren *Gewichtungen* verschiedener Kriterien der Route, die sich formal in einem Vektor zusammenfassen lassen. Dieser optimierte *Gewichtungsvektor* führt zu berechneten Routen, die den von Personen präferierten Routen möglichst ähnlich sind. Die Autoren schreiben, dass mittels dieses Verfahrens auch eine feste Zahl mehrerer alternativer Vektoren ermittelt werden könnten. Diese werden dazu so optimiert, dass zu jeder von einem Nutzer präferierten Route nur mindestens einer der Vektoren zu einer möglichst ähnlichen berechneten Route führt. Durch dieses Verfahren ließen sich Cluster von Nutzerpräferenzen finden, deren Eigenschaften durch jeweils einen der *Gewichtungsvektoren* abgebildet werden. Die in Abschnitt 4.3 „Qualitätsmaß“ beschriebene Funktion zur Operationalisierung der Eignung eines *Gewichtungsvektors* könnte in zukünftigen Arbeiten angepasst werden, um sinnvolle Nutzergruppen anhand der beschriebenen Vorgehensweise zu ermitteln. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass ein solches datengetriebenes Verfahren zur Gruppierung relevanter Nutzerpräferenzen gegenüber einer manuellen Einteilung auch nachteilig sein kann. So wäre es beispielsweise möglich, dass die speziellen Anforderungen von RollstuhlfahrerInnen keinem separaten Cluster zugewiesen werden, da diese in potentiellen Logdaten anteilig nur gering vertreten sind. Dennoch könnten RollstuhlfahrerInnen mehr von einer angepasste Routenführung profitieren als Personen, die zwar häufig in Logdaten vertreten, aber weniger auf die Erfüllung Ihrer Präferenzen angewiesen sind.

3.4.2 Berücksichtigung verschiedener Merkmale

Wie in Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ dargelegt, werden im Rahmen dieser Arbeit nur auf den Routenverlauf einfluss-nehmende Merkmale berücksichtigt, die direkt im spezifizierten Umgebungsmo-dell enthalten sind. Neben der Pfadlänge werden demnach in Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“ definierten Kategorien von *Edges*, *Nodes* und *Leveledges* herangezogen.

Tabelle 3.1 auf Seite 82 zeigt eine Vielzahl zusätzlicher Kriterien auf, die in einschlägigen Arbeiten herangezogen werden und jeweils zu einer verbesserten Pfadplanung führen. Mittels des in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ vorgestellten Verfahrens könnte auch der Einfluss dieser Kriterien ermittelt werden. Das beschriebene Vorgehen könnte demnach in anknüpfenden Arbeiten genutzt werden, um den Erhebungsaufwand zur Ermittlung bestimmter Pfadkriterien mit dem Grad der dadurch jeweils erzielten Anpassung von Routen in Bezug zu setzen.

Zunächst wäre es möglich, hierfür Kriterien zu evaluieren, die sich zwar nicht direkt aus dem spezifizierten Umgebungsmodell auslesen lassen, die aber anhand zu definierender Heuristiken abgeleitet werden können. Ein Kriterium, dessen Relevanz anhand der verschiedenen Arbeiten, die dieses berücksichtigen, gezeigt wird, stellt die durch Abbiegungen verursachte Komplexität dar (Duckham & Kulik, 2003; R. G. Golledge, 1995; Grum, 2005; Hölscher et al., 2011; Krisp & Keler, 2015; Sadalla & Staplin, 1980; Vanclooster et al., 2013, 2014). Beispielsweise könnte versucht werden, die Gesamtzahl von Abbiegungen zu verringern, indem jeder *Node* mit mehr als zwei ausgehenden *Edges* mit einer bestimmten Gewichtung in die bei der Pfadsuche verwendete Kostenfunktion einfließt. Der Verzweigungsgrad bzw. die Zahl der von einem *Node* ausgehenden *Edges* könnte weiterhin in eine Routenbewertung einfließen, um speziell komplexe Abbiegungen zu vermeiden.

Das Vorhandensein von Landmarken, dessen Relevanz beispielsweise von Caduff und Timpf (2005a, 2005b); Hölscher et al. (2011); Kikiras et al. (2006); Turner (2009) betont wird, könnte berücksichtigt werden, indem die Anzahl von *Nodes* der Kategorie „Landmarke“, die in einem bestimmten Umkreis um eine *Edge* liegen, gewichtet wird. Eine entsprechende Heuristik müsste dabei sicherstellen, dass eine höhere Dichte zu geringeren Kosten führt, die Kosten aber dennoch im positiven Bereich bleiben (siehe Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“).

Auch eine Heuristik, die das von Agrawal et al. (2008); Da Silva et al. (2008); R. G. Golledge (1995); Malaka und Zipf (2000); Quercia et al. (2014) beschriebene Kriterium der Schönheit der Umgebung entlang einer Route wiedergibt, könnte anhand von Landmarken definiert werden. Ähnlich zu dem von Quercia et al. (2014) beschriebenen Verfahren, das Fotos der Internetplattform „Flickr“ nutzt, könnte hierfür die Anzahl von *Nodes*, die, wie in Unterabschnitt 2.4.3 „Graphbasiertes Modell“ beschrieben, mit einem Foto verknüpft sind, genutzt werden.

Diese genannten Kriterien lassen sich direkt in die in Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ beschriebene Kostenheuristik integrieren. Ohne weitere Anpassungen eignet sich der Suchalgorithmus allerdings nicht dazu, Eigenschaften miteinzubeziehen, bei denen *Edges* abhängig von deren ausgehenden Winkeln relativ zum zurückliegenden Pfad bzw. der einzuschlagenden Richtung unterschiedlich bewertet werden. Ein Beispiel hierfür stellt die in Duckham

und Kulik (2003) beschriebene Komplexität von Abbiegungen dar. Weder durch Anpassung der *Gewichte* einzelner *Nodes* noch einzelner *Edges* lässt sich das von den Autoren definierte Komplexitätsmaß abbilden. Vielmehr hinge die Komplexität von zwei in einem Pfad aufeinanderfolgenden *Edges* ab. Winter (2002) veranschaulicht, dass Algorithmen zur Ermittlung kürzester Pfade nur auf Umwegen geeignet sind, solche *Gewichtungen* von Abbiegungen zu berücksichtigen. So zeigt die nach Winter (2002) erstellte Abbildung 3.7 beispielhaft, dass eine Kostenfunktion bei entsprechend hoher Gewichtung von Linksabbiegungen durch einen Pfad minimiert wird, in dem der mittlere *Node* doppelt durchlaufen wird. Winter greift das in Caldwell

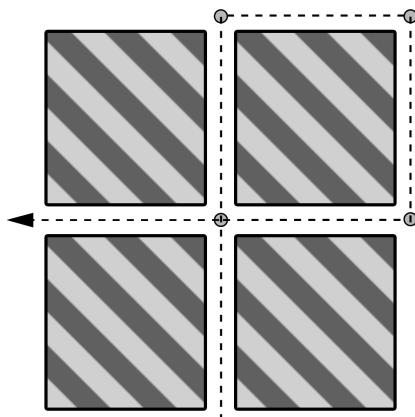


Abbildung 3.7: Die nach Winter (2002) erstellte Grafik veranschaulicht, dass eine Kostenfunktion bei entsprechend hoher Gewichtung von Linkskurven durch einen Pfad minimiert wird, in dem ein Node doppelt enthalten ist. Ein solcher Pfad lässt sich ohne weitere Anpassung nicht mittels Dijkstra- oder A-Algorithmus berechnen.*

(1961) vorgestellte Verfahren zur Lösung des Problems auf: Es wird gezeigt, dass sich ein Wege-Netzwerk, in dem Abbiegungen unterschiedlich gewichtet werden sollen, in ein Pseudo-Netzwerk (von Caldwell als „pseudonetwork“ und von Winter als „pseudo-dual graph“ bezeichnet) überführen lässt, das sich für die Suche mittels Algorithmen zur Bestimmung des kürzesten Pfaedes eignet. Hierfür wird im Wesentlichen zunächst jede *Edge* des ursprünglichen Netzwerks durch einen *Node* ersetzt. Jede Abbiegung (bzw. jedes Paar von aufeinanderfolgenden *Edges*) wird im zu konstruierenden Pseudo-Netzwerk dann durch eine *Edge* modelliert, sodass die *Gewichtung* dieser neu erstellten *Edge* die Kosten der Abbiegung enthalten können. Die nach Caldwell (1961) erstellte Abbildung 3.8 zeigt exemplarisch, wie sich ein Wege-Netzwerk (links) in ein Pseudo-Netzwerk (rechts) transformieren lässt. Die Kosten der *Edge* von *Node* „1,2“ nach „2,4“ (rechts) können beispielsweise neben den Kosten für *Node* „2“ (links) auch die Kosten für die Abbiegung von *Node* „1“ über „2“ nach „4“ abbilden.

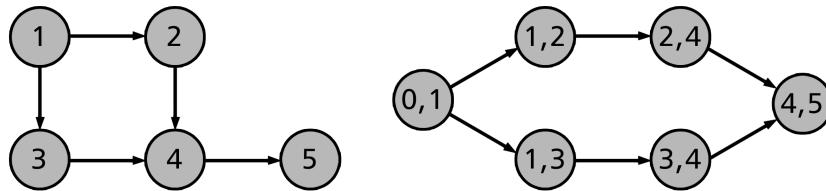


Abbildung 3.8: Die nach Caldwell (1961) erstellte Abbildung veranschaulicht, wie sich ein Wege-Netzwerk (links) mit unterschiedlich zu gewichtenden Abbiegungen in ein Pseudo-Netzwerk (rechts) überführen lässt, sodass kostenoptimierte Pfade beispielsweise mittels Dijkstra-Algorithmus ermittelt werden können.

Die genannte Erweiterung sowie die Berücksichtigung und Evaluation weiterer Merkmale sollen allerdings als Inhalt zukünftiger Arbeiten verbleiben. Wie ein Navigationssystem, das Routen mit Schleifen präsentiert, um dadurch deren Komplexität zu reduzieren, im praktischen Einsatz von NutzerInnen akzeptiert wird, ist möglicherweise auch eine Fragestellung, die vor der Umsetzung des beschriebenen Ansatzes erörtert werden sollte.

3.4.3 Separierbarkeit der Routenelemente

Eine weitere Limitation dieser Arbeit ergibt sich aus der Wahl einer linearen Kostenfunktion, wie bereits in Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ angemerkt worden ist. Dieser Ansatz setzt voraus, dass sich eine Route in einzelne, aus *Nodes* und *Edges* bestehende Abschnitte separieren lässt, die getrennt betrachtet werden können, um die Route als Ganzes zu bewerten. In vielen denkbaren Situationen ist diese Voraussetzung erfüllt. So kann beispielsweise die in den vorgestellten Umfragen genannte Vermeidung von Aufzügen oder Rolltreppen erreicht werden, indem genau diese Elemente betrachtet und deren Anzahl minimiert wird. Eine lineare Kostenfunktion wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit verwendet, da sie eine einfache Heuristik darstellt, um die Zufriedenheit von NutzerInnen mit einer Route zu operationalisieren. Jedoch soll nicht unterstellt werden, dass sich das Konstrukt der Nutzerzufriedenheit optimal durch eine solche lineare Heuristik abbilden lässt. So könnte beispielsweise der Unmut eines Nutzers, bei Regen unüberdachte Bereiche durchqueren zu müssen, quadratisch mit der Länge des Weges im Freien ansteigen. Dieser Zusammenhang ließe sich durch eine alternative Kostenberechnung ausdrücken, in der die quadrierte Gesamtlänge unüberdachter *Edges* mit einem zu optimierenden *Faktor* berücksichtigt wird. Es ist wahrscheinlich, dass weit größere Sammlungen an präferierten Nutzerrouten notwendig wären, um die zusätzlich auftretenden *Faktoren* mit dem in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ beschrieben Verfahren zu erlernen. So wäre es notwendig, dass eine hinreichende Menge an Routen im Referenzstandard enthalten ist, die implizit die Information

enthalten, dass die Länge eines Weges bestimmter Kategorie quadratisch in die Präferenz einfließt. Leicht lassen sich weitere Beispiele konstruieren, die auch durch eine polynomiale Heuristik nicht abgebildet werden können. So kann eine Person mit Kreislaufschwäche möglicherweise problemlos eine Treppe in die nächste Etage emporsteigen, würde bei einem weiteren Stockwerkswechsel auf der Route aber generell einen Aufzug bevorzugen. Die Präferenz einer zwanghaften Person, immer eine gerade Anzahl an Türen zu durchschreiten, mag in der Praxis selten vorkommen – deren Berücksichtigung würde neben einer alternativen Kostenberechnung aber weiterhin spezielle Anforderungen an Pfadsuchalgorithmen stellen. Auch Wechselwirkungen unterschiedlicher Pfadelemente wären denkbar. Ein Nutzer könnte die Präferenz haben, Wege durch den Schlamm nur zu wählen, wenn die Route anschließend über eine Fußmatte führt.

Durch einen Referenzstandard entsprechenden Umfangs mit von NutzerInnen präferierten Routen wäre es möglich, *Gewichtungsfaktoren* einer weit generischeren Funktion als der verwendeten linearen Heuristik zu optimieren. Auch der Aufbau des Funktionsterms selbst würde sich möglicherweise datengetrieben optimieren lassen. Die Ermittlung solcher Heuristiken, die Nutzerpräferenzen noch genauer widerspiegeln können, soll im Rahmen dieser Arbeit als offene Forschungsfrage verbleiben, auf einen alternativen Ansatz wird in Abschnitt 5.3 „Ausblick“ eingegangen.

3.4.4 Skalierbarkeit der Pfadplanung

Es soll an dieser Stelle kurz darauf eingegangen werden, dass die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Pfadsuche mittels des A*-Algorithmus nicht beliebig skaliert. Die Evaluation weiterer Verfahren, um die Routenberechnung performanter zu gestalten, verbleibt deshalb ebenfalls als Inhalt zukünftiger potentieller Arbeiten. Ein Ansatz, der dabei näher in Betracht gezogen werden sollte, wird in den Arbeit von Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) aufgezeigt. Unter Beachtung unterschiedlicher Nutzerpräferenzen werden dort Routen in dem Modell, auf dem die Routensuche des Dienstes „Microsoft-Bing“ basiert, ermittelt. Die Autoren führen beispielhaft zunächst die Ansätze von Abraham, Delling, Goldberg und Werneck (2012) und Bast, Funke, Sanders und Schultes (2007) auf, durch die sich Routen selbst im ungünstigsten Fall in weniger als einer Mikrosekunde berechnen ließen. Allerdings müsste die Kostenfunktion zur Gewichtung verschiedener Pfadelemente zur Nutzung in einem nötigen Vorverarbeitungsschritt, der mehrere Minuten andauere, bereits feststehen. Solche Algorithmen würden sich deshalb nicht zur Planung individueller Pfade, die von Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) angestrebt wird, eignen. Auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit müssen zur Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* Routen mit vielen unterschiedlichen Präferenzen berechnet werden (siehe Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“), weshalb eine solche vorab definierte

3.4. Limitationen der präferenzbasierten Pfadplanung

Kostenfunktion nicht in die in Unterabschnitt 3.3.2 „Hierarchische Pfadplanung“ beschriebene Vorverarbeitung einfließen kann.

Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) verweisen deshalb auf das Verfahren „customizable route planning (CRP)“, das in Delling, Goldberg, Pajor und Werneck (2011, 2015); Delling und Werneck (2013) beschrieben wird. Sie schreiben, dass die besten Resultate in ihren Versuchen damit erzielt werden konnten.

4. Erlernen der Nutzerpräferenzen

Wie in Kapitel 3 „Präferenzbasierte Pfadplanung“ aufgezeigt worden ist, erfolgt die Anpassung von Routen an Nutzerpräferenzen im Rahmen dieser Arbeit, indem Eigenschaften potentieller Pfade quantifiziert und gewichtet in eine Kostenfunktion einfließen. Es wird dann ein Pfad ermittelt, indem die Kostenfunktion für dessen gegebenen Start- und Zielpunkt minimiert wird. In Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ ist diese Heuristik formal definiert worden. *Nodes* entlang einer potentiellen Route fließen dabei mit den *Faktoren* $s_{\langle \text{Kategorie} \rangle}$ ein, die anhand der Kategorie der *Nodes* unterschieden werden. Die Steuerung des Einflusses von *Edges* einer bestimmten Kategorie, erfolgt analog dazu mit den *Faktoren* $t_{\langle \text{Kategorie} \rangle}$ und $u_{\langle \text{Kategorie} \rangle}$. Weiterhin wird der Einfluss der *Leveledges* entlang einer Route mittels der *Faktoren* $v_{\langle \text{Kategorie} \rangle}$ und $w_{\langle \text{Kategorie} \rangle}$ justiert.

Dieses Kapitel widmet sich der datengetriebenen Optimierung der aufgeführten *Gewichtungsfaktoren*, das grundsätzliche Vorgehen findet sich bereits in der Publikation Ullmann (geb. Müller), Bauer, Jackermeier und Ludwig (2018) beschrieben. Es gilt, einen *Gewichtungsvektor* zu ermitteln, der zu Routen führt, die von NutzerInnen präferierten Routen möglichst ähnlich sind. Zunächst wird die dazu notwendige Erhebung präferierter Nutzerrouten in Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“ beschrieben. Dem Verfahren liegt somit die Idee zugrunde, dass optimale *Gewichtungsfaktoren* in dem erstellten Referenzstandard implizit enthalten sind. In Abschnitt 4.2 „Analyse der gesammelten Daten“ wird ein Überblick über die erhobene Datensammlung gegeben, dabei wird vorab untersucht, ob die präferierten Routen hinsichtlich bestimmter Eigenschaften signifikant von den kürzesten Pfaden abweichen. Um ein System so zu optimieren, dass berechnete Routen den präferierten möglichst ähnlich sind, wird ein geeignetes Ähnlichkeitsmaß in Abschnitt 4.3 „Qualitätsmaß“ erarbeitet und formal spezifiziert. In Abschnitt 4.4 „Optimierung“ folgt die eigentliche Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* durch eine Maximierung des festgelegten Qualitätsmaßes. Abschließend werden die resultierenden *Faktoren* und deren Auswirkungen in Abschnitt 4.5 „Evaluation und Interpretation der Ergebnisse“ eingehender untersucht.

4.1 Erstellung eines Referenzstandards

Um Nutzerpräferenzen datengetrieben anhand der in Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ aufgezeigten *Gewichtungsfaktoren* abbilden zu können, ist zunächst ein Referenzstandard notwendig, welcher eine Sammlung per Definition idealer Routen darstellt. Dieser ermöglicht die Optimierung und Evaluation der entwickelten Pfadplanung – so würde ein perfekt arbeitendes System Routen berechnen, die jeweils den Routen des Referenzstandards entsprechen (siehe Abschnitt 4.3 „Qualitätsmaß“). Im Folgenden wird nun die Erhebung solcher Routen, die Präferenzen verschiedener realer Personen widerspiegeln, beschrieben. Der dadurch gesammelte Referenzstandard enthält implizit die Information, durch welche *Gewichtungsfaktoren* sich Routen berechnen lassen, die NutzerInnen eines Navigationssystems potentiell favorisieren.

4.1.1 Durchführung der Studie

Da es zum Zeitpunkt der Erhebung solcher favorisierten Routen nicht möglich gewesen ist, Personen in Innenbereichen mit ausreichender Genauigkeit zu lokalisieren, sind ProbandInnen an der Universität Regensburg explizit nach ihren präferierten Routen befragt worden. Diese Befragung ist dabei von den TeilnehmerInnen zweier Seminare jeweils im Wintersemester 2015/16 und im Sommersemester 2016 durchgeführt worden. Hierzu sind die StudentInnen in Gruppen mit jeweils zwei bis drei Personen eingeteilt worden, in denen sie ProbandInnen gemeinsam akquirieren und befragen sollten. Den Gruppen ist der geplante Ablauf des Experimentes, der im Folgenden beschrieben wird, zur Durchführung detailliert erläutert worden: Einführend wird Personen am Campus erklärt, dass durch ein Experiment herausgefunden werden sollte, welche Routen an der Universität für FußgängerInnen am besten geeignet seien. Sofern diese einwilligen, werden sie zunächst nach einer für sie ideal verlaufenden Route gefragt, auf der sie sich gut auskennen würden. Hierfür ist die vorab ausformulierte Anweisung gegeben worden:

„Auf welcher Route an der Universität kennst du dich gut aus? Bitte suche eine für dich optimal verlaufende Route aus! Dabei sollen Start- und Zielpunkt möglichst weit auseinander liegen.“

Die Intention, explizit nach einer möglichst langen Route zu fragen, liegt darin, die Komplexität gesammelter Routen zu erhöhen, da es bei sehr kurzen Routen potentiell weniger Alternativen gibt, die aufgrund bestimmter Präferenzen abgewählt werden müssen. Sofern von den ExperimentteilnehmerInnen jeweils Start- und Zielpunkt einer Route genannt worden sind, sind diese durch einen der begleitenden TestleiterInnen notiert worden. Ansonsten ist das Experiment bereits an dieser Stelle abgebrochen worden. So sollen Personen, die zu selten an der Universität unterwegs

sind, um spontan einen solchen Weg zu benennen, nicht genötigt werden, eine favorisierte Route zu konstruieren. Zur zusätzlichen Verbesserung der Qualität der Daten ist daraufhin die Ortskenntnis der Probanden abgefragt worden. Dazu ist die Frage

„Ich bin sehr gut mit der Umgebung entlang meiner gewählten Route vertraut.“

gestellt worden. Nur ProbandInnen, die auf einer fünfstufigen, endpunktbenannten Likert-Skala mit den Extremwerten „1: lehne stark ab“ und „5: stimme stark zu“ die Ausprägung vier oder fünf angegeben haben, sind dann für das durchzuführende Experiment ausgewählt worden. Diese Restriktion ist festgelegt worden, um gezielt ProbandInnen auszuwählen, die aufgrund guter Ortskenntnis in der Lage sind, mögliche Alternativen bei der Festlegung einer bestimmten Route gegeneinander abzuwägen. So ist bereits in Unterabschnitt 3.1.2 „Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen bei der Navigation“ erörtert worden, dass ein solcher Vergleich verschiedener Pfade für Personen nicht trivial ist. Beispielsweise zeigt die von Hölscher et al. (2011) durchgeführte Studie, dass ProbandInnen teils große Probleme haben, die kürzeste Route vor Ort oder, was zu noch schlechteren Resultaten führt, auf einer Karte zu bestimmen. Zur Festlegung des genauen Routenverlaufs sind die TestleiterInnen mit den ProbandInnen dann zum definierten Startpunkt gegangen. Die TeilnehmerInnen haben die Umgebung bis zum Zielpunkt dann genau erkunden können, um sich auf eine für sie ideale, präferierte Route festzulegen. Es ist dabei explizit darauf hingewiesen worden, dass getroffene Entscheidungen bei dieser Festlegung jederzeit verbessert werden dürfen und dass es einzig darauf ankomme, die bestmögliche Route zu finden. Einer der TestleiterInnen hat den ausgewählten Verlauf der Route währenddessen auf vorab ausgedruckten Gebäudeplänen und einer Karte des umgebenden Campus eingezeichnet. Nachdem der Pfad vollständig festgelegt worden ist, sind die ProbandInnen gebeten worden, einen Fragebogen auszufüllen. Dadurch sind zunächst Alter, Geschlecht und Studiengang abgefragt worden. Zusätzlich ist die Anzahl der Semester, die StudentInnen an der Universität Regensburg verbracht haben, als weiterer Indikator der Ortskenntnis erhoben worden. Die Einschätzung des eigenen Orientierungssinns ist anhand eines deutschen Fragebogens ermittelt worden (siehe Münzer & Hölscher, 2011). Durch diese Erhebung soll die grundsätzliche Möglichkeit offen gehalten werden, in zukünftigen Arbeiten gegebenenfalls Zusammenhänge zur Routenwahl ermitteln zu können. Der Fragebogen ist im Sommersemester 2016 um zwei zusätzliche Fragen erweitert worden. So ist einerseits die Frage

„Gab es Einflussfaktoren, die den Verlauf deiner Route beeinflusst haben (z.B.: Wetter, Veranstaltungen)?“

formuliert worden. Dadurch soll es einerseits ermöglicht werden zu erkennen, wenn Routenverläufe aufgrund spezieller Situationen, wie beispielsweise durch eine nicht im Umgebungsmodell verzeichnete Baustelle, zustande kommen. Diese hätten so aus dem Datensatz ausgeschlossen werden können, damit daraus keine falschen Rückschlüsse auf etwaige Präferenzen gezogen werden. Einflussfaktoren, wie spezielle Wetterverhältnisse, die voraussichtlich auch im normalen Einsatz des entwickelten Navigationssystems wiederkehren, könnten genutzt werden, um Zusammenhänge zwischen diesen und Routenverläufen zu ziehen und um gegebenenfalls *Gewichtungen* im Hinblick auf diese zu optimieren. Hierfür sind die Wetterverhältnisse im Sommersemester 2016 zusätzlich von den TestleiterInnen protokolliert worden.

Durch eine zweite Erweiterung des Fragebogens soll der in Unterabschnitt 3.1.2 „Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen bei der Navigation“ beschriebene Aspekt, dass die von NutzerInnen präferierten Routen möglicherweise nicht zur Anzeige in einem Navigationssystem geeignet sind, untersucht werden. Hierfür soll die Zustimmung zur Aussage

„Ich würde die von mir gewählte Route auch exakt so verwenden, um einer universitätsfremden Person den Weg von meinem Start zum Zielpunkt zu beschreiben“

auf einer siebenstufigen endpunktbenannten Likert-Skala mit den Extremwerten „1: lehne stark ab“ und „7: stimme stark zu“ angegeben werden. Von den 100 ProbandInnen ist hierbei das arithmetische Mittel 6,0 ($\sigma = 1,3$) gewählt worden, was grundsätzlich für die Eignung der Routen im Sinne des geplanten Vorgehens spricht.

Im Anschluss an die Befragung sind die auf Kartenmaterial eingezeichneten Wegverläufe von den hierfür geschulten Testleitergruppen digitalisiert worden, sodass sich diese automatisiert einlesen und verarbeiten lassen. Hierfür sind durch die entwickelte Applikation zur Bearbeitung der Umgebungsmodelle zahlreiche Funktionen bereitgestellt worden (siehe Abschnitt 2.5 „Modellierungsapplikation“).

4.1.2 ProbandInnen

Anhand des beschriebenen Verfahrens ist im Wintersemester 2015/16 eine Anzahl von 132 StudentInnen befragt worden. Es ist notwendig gewesen, elf der ermittelten Routen zu verwerfen, da es nicht möglich war, die Routenverläufe bei der Digitalisierung eindeutig zu rekonstruieren, sodass ein Datensatz mit 121 präferierten Routen zustande gekommen ist. Im Sommersemester 2016 sind weitere 100 StudentInnen als TeilnehmerInnen akquiriert worden, deren genannte Pfade vollständig digitalisiert werden konnten. Insgesamt besteht der Referenzstandard demnach aus 221 Routenverläufen. Das Alter der ProbandInnen reicht von 19 bis 33 Jahren mit dem arithmetischen Mittel von 22,9 Jahren ($\sigma = 2,7$ Jahre), 92 der 221 TeilnehmerInnen

sind weiblichen Geschlechts. Die durchschnittliche Zahl der Studiendauer an der Universität Regensburg beträgt 6,0 Semester ($\sigma = 3,0$ Semester).

Die Zahl der Probanden lässt sich einerseits mit dem zur Erhebung verbundenen Aufwand begründen, der sich aufgrund der händischen Mitschrift aller Routen ergibt. Wie bereits erwähnt, könnte eine Aufzeichnung der Routen durch das Verfügbarwerden entsprechender Positionierungssysteme in Innenbereichen die Sammlung einer weit größere Datenmenge ermöglichen. Weiterhin liefert Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) eine Grundlage zur Einschätzung der notwendigen Datenmenge für das durchgeführte Lernverfahren. Anhand eines Satzes zufällig gewählter *Gewichtungsfaktoren* berechnen die Autoren zunächst eine Sammlung von 10 000 Routen. Zwar spiegeln diese simulierten Pfade keine Präferenzen realer NutzerInnen wider, sie könnten jedoch zur Abschätzung einer sinnvollen Größe der Datensammlung herangezogen werden. Die Autoren selektieren hierfür Teilmengen verschiedener Größe aus dem Datensatz, anhand derer jeweils *Gewichtungsfaktoren* optimiert werden. Bei jeder der Optimierungen wird dann die Ähnlichkeit der mittels der erlernten *Gewichtungen* erzeugten Routen mit der Gesamtmenge der simulierten Pfade bemessen. Zur Quantifizierung der Ähnlichkeit berechnen die Autoren den Anteil der exakten Übereinstimmung zweier zu vergleichender Pfade. Auf das in der vorliegenden Dissertationsschrift herangezogene Ähnlichkeitsmaß wird im Detail in Abschnitt 4.3 „Qualitätsmaß“ eingegangen. Es zeigt sich, dass mit einem Datensatz von 64 Routen bereits eine Übereinstimmung von fast 99 Prozent erzielt würde. Mit einer Sammlung von 4096 Pfaden ergebe sich ein Fehler von unter 0,1 %.

Das aufgezeigte Verfahren ließe sich direkt auf den in der vorliegenden Arbeit verfolgten Ansatz übertragen. Neben der von den Autoren beschriebenen Abschätzung der notwendigen Größe eines Datensatzes sind anhand simulierter Daten weitere Analysen möglich. In Abschnitt 4.5 „Evaluation und Interpretation der Ergebnisse“ wird eine Sammlung von 100.000 Routen erstellt, anhand der sich die Auswirkungen der Optimierung insgesamt und der einzelnen *Gewichtungsfaktoren* aufzeigen lassen. Dadurch ist es beispielsweise möglich, zu ermitteln, dass in dem Szenario der Universität Regensburg keine sinnvolle *Gewichtung* von Rolltreppen festgelegt werden kann: Da in den Umgebungsmodellen der Universität keine Rolltreppen existieren, wirken sich Änderungen des *Faktors* nicht auf den Verlauf der zufällig gewählten Routen aus. Über dieses triviale Beispiel hinaus kann somit eine Analyse durchgeführt werden, welche Kriterien in verschiedenen Umgebungen im Speziellen Einfluss auf den Routenverlauf nehmen.

Die von Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) bestimmten Größenordnungen sprechen dafür, dass durch die erreichte Größe des Datensatzes bereits eine Anpassung an präferierte Routen erfolgen kann. Dies wird weiterhin durch die in Unterabschnitt 4.5.1 „Evaluation“ beschriebene Evaluation des in dieser Arbeit verfolgten Verfahrens bestätigt, die den Erfolg der vorgenommenen Anpassung aufzeigt.

Auf die Durchführung einer Analyse, die analog zu der beschriebenen ist, wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit verzichtet.

4.2 Analyse der gesammelten Daten

Abbildung 4.1 gibt einen Überblick über die Verteilung der Längen präferierter Routen, die von den ProbandInnen festgelegt worden sind. Im Vergleich dazu werden die Längen der kürzesten Routen dargestellt, die mit den gleichen, jeweils von ProbandInnen festgelegten Start- und Zielpunkten berechnet werden. Zur Ermittlung

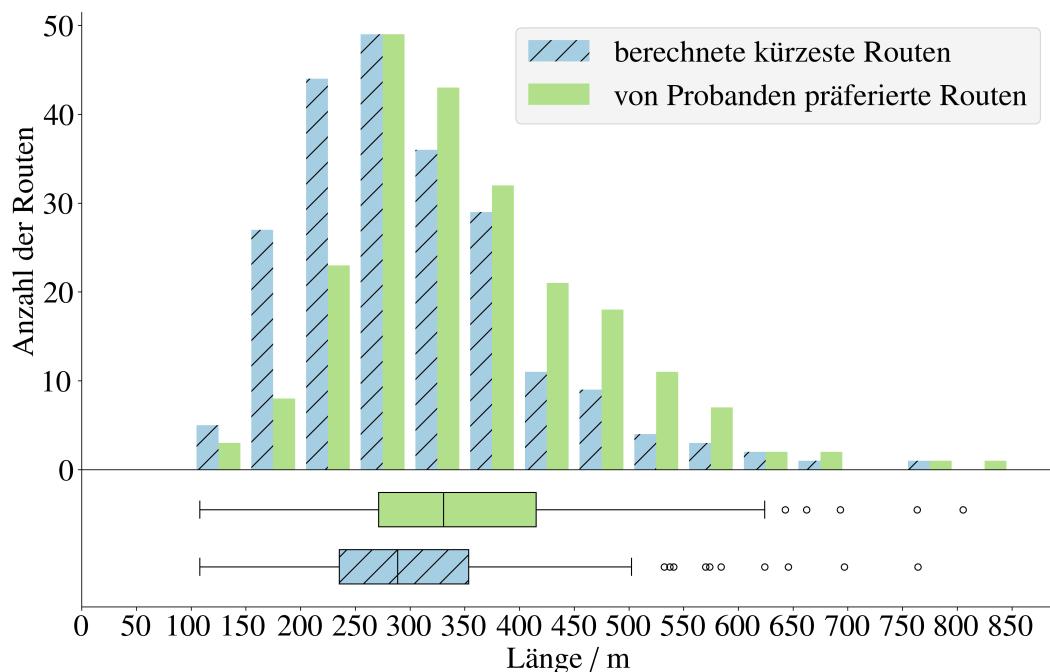


Abbildung 4.1: Überblick über die Längen der von NutzerInnen präferierten Routen sowie der jeweils berechneten kürzesten Routen

der Länge der Routen werden die anhand der berechneten globalen Koordinaten gemessenen Ausdehnungen aller *Edges* der Route aufaddiert. Hinzu kommen Versatzstücke, die gegebenenfalls bei der Verknüpfung zweier Bereiche oder Stockwerke entstehen (siehe Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“). Da die *Edges* einerseits nicht den genauen Wegverlauf wiedergeben und da weiterhin die Ausdehnung von Treppen vernachlässigt wird, entsprechen die ermittelten nicht exakt den realen Streckenlängen der Pfade. Da diese Ungenauigkeit allerdings gleichermaßen bei den präferierten als auch bei den kürzesten Routen auftritt, stellt diese keine Hürde für den Vergleich der Routenlängen dar. Wie sich anhand der Abbildung nachvollziehen lässt, reichen die berechneten Längen der gesammelten Routen von 108 m bis zu einigen Ausreißern mit bis zu 805 m mit

einem arithmetischen Mittel von 352 m ($\sigma = 115$ m). Im Vergleich dazu sind die entsprechenden kürzesten Routen 108 m bis 764 m lang mit einem Mittelwert von 304 m ($\sigma = 107$ m).

Um die jeweils auftretenden Längenverhältnisse der kürzesten und präferierten Routen der verbundenen Stichprobe aufzuzeigen, stellt Abbildung 4.2 jedes aus Start- und Zielpunkt bestehende Paar, das von den ProbandInnen gewählt worden ist, als Punkt in einem Streudiagramm dar. Dabei gibt die Y-Achse Aufschluss über

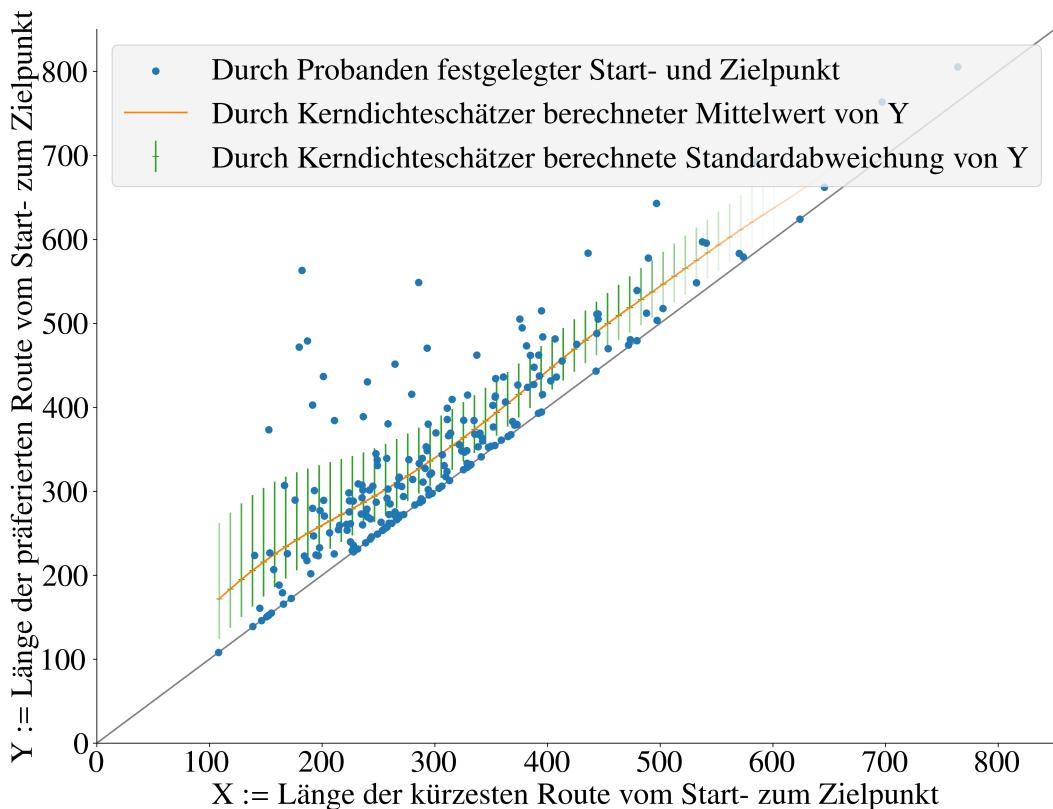


Abbildung 4.2: Vergleich der Längen der von NutzerInnen präferierten Routen mit den jeweils berechneten kürzesten Routen

die Länge der vom Nutzer gewählten Route, die X-Achse zeigt im Vergleich dazu die Länge der kürzesten Route mit gleichem Start- und Zielpunkt. Punkte, die auf der eingezeichneten Winkelhalbierenden liegen, referenzieren somit eine präferierte Route, deren Länge mit der kürzesten Route übereinstimmt. Durch einen Kerndichteschätzer (Parzen, 1962) mit normalverteiltem Kern wird das Längenverhältnis der präferierten und kürzesten Routen anhand einer stetigen Funktion visualisiert. Die Standardabweichung an verschiedenen Punkten wird ebenfalls anhand eines Kerndichteschätzers durch die Fehlerbalken dargestellt. Es fällt dabei auf, dass diese orange dargestellte Funktion insgesamt relativ konstant mit (gerundet) 47 m über der Winkelhalbierenden liegt. Dies indiziert, dass der absolute Längenunterschied

der Route, der als in Kauf genommener Umweg angesehen werden kann, unabhängig von der Gesamtlänge ist und nicht, wie man möglicherweise annehmen könnte, in linearem Verhältnis dazu ansteigt. Die von Hölscher et al. (2011) aufgeführte Routeneffizienz, die nach den von Wiener, Ehbauer und Mallot (2009) als $PAO = \frac{\text{Länge}_{\text{Nutzer}} - \text{Länge}_{\text{Kürzeste}}}{\text{Länge}_{\text{Kürzeste}}} * 100$ definierten „Percent Above Optimal“ berechnet wird, liegt durchschnittlich bei 18 % (aufgrund von Rundungsfehlern ergibt sich gegenüber einer Berechnung anhand der zuvor aufgeführten Mittelwerte eine Abweichung: $\frac{352 - 304}{304} \approx 16\%$). Aus der in Abbildung 4.2 erkennbaren gleichbleibenden absoluten Längendifferenz kann geschlussfolgert werden, dass das relative Verhältnis bei zunehmender Routenlänge abnimmt. Diese Beobachtung wird durch eine Rangkorrelationsanalyse nach Spearman bestätigt, die zeigt, dass der relative Längenunterschied $\frac{\text{Länge}_{\text{Nutzer}}}{\text{Länge}_{\text{Kürzeste}}} = PAO/100 - 1$ mit zunehmender Gesamtlänge der kürzesten Route signifikant abnimmt ($\rho = -0,22; p = 0,00088$). Wie bereits in Unterabschnitt 3.1.4 „Fußgängernavigation“ beschrieben, stimmt dieser Zusammenhang mit den von Quercia et al. (2014) generierten Routen, die im Hinblick auf eine schöne, ruhige und aufheiternde Umgebung optimiert werden, überein. Die Autoren begründen diese Abnahme der Längenverhältnisse mit dem Umstand, dass es bei längeren Routen mehr Spielraum gebe, schöne Wege zu finden, sodass der in Kauf zu nehmende (relative) Umweg nicht so stark erhöht werden müsse wie bei kürzeren Routen.

Um vor der Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* einen Einblick zu erhalten, wie sich präferierte Routen von kürzesten unterscheiden, werden diese anhand verschiedener Kriterien verglichen. In Ullmann (geb. Müller) et al. (2016) sind bereits einige dieser Analysen veröffentlicht, diese beziehen sich allerdings ausschließlich auf die im Wintersemester 2015/16 gesammelte Hälfte des Datensatzes, der bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung erhoben und ausgewertet worden ist.

Da der Datensatz hinsichtlich keines der untersuchten Kriterien normalverteilt ist, werden zur Untersuchung der im folgenden aufgeführten Hypothesen jeweils Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests (Wilcoxon, 1945) durchgeführt. Das festgelegte α -Niveau von 0,05 wird für die Testreihe anhand der Bonferroni-Holm-Prozedur korrigiert (Holm, 1979). Die Ergebnisse der Auswertungen sowie die angepassten α -Werte sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst, die berechneten Werte sind dabei jeweils auf zwei Stellen gerundet.

Die ersten gebildeten Hypothesen sollen auf Abweichungen der Zahlen von Treppen, die von ProbandInnen beschritten worden sind, sowie der benutzten Aufzüge der kürzesten Routen eingehen. Da bei den kürzesten Routen weder Treppen noch Aufzüge mit *Gewichtungen* versehen sind, wird bei der Berechnung immer der Stockwerksübergang gewählt, der insgesamt zu einem kürzeren Pfad führt. Es liegt deshalb nahe, dass sich die Routen hinsichtlich der im Folgenden ausformulierten Hypothesen unterscheiden.

H_1 : Die Anzahl der Treppen in von NutzerInnen präferierten Routen unterscheidet sich von der Anzahl in berechneten kürzesten Routen.

H_2 : Die Anzahl der Aufzüge in von NutzerInnen präferierten Routen unterscheidet sich von der Anzahl in berechneten kürzesten Routen.

Wie erwartet zeigt sich, dass präferierte Routen mehr Treppen ($p = 0,0017$), aber weniger Aufzüge ($p = 0,00097$) enthalten. Es kann vermutet werden, dass die Nutzerpräferenz, einen Aufzug gegenüber Treppen zu bevorzugen, mit der Anzahl zu überwindender Stockwerke steigt. Eine Untersuchung dieser Annahme ist jedoch anhand der gesammelten Daten nicht möglich, da lediglich 5 der insgesamt 221 ProbandInnen auf ihren Routen einen Aufzug benutzt haben. Auch zur sinnvollen Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* v_{Aufzug} und w_{Aufzug} (siehe Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“) wäre deshalb ein größerer Datensatz notwendig.

Anhand der nächsten zwei Hypothesen wird die Zahl der auf den Pfaden liegenden Türen untersucht. Zur Unterscheidung verschiedener Arten von Türen sind in Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“ unter anderem die Kategorien Raumtür und Flurtür definiert worden. Raumentüren, welche Eingänge in Büros oder Hörsäle abbilden, können an einigen Stellen der Universität durchschritten werden, um Wege abzukürzen. Es liegt deshalb nahe, dass solche direkten Wege durch Büros oder Hörsäle zwar in den berechneten kürzesten Routen enthalten sind, von den höflichen ProbandInnen aber in der Regel vermieden werden. Weiterhin wird die Anzahl der in Pfaden enthaltenen Flurtüren verglichen. Diese kennzeichnen neben Türen innerhalb der Korridore der Universität auch Eingänge zu Gebäuden. Es kann hier einerseits vermutet werden, dass diese, sofern einfach möglich, eher vermieden werden, da das Öffnen derselben mit einem, wenngleich geringfügigen, zeitaufwändigen Kraftakt verbunden ist. Andererseits bedingt eine etwaige Bevorzugung von Wegen in Innenbereichen die Durchschreitung solcher Flurtüren.

H_3 : Die Anzahl der *Nodes* der Kategorie Raumtür in von NutzerInnen präferierten Routen unterscheidet sich von der Anzahl in berechneten kürzesten Routen.

H_4 : Die Anzahl der *Nodes* der Kategorie Flurtür in von NutzerInnen präferierten Routen unterscheidet sich von der Anzahl in berechneten kürzesten Routen.

Die Vermutung, dass in präferierten Pfaden weniger Eingänge in Büros und Hörsäle vorhanden sind, bestätigt sich ($p = 0,013$). Für die Eingangstüren in Gebäude und Türen durch Korridore bildet sich eher eine gegenläufige Tendenz ab. So sind diese in den von ProbandInnen gesammelten Routen im Mittel häufiger enthalten. Die Signifikanz der Hypothese kann jedoch nicht gezeigt werden ($p = 0,046$).

Wie angemerkt, ist es denkbar, dass sich eine etwaige Bevorzugung von Innen- oder Außenbereichen auf die Zahl der durchschrittenen Flurtüren auswirkt. Die

Bevorzugung jeweils dieser Wegabschnitte soll durch das folgende Paar von Hypothesen untersucht werden. So könnte es zugunsten einer schöneren Umgebung oder einer besseren Übersicht zu einer Bevorzugung unüberdachter Wegen über den Campus kommen. Andererseits werden Wege durch Gebäude möglicherweise bevorzugt, um Kälte und Regen auszuweichen.

H_5 : Die absolute aufsummierte Länge von *Edges* der Kategorie überdachter Fußweg in von NutzerInnen präferierten Routen unterscheidet sich von deren Länge in berechneten kürzesten Routen.

H_6 : Die absolute aufsummierte Länge von *Edges* der Kategorie unüberdachter Fußweg in von NutzerInnen präferierten Routen unterscheidet sich von deren Länge in berechneten kürzesten Routen.

Es stellt sich heraus, dass es bezüglich überdachter Wege, die in präferierten Routen im Mittel 50 m länger sind, zu einem hochsignifikanten Unterschied kommt ($p = 1,3 * 10^{-9}$). Dieser Vergleich wird in Abbildung 4.3 veranschaulicht. Jede von ProbandInnen ausgewählte Route wird dort durch einen Punkt repräsentiert. Dessen Position auf der Y-Achse gibt Aufschluss über die absolute Länge überdachter Wege in von den ProbandInnen präferierten Routen. Analog dazu stellt die Position auf der X-Achse die Länge überdachter Wege der jeweils zugeordneten kürzesten Routen dar. Anhand der mittels eines zweidimensionalen Kerndichteschätzers berechneten Heatmap soll zusätzlich ein besserer Eindruck über die Verteilung der Punkte vermittelt werden. So spiegeln sich die überdachten Umwege, die ProbandInnen wählen, in der erhöhten Dichte an Punkten oberhalb der Winkelhalbierenden. Bezüglich der unüberdachten Wege in Außenbereichen kann jedoch entgegen der zunächst erwarteten Bevorzugung keine Abweichung aufgezeigt werden ($p = 1,0$).

Aufgrund der Vermutung, dass die Wahl von Wegen in Außenbereichen im Speziellen vom Wetter während der Erhebung abhängig sein könnte, wird anhand zweier weiterer Hypothesen auf diesen Umstand eingegangen. Da die Wetterverhältnisse erst in der zweiten Hälfte der Datenerhebung im Sommersemester 2016 von den TestleiterInnen protokolliert worden sind, wird ausschließlich dieser aus 100 präferierten und 100 zugeordneten kürzesten Routen bestehende Teil zur Signifikanzprüfung herangezogen. Von diesen werden zur Durchführung des Signifikanztests wiederum 20 präferierte Routen mit dem Vermerk „Regenwetter“ sowie 30 Routen, bei deren Erhebung „Sonnenschein“ notiert worden ist, ausgewählt und mit den jeweils dazugehörigen kürzesten Pfaden verglichen.

H_7 : Die absolute aufsummierte Länge von *Edges* der Kategorie unüberdachter Fußweg in von NutzerInnen präferierten Routen unterscheidet sich bei Regenwetter von deren Länge in berechneten kürzesten Routen.

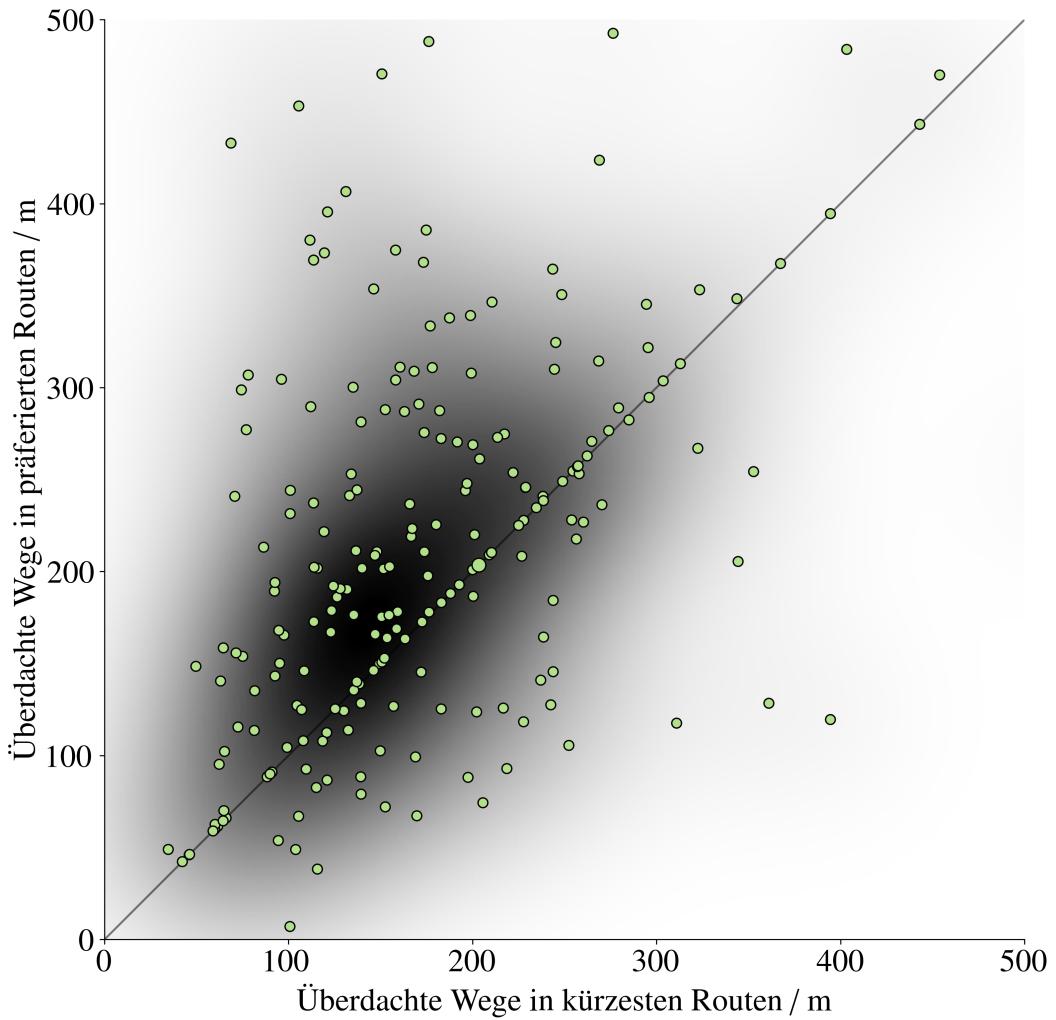


Abbildung 4.3: Vergleich der Längen überdachter Wege in von NutzerInnen präferierten Routen mit denen in jeweils berechneten kürzesten Routen

H_8 : Die absolute aufsummierte Länge von *Edges* der Kategorie unüberdachter Fußweg in von NutzerInnen präferierten Routen unterscheidet sich bei sonnigem Wetter von deren Länge in berechneten kürzesten Routen.

Im Gegensatz zum Vergleich der Außenbereiche ohne Berücksichtigung der Wetterverhältnisse zeigt sich, wie vermutet, dass ProbandInnen bei Regenwetter kürzere ($p = 0,0045$) und bei sonnigem Wetter längere Strecken ($p = 0,0054$) in unüberdachten Außenbereichen gehen, als dies bei den zugeordneten kürzesten Routen der Fall ist. Abbildung 4.4 zeigt das Verhältnis des Anteils unüberdachter Wege in präferierten und kürzesten Routen auf. Anhand der verwendeten Symbole werden die protokollierten Wetterbedingungen visualisiert. Neben den bereits genannten Aspekten sonnig und regnerisch ist in der Abbildung zusätzlich das Wetterverhältnis wolkig dargestellt. Auch anhand dieser Unterschiede zeigt sich die in Unterab-

schnitt 3.4.1 „Berücksichtigung individueller Präferenzen“ erörterte Relevanz, das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren zukünftig zu nutzen, um mehrere alternative *Gewichtungsvektoren* im Hinblick auf unterschiedliche Anforderungen anbieten zu können.

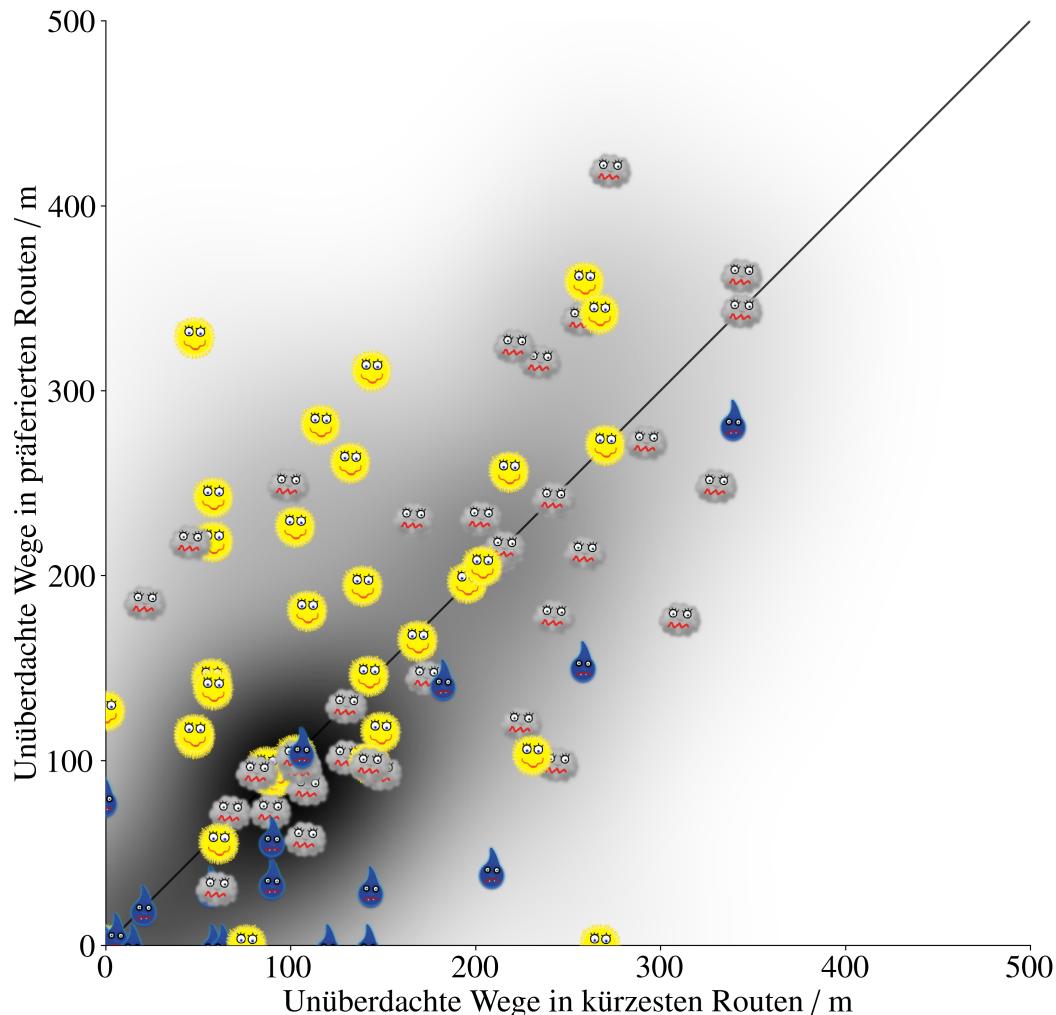


Abbildung 4.4: Vergleich der Längen unüberdachter Wege in von NutzerInnen präferierten Routen mit denen in jeweils berechneten kürzesten Routen bei unterschiedlichen Wetterverhältnissen

Insgesamt bestätigt sich anhand der durchgeföhrten Signifikanztests, dass der Unterschied zwischen den gesammelten favorisierten Routen und den berechneten kürzesten Routen nicht ausschließlich auf möglicherweise durch Desorientierung willkürlich zustande kommende Umwege zurückzuföhren ist. Vielmehr zeigt sich eine systematische Abweichung hinsichtlich verschiedener Kriterien, die sich anhand der durch das semantische Modell spezifizierten Kategorien von *Nodes*, *Edges* und *Leveledges* ergeben. Anhand dieser Unterschiede wird somit die Sinnhaftigkeit

Hypothese	p	z	arithm. Mittel		angepasstes α
			kürzeste	präferierte	
H_5^{***}	$1,3 * 10^{-9}$	-6,1	170	220	0,0062
H_2^{***}	0,00097	3,3	0,14	0,050	0,0071
H_1^{**}	0,0017	-3,1	0,66	0,86	0,0083
H_7^{**}	0,0045	2,8	99	53	0,01
H_8^{**}	0,0054	-2,8	140	190	0,012
H_3^*	0,013	2,5	0,96	0,85	0,016
H_4	0,046	-2,0	4,2	4,6	0,025
H_6	1,0	-0,0041	130	140	0,05

Tabelle 4.1: Übersicht über die acht nach p-Wert geordneten Signifikanztests

aufgezeigt, die Pfadplanung durch eine unterschiedliche *Gewichtung* genau dieser Kriterien zu beeinflussen.

4.3 Qualitätsmaß

Mit der beschriebenen Erhebung liegt nun ein Referenzstandard vor, der per Definition aus optimalen Routen besteht, welche von einem theoretischen, perfekten System generiert werden würden. Das existierende System soll nun durch eine zu ermittelnde Belegung der in Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ beschriebenen *Gewichtungsfaktoren* an dieses Optimum angenähert werden. Dazu ist es notwendig, vorab eine Metrik zu spezifizieren, die die Ähnlichkeit der berechneten Routen des Systems zu den Routen des Referenzstandards operationalisiert. Dadurch kann die Qualität des Systems bewertet werden, was es ermöglicht, zu erkennen, ob eine Änderung der *Gewichtungen* zu einer Verbesserung führt.

Ein einfacher und naheliegender Ansatz, diese Ähnlichkeit zwischen berechneten und präferierten Routen zu ermitteln, wird von Jan et al. (2000) aufgezeigt und als „Percentage of Shared Links“ bezeichnet. Hierfür werde der Anteil der Wege zweier zu vergleichender Routen ermittelt, die exakt übereinstimmen. Als Alternative dazu wird weiterhin der sogenannte „Path Deviation Index“ vorgestellt. Um zu berücksichtigen, wie weit Pfade räumlich voneinander entfernt liegen, werde hierfür die von den Pfaden eingeschlossene Fläche durch die Länge des kürzeren Pfades geteilt. Für den Rahmen der vorliegenden Arbeit bietet der Path Deviation Index allerdings keine sinnvolle Metrik, da selbst Pfade, die nahe beieinander liegen, erheblich bezüglich verschiedener Kriterien abweichen können. Die anteilige Übereinstimmung der Strecke, die durch „Percentage of Shared Links“ wiedergegeben wird, ist hingegen zunächst als ein möglicher Ansatz in Betracht gezogen worden. Auch Delling, Gold-

berg, Goldszmidt et al. (2015) verwenden eine solche prozentuale Übereinstimmung als Ähnlichkeitsmaß, indem sie die Länge der gemeinsamen Strecke in Bezug zur Gesamtlänge der Nutzeroute setzen. Sie definieren hierfür eine „Quality Score“ $Q = (G, T, F_\beta)$, die die Routenberechnung, entsprechend dem hier verfolgten Verfahren, mit einer Kostenfunktion F mit festgelegten *Gewichtungsfaktoren* β in einem Umgebungsmodell G anhand einer Menge gesammelter Nutzeroutes T bewertet. Q entspricht dann dem arithmetischem Mittel aller prozentualen Übereinstimmungen von präferierten Nutzeroutes $t \in T$ zu jeweils zugeordneten berechneten Routen.

Zur *Gewichtsoptimierung* im Rahmen der vorliegenden Arbeit kann diese prozentuale Übereinstimmung als Qualitätsmaß jedoch zu Problemen führen. So wäre es möglich, dass zwei Routen räumlich komplett abweichend verlaufen, somit keine gemeinsamen *Edges* teilen, obwohl die Eigenschaften der Routen, wie Weglängen in Innen- und Außenbereichen oder Anzahl an Treppen, genau übereinstimmen. Der Verlauf der berechneten Route kann somit nicht durch eine Modifikation der *Gewichtungen* der genannten Eigenschaften verbessert werden. Es wird deshalb ein Qualitätsmaß gewählt, das der Grundidee, Pfade durch Vermeidung verschiedener Routeneigenschaften zu verbessern, folgt. So soll eine berechnete Route, deren Wege verschiedener semantischer Kategorien gleich lang oder kürzer sind als die der zugehörigen präferierten Route, optimal bewertet werden, auch wenn ihr Verlauf räumlich abweicht. Ein Weg, der 50 m in Innenbereichen verläuft und drei Türen beinhaltet, soll also beispielsweise als ideal gewertet werden, wenn die entsprechende Route des Referenzstandards 60 m durch Innenbereiche und durch fünf Türen führt. Diese Spezifikation stellt eine Limitation dar, so könnte ein Nutzer beispielsweise die Präferenz haben, auf jedem seiner Wege mindestens 20 % Wege in Außenbereichen zu gehen. Das gewählte Qualitätsmaß entspricht aber dem Ansatz, verschiedene Pfadelemente zu gewichten, durch den sich diese Einschränkungen bereits ergeben, wie in Unterabschnitt 3.4.3 „Separierbarkeit der Routenelemente“ erörtert.

Um also *Node*-, *Edge*- oder *Leveledge*-Kategorien, die in einer berechneten Route häufiger auftreten als in einer Nutzeroute, mittels des Ähnlichkeitsmaßes schlecht zu bewerten, fließen diese als Maluspunkte ein. So werden zunächst alle semantischen Kategorien (siehe Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“) an *Nodes* betrachtet. Kategorien, in denen die Anzahl der zugehörigen *Nodes* in der berechneten Route höher ist als in der entsprechenden Route des Referenzstandards, werden mit einem Maluspunkt bewertet. Analog dazu wird dann ermittelt, wie viele *Edges* der verschiedenen Kategorien in berechneten Routen häufiger vorkommen. Auch diese Kategorien fließen jeweils mit 1 in die Gesamtbewertung ein. Dadurch sollen die *Gewichtungsfaktoren* $t_{<\text{Kategorie}(\text{Edge})>}$ (vergleiche Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“) optimiert werden, welche unabhängig von der Länge der *Edges* in die Kostenfunktion einfließen. Ebenfalls wird jeweils ein Maluspunkt berechnet, wenn die Gesamtlänge der *Edges* einer Kategorie in der

berechneten Route höher ist als in der präferierten. Dadurch sollen die *Faktoren* $u_{\text{Kategorie(Edge)}}$, die die Länge der *Edges* gewichten, berücksichtigt werden. Zuletzt werden die verschiedenen Kategorien von *Leveledges* betrachtet. So gibt es jeweils einen Maluspunkt, wenn deren Gesamtzahl in der berechneten Route höher ist als in der präferierten, wenn es also mehr Stockwerke gibt, die durch eine bestimmte Art von Stockwerksübergängen überwunden werden, wodurch das Konzept der *Gewichtungsfaktoren* $w_{\text{Kategorie(Leveledge)}}$ aufgegriffen wird. Weiterhin gibt es entsprechend der *Faktoren* $v_{\text{Kategorie(Leveledge)}}$ einen Maluspunkt pro *Leveledges*-Kategorie, wenn mehr zu Treppenhäusern aggregierte Treppen oder Rolltreppen bzw. zu Aufzugschächten aggregierte *Leveledges* der Kategorie „Aufzug“ in der berechneten Route vorkommen, unabhängig von der Zahl der einzelnen Stockwerke, die dabei durchquert werden. Gleichung 4.1 fasst die aufgeführten Spezifikationen zusammen. Zur Veranschaulichung der Idee dieses Ähnlichkeitsmaßes soll das zuvor genannte Beispiel mit einer präferierten Route aufgegriffen werden, die 60 m Wege in Innenbereichen und fünf Türen umfasst. Die Qualität einer berechneten Route mit 70 m in Innenbereichen und fünf Türen wird somit mit 1 bewertet. Eine Route, deren Wege in Innenbereichen länger sind und die zusätzlich mehr Türen enthält, wird mit 2 bewertet.

Es lässt sich nun die Sinnhaftigkeit des einheitlich gewählten Malus-Wertes von 1 hinterfragen. So mag es beispielsweise falsch erscheinen, die Anzahl an Aufzügen gleich stark in die Bewertung einfließen zu lassen wie die Länge der Wege in Innenbereichen. Jedoch würde eine ideale Bewertungsfunktion die Kenntnis der Präferenzrelationen der verschiedenen Kategorien voraussetzen. Für diese müssten somit die *Gewichtungen*, die ja gerade durch das geplante Verfahren ermittelt werden sollen, bekannt sein. Da aber vorab nicht beurteilt werden kann, auf welche Kriterien NutzerInnen insbesondere achten, werden alle Eigenschaften durch das Ähnlichkeitsmaß gleich bewertet.

Durch Festlegung bestimmter *Gewichtungsausprägungen* kann nun zu jeder der 221 präferierten Routen eine Route mit gleichem Start und Ziel generiert und jeweils die Ähnlichkeit bestimmt werden. Zur Bewertung eines Systems bzw. der gewählten *Gewichtungen*, die Einfluss auf die Routenführung nehmen, wird, dem Ansatz von Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) folgend, der Durchschnitt der 221 Ähnlichkeitsbewertungen berechnet. Für die Qualität eines Vektors festgelegter *Gewichtungsfaktoren* gilt somit Gleichung 4.2:

$$\begin{aligned} \text{Qualität(Gewichtungen)} &= \\ &= -\frac{1}{|\text{Routen des Referenzstandards}|} \sum_{r \in \text{Routen des Referenzstandards}} \text{Ähnlichkeit}(b_r, p_r) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Ähnlichkeit}(b, p) = & \sum_{k \in \text{Kategorien(Node)}} n(k, b, p) \\ & + \sum_{k \in \text{Kategorien(Edge)}} e_{\text{Anzahl}}(k, b, p) + \sum_{k \in \text{Kategorien(Edge)}} e_{\text{Länge}}(k, b, p) \\ & + \sum_{k \in \text{Kategorien(Leveledge)}} l_{\text{Anzahl}}(k, b, p) + \sum_{k \in \text{Kategorien(Leveledge)}} l_{\text{aggregiert}}(k, b, p) \end{aligned} \quad (4.1)$$

b := berechnete Route

p := präferierte Route

$n(k, b, p)$ = 1, wenn Anzahl der Nodes vom Typ k in b
 > Anzahl der Nodes vom Typ k in p.

= 0, sonst

$e_{\text{Anzahl}}(k, b, p)$ = 1, wenn Anzahl der Edges vom Typ k in b
 > Anzahl der Edges vom Typ k in p.

= 0, sonst

$e_{\text{Länge}}(k, b, p)$ = 1, wenn Gesamtlänge der Edges vom Typ k in b
 > Gesamtlänge der Edges vom Typ k in p.

= 0, sonst

$l_{\text{Anzahl}}(k, b, p)$ = 1, wenn Anzahl der durch Leveledges durchschrittenen Stockwerke vom Typ k in b
 > Anzahl der durch Leveledges durchschrittenen Stockwerke vom Typ k in p.

= 0, sonst

$l_{\text{aggregiert}}(k, b, p)$ = 1, wenn Anzahl der aggregierten Leveledges vom Typ k in b
 > Anzahl der aggregierten Leveledges vom Typ k in p.

= 0, sonst

Die so berechnete Qualität eines Vektors aus *Gewichtungsausprägungen* soll im Folgenden als *Fitness* bezeichnet werden (weitere Begriffsdefinitionen finden sich in Unterabschnitt 4.4.3 „Festlegung eines Vokabulars“).

Ungewöhnlich mag noch erscheinen, dass besonders ähnliche Routen mit 0 bewertet werden, während höhere Werte eine schlechtere Übereinstimmung indizieren. Im

festgelegten Qualitätsmaß ist die Ähnlichkeitsfunktion deshalb mit einem negativen Vorzeichen versehen, sodass der höchste Wert bei 0 liegt und das Optimum darstellt.

4.4 Optimierung

Aufbauend auf der Festlegung der *Fitnessfunktion* soll nun eine Belegung an *Gewichtungsfaktoren* gefunden werden, die dieses Qualitätsmaß maximiert. Das Optimierungsproblem kann somit durch Gleichung 4.3 ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} \text{optimale Gewichtungen} &= \\ &= \arg \max_{\text{Gewichtungen}} (\text{Qualität}(\text{Gewichtungen})) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Da zahlreiche semantische Kategorien von *Nodes*, *Edges* und *Leveledges* existieren, von denen nicht angenommen werden kann, dass eine Gewichtung dieser Elemente Einfluss auf den Verlauf von Routen nimmt, werden nicht alle Kategorien für die Qualitätsfunktion und weiterhin für die Optimierung berücksichtigt. So werden beispielsweise *Nodes* der Kategorie Toilette nicht gewichtet, da diese ohnehin nicht auf potentiellen Routen liegen und nur Start- oder Zielpunkte des Navigationssystems darstellen. Weiterhin können einige *Nodes*, beispielsweise der Kategorie elektrische Flurtür, zwar potentiell Einfluss auf die Präferenz von Routen nehmen, allerdings ist diese Kategorie zeitlich erst nach der durchgeföhrten Optimierung in das Umgebungsmodell integriert worden, sodass auch für diese im Folgenden keine *Gewichtungsfaktoren* bestimmt werden. Für die Berechnung der Qualität und weiterhin für die zu optimierenden *Gewichtungsfaktoren* werden die folgenden Kategorien von *Nodes*, *Edges* und *Leveledges* ausgewählt:

- *Node*-Kategorien

 Flurtür,  Raumtür,  Karussell-Flurtür

- *Edge*-Kategorien

 Überdachter Fußweg,  Unüberdachter Fußweg,
 Geschlossener Bereich,  Stufen,  Rampe,
 Unterführung,  Straßenübergang

- *Leveledge*-Kategorien

 Treppe,  Rampe,  Aufzug

Von den Routen des Referenzstandards werden vorab 20 % entfernt und nicht zur Optimierung herangezogen. Diese werden zur Evaluation der Ergebnisse verwendet, genauer wird hierauf in Unterabschnitt 4.5.1 „Evaluation“ eingegangen.

4.4.1 Optimierungsverfahren

Bei der Wahl eines geeigneten Verfahrens zur Minimierung der *Fitnessfunktion* müssen deren Eigenschaften berücksichtigt werden. So besitzt das Qualitätsmaß zum einen eine hohe Dimensionalität, da sich aufgrund der genannten Kategorien insgesamt 23 zu trainierende *Gewichtungsfaktoren* ergeben. Selbst bei Performanzsteigerungen der *Fitness*-Ermittlung eines *Gewichtungsvektors* ist es dadurch nicht möglich, den gesamten Suchraum systematisch abzutasten. Weiterhin ist es nicht möglich, die 23 *Faktoren* zu separieren, um diese unabhängig voneinander zu optimieren, deren Abhängigkeit lässt sich durch ein einfaches Beispiel aufzeigen: So liegen in Innenbereichen mehr Flurtüren als in Außenbereichen, sodass eine höhere Gewichtung überdachter Wege gleichzeitig zu einer Vermeidung von Flurtüren führt.

Weiterhin ist die Suchlandschaft weder stetig noch differenzierbar, da selbst kleinste Änderungen eines *Gewichtungsfaktors* zu einem „Umkippen“ der Routenberechnung führen können, sodass die kostenminimierendsten Pfade mit einem Mal gänzlich von den zuvor ermittelten Pfaden abweichen. Diese Eigenschaft der *Fitnessfunktion* soll anhand eines berechneten Pfades mit drei Flurtüren veranschaulicht werden. So ist es denkbar, dass ein solcher Pfad das Optimum aller Routensuchen darstellt, deren *Gewichtungsfaktor* $s_{\text{Flurtür}}$ unterhalb einer bestimmten Zahl liegt. Bei Werten über dieser Zahl ergibt sich dann allerdings eine Route, die keine einzige Tür enthält, dafür aber eine weit längere Strecke durch Außenbereiche aufweist. Es kommt somit zu einer Sprungstelle der Funktion. Aufgrund dieser Eigenschaften ist die Qualitätsfunktion für die Anwendung eines Gradientenabstiegsverfahrens eher ungeeignet. So rät beispielsweise Salomon (1998) bei nicht differenzierbaren Funktionen von Gradientenabstiegsverfahren ab und empfiehlt stattdessen eine Optimierung mittels eines evolutionären Algorithmus.

Eine zusätzlich zu beachtende Schwierigkeit liegt darin, dass von einer zerklüfteten Suchlandschaft ausgegangen werden muss, die zahlreiche lokale Maxima aufweist. Zur Veranschaulichung anhand eines Beispiels soll angenommen werden, dass NutzerInnen des Navigationssystems die Präferenz haben, Flurtüren zu vermeiden. Wie bereits beschrieben, führen hohe *Gewichtungen* überdachter Wege deshalb zu einer besseren Qualitätsbewertung, da dadurch auch die problematischen Türen umgangen werden. Dabei könnte ein Gradientenabstiegsverfahren allerdings in ein lokales Optimum der *Fitnessfunktion* führen, da NutzerInnen möglicherweise die zusätzliche Präferenz haben könnten, überdachte Wege zu bevorzugen, sofern diese keine Türen enthalten. Das globale Maximum der Funktion könnte in diesem einfachen Beispiel deshalb vielmehr durch eine hohe *Gewichtung* von Flurtüren und unüberdachten Bereichen erreicht werden. Auch im Hinblick auf diese Schwierigkeit eignen sich, wie beispielsweise in Salomon (1998) und Frenzel (1993) beschrieben wird, evolutionäre Algorithmen besser als Gradientenabstiegsverfahren. So seien

evolutionäre Algorithmen laut Salomon (1998) aufgrund der an mehreren Punkten arbeitenden Suchstrategie im Speziellen geeignet, lokalen Optima zu entkommen.

Um die aufgeführten Eigenschaften der *Fitnessfunktion* zu visualisieren, wird ein kleiner Bereich eines Querschnitts der Funktion abgetastet. Hierfür werden äquidistant liegende Ausprägungen des *Faktors* $u_{\text{überdachte Fußwege}}$, der die Länge von *Edges* der Kategorie „überdachte Fußwege“ gewichtet, gewählt. Diese werden mit unterschiedlichen Belegungen der *Faktoren* $s_{\text{Flurtür}}$, $s_{\text{Raumtür}}$, $s_{\text{Karussell-Flurtür}}$ kombiniert, wobei die drei *Faktoren*, die die Anzahl der *Nodes* dieser Kategorien gewichten, jeweils gleichgesetzt werden. Die restlichen *Faktoren* werden zur Erzeugung der Grafik mit den minimalen Werten 0 (s,t,v,w) bzw. 1 (u) belegt (siehe Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“). Für die so erstellten $200 \times 200 = 40000$ *Gewichtungsvektoren* wird dann jeweils mittels der 221 Routen des Referenzstandards die *Fitnessfunktion* berechnet und dargestellt. Abbildung 4.5 zeigt das Ergebnis dieser Verfahrensweise. Dabei gilt es zu beachten,

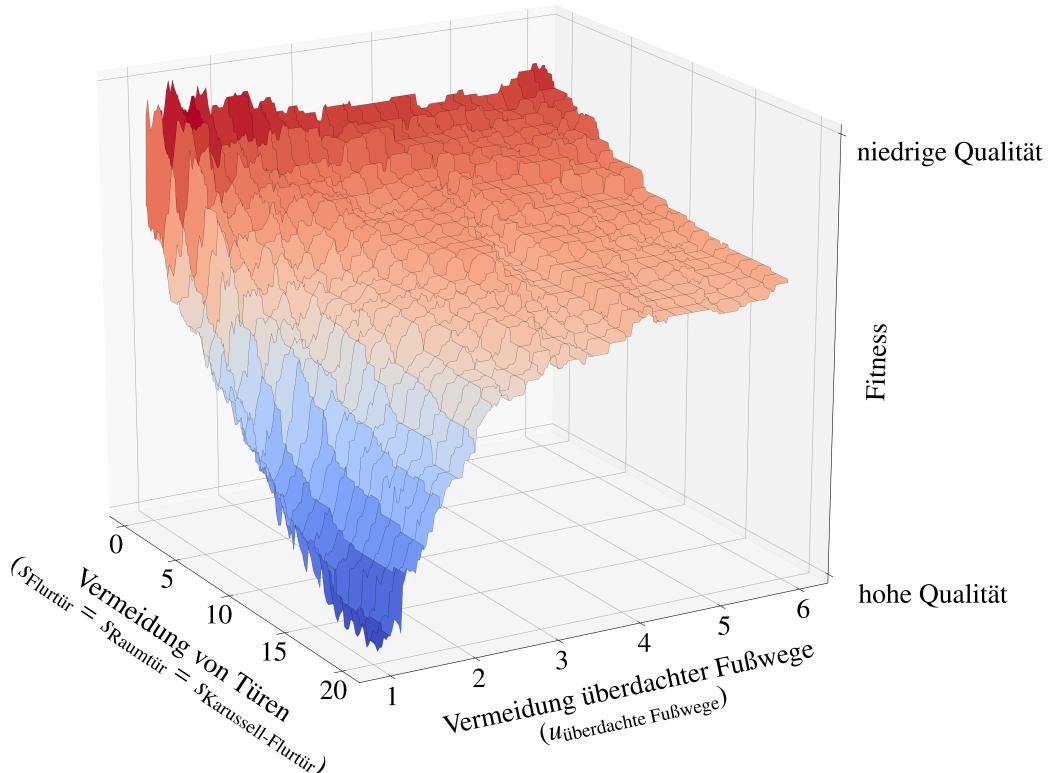


Abbildung 4.5: Querschnitt der Fitnessfunktion in Abhängigkeit einiger exemplarischer Gewichtungen

dass das theoretische Maximum, also das Optimum der *Fitnessfunktion*, das den Wert 0 hat, unten liegt, während negative Ausprägungen, die eine schlechtere Anpassung an die präferierten Routen indizieren, weiter oben liegen. Die Abhängigkeit der *Faktoren* lässt sich klar anhand der Grafik erkennen: Wenn Türen nicht vermieden werden

($s_{\text{Flurtür}} = s_{\text{Raumtür}} = s_{\text{Karussell-Flurtür}} \approx 0$), führt eine Vermeidung überdachter Wege ($u_{\text{überdachte Fußwege}} \approx 5$) zu einer leichten Verbesserung des Qualitätsmaßes. Wenn Türen jedoch umgangen werden ($s_{\text{Flurtür}} = s_{\text{Raumtür}} = s_{\text{Karussell-Flurtür}} \approx 15$), führt eine Vermeidung überdachter Fußwege ($u_{\text{überdachte Fußwege}} \approx 5$) zu wesentlich schlechterer *Fitness*, als wenn die Länge dieser Wege niedrig gewichtet wird ($u_{\text{überdachte Fußwege}} \approx 1$). Auch zahlreiche lokale Maxima und Sprungstellen lassen sich erkennen. Die Grafik vermittelt den Eindruck, dass diese im Gegensatz zum Gesamtverlauf der Funktion eher gering ausfallen. Es kann jedoch nicht unterstellt werden, dass der blau eingefärbte Bereich der Abbildung tatsächlich auf das globale Maximum der Funktion zusteuer, da die exemplarisch herangezogenen *Faktoren* nur in einem kleinen Bereich abgetastet sind. Weitere zweidimensionale Querschnitte der Funktion, die die hier erörterten Eigenschaften aufzeigen, finden sich in Unterabschnitt 4.5.2 „Interpretation“.

In der Arbeit von Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015), die bereits in Unterabschnitt 3.1.5 „Datengebundene Ansätze“ vorgestellt und aufgrund der zahlreichen Parallelen zur vorliegenden Arbeit an mehreren Stellen referenziert worden ist, ergibt sich zur Optimierung von Fahrzeug-Routen ein ähnliches Optimierungsproblem. Die Autoren schreiben ebenfalls, dass die von ihnen zu optimierende Qualitätsfunktion nicht differenzierbar sei und dass zahlreiche Plateaus und lokale Optima existieren würden. Dennoch wird ein Gradientenabstiegsverfahren genutzt, indem durch Modifikation zufällig gewählter *Gewichtungsfaktoren* verschiedene Permutationen eines *Gewichtungsvektors* erzeugt werden würden. Iterativ werde dann ein neues Optimum innerhalb dieser Menge ermittelt. Um den sich durch Plateaus und lokalen Optima ergebenden Schwierigkeiten bei der Verwendung eines Gradientenabstiegsverfahrens entgegenzuwirken, erweitern Delling et. al. das Gradientenabstiegsverfahren zusätzlich. So solle verhindert werden, dass der Gradientenabstieg an Plateaus, bei denen es sich um Bereiche handelt, in denen keine Änderung einer *Gewichtung* zu einer Verbesserung führt, endet, indem auch Änderungen ermöglicht werden, die in einer gleichbleibenden Qualitätsbewertung resultieren. Weiterhin solle verhindert werden, dass der Algorithmus in lokalen Optima terminiere. Dazu würden präferierte Routen, welche insbesondere stark von den generierten Routen abweichen, mit einem höheren Faktor in die Qualitäts- bzw. *Fitnessfunktion* einfließen.

Abweichend zu Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit kein speziell angepasstes Gradientenabstiegsverfahren, sondern ein evolutionärer Algorithmus verwendet, da dieser, wie beschrieben, geeignet ist, um ohne weitere Anpassungen Optima trotz zerklüfteter Struktur der Suchlandschaft zu finden. Es sei an dieser Stelle jedoch auf die Parallelen beider Optimierungsverfahren hingewiesen. So schreibt Salomon (1998), dass die Ähnlichkeit evolutionärer Algorithmen zu Gradientenabstiegsverfahren häufig unterschätzt würde und dass evolutionäre Algorithmen, je nach Sichtweise, auch als pfadfolgende („path-following“)

Verfahren betrachtet werden könnten. Während in Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) Komponenten eines Vektors iterativ permutiert werden, existieren in einem evolutionären Algorithmus mehrere *Gewichtungsvektoren*, die ebenfalls permutiert und darüber hinaus optional rekombiniert werden – in den folgenden Abschnitten wird genauer auf diese Aspekte eingegangen. Die von Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) erreichte Optimierung mittels Gradientenabstieg ist demnach ein Indikator für die Eignung eines evolutionären Algorithmus, da gezeigt wird, dass der Suchraum strukturiert genug ist, um Extrema anhand eines solchen iterativen Verfahrens zu bestimmen.

4.4.2 Evolutionsstrategie

Beyer, Beyer, Schwefel und Schwefel (2002) beschreiben die von Rechenberg (1965, 1971); Schwefel (1965, 1975) begründeten Evolutionsstrategien („evolution strategies“) als eine der langfristig erhalten gebliebenen und damit wichtigsten Optimierungsverfahren der Gruppe evolutionärer Algorithmen. Wie beispielsweise in Hoffmeister und Bäck (1991) beschrieben wird, sind die Komponenten der von Evolutionsstrategien zu optimierenden Vektoren reellwertig, im Gegensatz zu genetischen Algorithmen, bei denen Binärvektoren vorliegen. Der Begriff reellwertiger Zahlen wird hier bewusst verwendet, da es Eiben und Smith (2003) zufolge allgemein üblich ist, die Diskretisierung, die aufgrund der verwendeten Hardware erfolgt, zu vernachlässigen. Evolutionsstrategien eignen sich deshalb, um die metrisch skalierten *Gewichtungsfaktoren* hinsichtlich der definierten *Fitnessfunktion* zu optimieren.

Bei einer Evolutionsstrategie bilden die aus verschiedenen *Gewichtungsausprägungen* bestehenden Vektoren ($s_{\text{Flurtür}}, s_{\text{Raumtür}}, \dots, w_{\text{Aufzug}})^T$ die Individuen einer Population. In einem Iterationsschritt des Algorithmus wird eine Teilmenge der Population anhand der *Fitnessfunktion* selektiert, aus den Vektoren dieser Teilmenge wird dann eine neue Generation erzeugt. Hierfür können die Individuen der Kindgeneration optional durch Kombination verschiedener Vektoren der selektierten Elterngeneration gebildet werden. Weiterhin werden Merkmale der Vektoren mutiert, meist durch Addition einer normalverteilten Zufallsvariable.

In einem ersten Ansatz wird nun eine einfache Evolutionsstrategie implementiert. In einem nächsten Schritt wird weiterhin die CMA-Evolutionsstrategie (Hansen, Müller & Koumoutsakos, 2003; Hansen & Ostermeier, 2001) zur Ermittlung eines Optimums eingesetzt. Der höchste Wert der definierten Qualitätsfunktion kann abschließend anhand einer länger andauernden Optimierung mittels CMA-ES gefunden werden.

4.4.3 Festlegung eines Vokabulars

Ein evolutionärer Algorithmus hängt von unterschiedlichen *Parametern* ab, die Einfluss auf den Erfolg und die benötigte Zeit der angestrebten Optimierung nehmen, wie beispielsweise in Eiben und Smit (2011) beschrieben wird.

Bevor näher auf die Wahl geeigneter *Parameter* eingegangen wird, soll hier zunächst ein Vokabular definiert werden, um bestimmte Sachverhalte eindeutig referenzieren zu können und um die Optimierung einer Evolutionsstrategie begrifflich klar von der Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* abzutrennen. Den festgelegten Begriffen liegt dabei die in Eiben und Smit (2011) aufgelistete Namensgebung zugrunde, die im Folgenden jeweils in Klammern ergänzt wird.

Es werden die ursprünglich zu optimierenden *Faktoren* zur Gewichtung verschiedener Pfadelemente im Rahmen der vorliegenden Arbeit, wie bereits in den letzten Abschnitten geschehen, als *Gewichtungsfaktoren* bezeichnet, die sich jeweils zu einem *Gewichtungsvektor* zusammenfassen lassen. In Eiben und Smit (2011) findet sich hierfür der allgemeinere Begriff der Lösungsvektoren („solution vectors“), der von dieser konkreten Anwendung abstrahiert. In Unterscheidung dazu werden die Charakteristika einer Evolutionsstrategie schlicht als *Parameter* bezeichnet, deren Ausprägungen sich in Form eines *Parametervektors* („parameter vector“) zusammenfassen lassen. Von Eiben und Smit (2011) werden dabei qualitative und quantitative *Parameter* unterschieden, wobei auf die abweichenden Bezeichnungen hingewiesen wird, die für diese Kategorien in unterschiedlichen Publikationen vergeben würden. Bei den qualitativen *Parametern* handele es sich um bei der Implementierung zu treffende Festlegungen, wie beispielsweise das Selektionsverfahren von Eltern für die Erzeugung der nächsten Generation oder die Art der Rekombination dieser Eltern-Vektoren. Im Gegensatz dazu würden die quantitativen *Parameter* Kennwerte darstellen, wie beispielsweise die Populationsgröße oder die Mutationsrate. Zur Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* ist in Abschnitt 4.3 „Qualitätsmaß“ eine Heuristik definiert worden, für die bereits der Begriff der *Fitness* („fitness“) eingeführt worden ist. Analog muss zur Optimierung der *Parameter* ein Maß definiert werden, das die Eignung eines *Parametervektors* im Hinblick auf die Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* quantifiziert. In Übereinstimmung mit Eiben und Smit (2011) wird hierfür der Begriff der *Utility* gewählt.

4.4.4 Optimierung der *Parameter*

Wie Eiben und Smit (2011) schreiben, existiert nach Wolpert und Macready (1995) kein allgemeingültiger *Parametersatz*, der unabhängig von einer zu analysierenden Funktion optimal geeignet ist, Extremwerte zu bestimmen. Die Ermittlung geeigneter *Parameter* stelle somit eine der wesentlichsten Herausforderungen beim Einsatz evolutionärer Algorithmen dar. In diesem Unterabschnitt wird deshalb auf das sich

ergebende Optimierungsproblem eingegangen, das Ähnlichkeit zur ursprünglichen Ermittlung optimaler *Gewichtungsvektoren* aufweist. So seien die Parameter Eiben, Michalewicz, Schoenauer und Smith (2007) zufolge nicht unabhängig, den Suchraum systematisch abzutasten ist aufgrund des exponentiellen Zeitaufwands jedoch unmöglich.

Die Auswahl geeigneter Parameter lasse sich laut Eiben et al. (2007); Eiben und Smit (2011) grundlegend in zwei Ansätze unterteilen. So werde beim *Parameter-Tuning* vorab ein optimaler *Parametervektor* ermittelt – anhand dieser Konfiguration wird anschließend optimiert. Im Gegensatz dazu würden die Parameter beim *Parameter-Control* während der Laufzeit des Algorithmus variiert. Kramer (2010) gibt eine Übersicht über verschiedene Ansätze des *Parameter-Control* und beschreibt als Beispiel eines adaptiven Verfahrens die nach Rechenberg (1973) definierte 1/5-Erfolgsregel, bei der die Stärke der Mutation abhängig von der Erfolgsrate angepasst wird. Zunächst wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch der einfachere Ansatz des *Parameter-Tunings* verfolgt. Hierfür wird die *Utility* unterschiedlicher *Parametervektoren* verglichen, wie im Folgenden genauer beschrieben wird. Aufgrund der Vorteile, die das *Parameter-Control*-Verfahren laut Eiben et al. (2007) gegenüber dem verbreiteten *Parameter-Tuning* biete, werden die implementierten Ansätze im Weiteren, wie bereits erwähnt, mit der Evolutionsstrategie CMA verglichen, bei der *Parameter-Control* durch ein adaptives Verfahren erfolgt (siehe Unterabschnitt 4.4.6 „CMA-ES“).

Eiben und Smit (2011); Eiben und Smith (2003) geben eine Übersicht über verschiedene Verfahren zum *Parameter-Tuning*. So müsse für die Optimierung zunächst ein *Utility*-Maß festgelegt werden, das es dann zu maximieren gelte. Hierfür könne beispielsweise die erreichte *Fitness* nach einer festgelegten Zeitspanne gemessen werden oder alternativ die Zeitspanne, die nötig ist, einen festgelegten *Fitness*-Wert zu erreichen. Da der Ausgang eines einzelnen Durchlaufs einer Evolutionsstrategie vom Zufall bestimmt sei, bedürfe es zudem mehrerer Testläufe, deren Resultate dann gemittelt werden müssten, um die *Utility* unterschiedlicher *Parametervektoren* sinnvoll vergleichen zu können. Somit ergibt sich ein weiteres Beispiel eines *Utility*-Maßes, das von Eiben aufgeführt wird, durch Ermittlung des Anteils der Läufe einer Evolutionsstrategie, die nach einer festgelegten Zeitspanne einen festgelegten *Fitness*-Wert erreichen.

Aufgrund der unbekannten Bandbreite der sich ergebenden *Fitness*-Werte und um insgesamt die für das *Parameter-Tuning* benötigte Zeit begrenzen zu können, wird zur Berechnung der *Utility* festgelegt, dass ein Durchlauf einer Evolutionsstrategie mit einem bestimmten *Parametervektor* jeweils eine feste Zeit andauern soll. Danach wird die maximal erreichte *Fitness* der aus Gewichtungsvektoren bestehenden Population ermittelt. Abbildung 4.6 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf von fünf Durchläufen einer Evolutionsstrategie mit festem *Parametervektor*. Nachdem

vorab einige solche *Fitness*-Verläufe protokolliert worden sind, wie sie in Abbildung 4.6 dargestellt sind, wird die Festlegung einer Zeitspanne von drei Stunden getroffen. So lässt die Grafik erkennen, dass es in diesem Zeitraum zu einer erkennbaren Verbesserung der *Fitness* kommt und der Grad des Abstiegs am Ende der Kurve bereits wieder deutlich abflacht. Weiterhin lässt sich ablesen, dass beispielsweise ein Zeitraum von 30 Minuten deutlich zu kurz wäre, da erst nach dieser Laufzeit die *Fitness* der ersten Generation aus Gewichtungsvektoren vorliegt. Andererseits ist die Zeitspanne von drei Stunden kurz genug, um die zum *Parameter*-Tuning insgesamt benötigte Zeit in einem geeigneten Rahmen zu halten, weshalb kein höherer Wert gewählt wird.

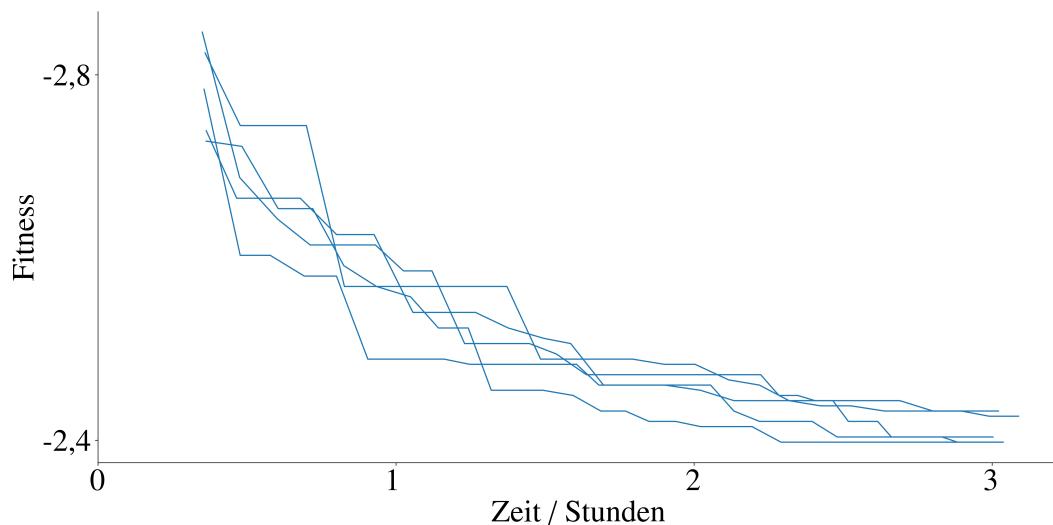


Abbildung 4.6: Zeitliche Änderung der *Fitness* von fünf Durchläufen mit einem beispielhaften Parametervektor

Eine naheliegende Möglichkeit, um einen Kennwert zu erhalten, anhand dessen unterschiedliche *Parametervektoren* verglichen werden können, bestünde nun darin, das arithmetische Mittel der *Fitness* nach Verstreichen der festgelegten Zeitspanne zu berechnen. Wie bereits erwähnt, führt ein systematischer Vergleich solcher Mittelwerte verschiedener *Parameter*-Kombinationen allerdings zu einem enormen Zeitaufwand. Um mit diesem Problem umzugehen, werden im Rahmen dieser Arbeit unterschiedliche Strategien verfolgt. Soweit dies sinnvoll möglich ist, werden Parameter zunächst anhand aus dem vorliegenden Optimierungsproblem resultierender Überlegungen festgelegt. Dabei handelt es sich vorwiegend um qualitative Parameter, durch die der Ablauf des implementierten Algorithmus definiert wird. Dieser wird in Unterabschnitt 4.4.5 „Entwicklung des Algorithmus“ beschrieben. Obwohl versucht wird, diese begründet anhand einschlägiger Literatur zu wählen, liegt diesem Prozess eine gewisse informierte Willkür zugrunde, was ebenfalls für die Sinnhaftigkeit des

Vergleichs mit einem alternativen Verfahren spricht, wie er in Unterabschnitt 4.4.6 „CMA-ES“ erfolgt.

Ein weiterer Ansatz, durch den das *Parameter*-Tuning wesentlich verkürzt wird, liegt in der Auswahl der Anzahl an Durchläufen pro *Parametervektor*. Um diese sinnvoll zu begrenzen, führen Eiben und Smit (2011) das von Maron und Moore (1997) vorgestellte Racing-Verfahren auf. Statt der genannten Berechnung des arithmetischen Mittels könnten unterschiedliche *Parametervektoren* verglichen werden, indem so lange neue Durchläufe der Evolutionsstrategie ausgeführt würden, bis sich die *Fitness*-Werte eines *Parametervektors* nach Ablauf der drei Stunden signifikant von denen des zu vergleichenden *Parametervektors* unterscheiden würden. Da es lediglich die *Parameter* mit der besten *Utility* zu ermitteln gilt und kein komplettes Ranking erfolgen soll, werden Modelle, die signifikant schlechter abschneiden als die eines anderen *Parametersatzes*, aus dem Racing-Verfahren ausgeschlossen. Hierbei wird sichergestellt, dass zunächst mindestens zwölf Testdurchläufe erfolgen. Wie in Eiben und Smit (2011) als Möglichkeit aufgeführt, werden T-Tests für unabhängige Stichproben zum paarweisen Vergleich verwendet, als Signifikanzniveau wird $\alpha = 0,05$ festgelegt. Da die Signifikanztests lediglich der Erzeugung einer Heuristik zur Abschätzung einer sinnvollen Anzahl von Durchläufen dienen, erfolgt keine weitere Anpassung des Wertes. Als Maximum der Stichprobe wird ein Wert von 20 Durchläufen festgelegt.

Um die für das *Parameter*-Tuning benötigte Zeit zusätzlich zu verringern, werden *Parameter*-Kombinationen nicht erstellt, indem alle Werte systematisch abgetastet und kombiniert werden. Eiben und Smit (2011) unterscheiden hier nicht-iterative Verfahren, bei denen bereits zu Beginn der Tuning-Prozedur alle zu testenden *Parametervektoren* festgelegt werden, von iterativen Verfahren, bei denen diese im Verlauf des Optimierungsverfahrens generiert werden. Aufgrund der hohen Laufzeit zur Berechnung der Utility eines *Parametervektors* werden im Rahmen dieser Arbeit zunächst einige sinnvoll erscheinende *Parametersätze* evaluiert, weitere werden iterativ im Verlauf des Tuning-Verfahrens durch jeweils manuelle Anpassung der Werte hinzugefügt. Bäck und Schwefel (1993) sowie Eiben und Smith (2003) bieten einige grundsätzliche Hinweise zur Wahl verschiedener Parameter, im Speziellen im Falle der verbreiteteren genetischen Algorithmen, die mit binär- statt reellwertigen Lösungsvektoren arbeiten. Neben der grundsätzlichen Abhängigkeit der *Parameter* von der zu maximierenden Funktion wird die Auswahl von *Parametern* für das Tuning-Verfahren jedoch zusätzlich erschwert, da die zu optimierenden quantitativen *Parameter* von den zahlreichen qualitativen *Parametern* abhängen, die bei der Entwicklung der Evolutionsstrategie festgelegt werden müssen. Es fehlen somit Vergleichsdaten, weshalb für das Racing-Verfahren zunächst ein größerer Wertebereich der Parameter abgetastet wird. In den Bereichen um *Parametervektoren*

mit relativ hoher *Utility* erfolgt dann eine feingranularere Abtastung verschiedener *Parameter*-Kombinationen.

4.4.5 Entwicklung des Algorithmus

Im implementierten Algorithmus wird zunächst eine Population von μ *Gewichtungsvektoren* erzeugt. Unter Beachtung der unteren Schranken von 1 für die *Gewichtungsfaktoren* u und 0 für die *Faktoren* s,t,v,w werden die Merkmale zufällig gleichverteilt initialisiert. Als Maximum dieser Verteilung wird ein Wert von 10 festgelegt, da angenommen wird, dass die meisten der potentiell optimalen *Faktoren* diesen Wert nicht überschreiten: Ein *Gewichtungsfaktor* $u_{\text{unüberdachter Fußweg}} = 2$ würde beispielsweise bereits bedeuten, dass Wege mit einem *Faktor* von $u = 1$ bevorzugt werden, sofern diese weniger als die doppelte Länge aufweisen. Ein Iterationsschritt beginnt dann mit der Bewertung der aktuellen Population anhand der in Abschnitt 4.3 „Qualitätsmaß“ beschriebenen *Fitnessfunktion*.

Schwefel (1975) unterscheidet die zwei als $(\mu + \lambda)$ und (μ, λ) bezeichneten Ansätze von Evolutionsstrategien. Beyer et al. (2002) fassen zusammen, dass beim ursprünglichen Verfahren $(\mu + \lambda)$ die Population der Eltern mit der daraus entstehenden Kindgeneration der Größe λ zur Selektion zusammengeworfen werde. Vektoren mit hoher *Fitness* könnten deshalb über mehrere Generationen hinweg bestehen. Im Gegensatz dazu werde die Elterngeneration beim Ansatz (μ, λ) komplett durch die Kindgeneration ersetzt, weshalb immer mindestens μ Vektoren erzeugt werden müssten, um die Populationsgröße konstant zu halten (es gilt somit $\mu \leq \lambda$). Laut Eiben und Smith (2003) führe dieses Verfahren zu einer besseren Vermeidung lokaler Extremwerte, jedoch sei es möglich, dass es bei der Erzeugung einer neuen Generation zu einer Verschlechterung der *Fitness* komme.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden aufbauend auf diesen Grundprinzipien zwei verschiedene Verfahren entwickelt, die mittels des Racing-Verfahrens verglichen werden. Der Selektionsschritt läuft dabei jeweils dem in Eiben und Smith (2003) beschriebenen und nach Whitley (1988) definierten „steady-state“-Modell folgend in den zwei Phasen „Survivor-Selection“ und „Parent-Selection“ ab. Zuerst werden in der Survivor-Selection-Phase *Parametervektoren* ausgewählt, die in der nächsten Generation erhalten bleiben. Die übrigen Individuen werden von der Kindgeneration ersetzt. Da in dem an (μ, λ) angelehnten Verfahren die komplette Elterngeneration ersetzt wird, wird dieser Schritt bei diesem übersprungen – es werden keine Vektoren der Elterngeneration selektiert, die erhalten bleiben. Im Gegensatz dazu wird im an $(\mu + \lambda)$ angelehnten Verfahren eine bestimmte Anzahl an Vektoren bestimmt, die weiter fortbestehen. Die Größe dieser Menge stellt einen quantitativen Parameter dar, der variiert und im Racing-Verfahren verglichen wird. Laut Eiben und Smith (2003) erfolgt die Selektion üblicherweise abhängig vom Alter oder durch ein Ranking der *Fitness*. Zur Abgrenzung von dem an (μ, λ) angelehnten Verfahren,

wird das rangabhängige Selektionsverfahren implementiert, sodass bei dem nach $(\mu + \lambda)$ implementierten Ansatz keine Verschlechterung der *Fitness* eintreten kann. Die Vektoren mit den geringsten *Fitness*-Werten werden also von der Kindgeneration ersetzt, die in diesem Ansatz folglich kleiner sein muss als die Gesamtpopulation.

Nach dieser ersten Auswahl erfolgt bei beiden der entwickelten Verfahren die sogenannte Parent-Selection. Hierbei wird ermittelt, welche der Vektoren zur Erzeugung der nächsten Generation herangezogen werden. Bei dem Verfahren, in dem in Anlehnung an $(\mu + \lambda)$ nur ein Teil der Elterngeneration ersetzt wird, kommen hierfür ausschließlich die nach dem Survivor-Selection verbleibenden Vektoren in Frage. Im Gegensatz dazu wird beim Verfahren nach (μ, λ) zur Auswahl die gesamte Menge der Elterngeneration in Betracht gezogen. Die naheliegende Möglichkeit, die Eltern zufällig anhand der sich aus der ermittelten *Fitness* ergebenden Verteilung zu wählen, wird in Eiben und Smith (2003) als „Fitness Proportional Selection“ bezeichnet. Den Autoren folgend bringt diese den Nachteil mit sich, dass besonders gut bewertete Lösungsvektoren schnell die gesamte Population einnehmen. Stattdessen wird deshalb das ebenfalls in diesem Buch beschriebene Verfahren der „rank-based selection“ verwendet. Hierzu wird jeweils der Rang der Individuen ermittelt, indem diese in aufsteigender Reihenfolge nach *Fitness* sortiert werden. Dann wird, genau wie beim „Fitness Proportional Selection“-Verfahren, ein Vektor zufällig ausgewählt, wobei die relative Wahrscheinlichkeit der Ziehung dem zugeordneten Rang entspricht. Je nachdem, ob ein Lösungsvektor geklont oder rekombiniert wird, werden auf diese Weise ein oder zwei Vektoren ausgewählt.

Das beschriebene „steady-state“-Modell wird in Eiben und Smith (2003) vom klassischen „generational“-Modell unterschieden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das „steady-state“-Modell umgesetzt, da, wie in Eiben und Smith (2003) erwähnt, pro Iterationsschritt Kindgenerationen kleinerer Größe erzeugt werden. Es kommt deshalb im Verlauf der Optimierung zu vielen eher kleinen Änderungen der *Utility* statt zu wenigen Änderungen mit jeweils größeren *Utility*-Sprüngen, wie es beim „generational“-Modell der Fall wäre. Dies erscheint im Hinblick auf das Racing-Verfahren sinnvoll, da häufigere, weniger sprunghafte Änderungen der *Utility* zu einer glatteren Kurve führen (wie in Abbildung 4.6 dargestellt), was den Vergleich speziell bei kürzeren Durchläufen anschaulicher gestaltet. Es kann jedoch nicht argumentiert werden, dass das „steady-state“-Modell zu besseren Ergebnissen führt. Wie beschrieben, liegt dieser Festlegung somit eine gewisse Willkür zugrunde. Durch Umsetzung weiterer Verfahrensweisen könnte der implementierte Algorithmus sicherlich verbessert werden, der Umfang dieser Arbeit wird an dieser Stelle jedoch zugunsten des Vergleichs mit CMA-ES begrenzt.

Zur Realisierung der Rekombinationen kommen ebenfalls zahlreiche verschiedene Ansätze in Frage, wie beispielsweise von Bäck, Hoffmeister und Schwefel (1991); Bäck und Schwefel (1993) und Eiben und Smit (2011) aufgezeigt wird. Da

die zu optimierenden *Gewichtungsfaktoren* den Grad der Vermeidung von Elementen bestimmter semantischer Kategorien gegenüber anderen Pfadelementen darstellen, führt nicht ein einzelner *Faktor* zu einer besonders guten *Fitnessbewertung*, sondern vielmehr das Verhältnis eines *Faktors* zu einem oder mehreren anderen. Bei der Rekombination verschiedener Elternvektoren soll deshalb verhindert werden, dass Verhältnisse zwischen *Gewichtungen*, die zu einer guten *Fitness* führen, verloren gehen. Dies wäre beispielsweise bei einer globalen Rekombination der Fall, bei der Merkmale eines zu erzeugenden Vektors aus allen Vektoren der Elterngeneration zusammengesetzt werden können, wie in Bäck und Schwefel (1993) beschrieben. Es wird deshalb festgelegt, dass ein neuer Vektor zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit entweder durch Klonen eines Vektors oder durch Rekombination maximal zweier Vektoren der Elterngeneration zusammengesetzt wird. Die Rekombinationswahrscheinlichkeit soll Eiben und Smit (2011); Eiben und Smith (2003) folgend als p_c bezeichnet werden. Auch die konkreten Ausprägungen dieses quantitativen Parameters werden anhand des Tuning-Verfahrens verglichen. Weiterhin sollen zur Berechnung der Komponenten der neu erzeugten Vektoren keine Mittelwerte der Elterngeneration gebildet werden, wie es laut Bäck et al. (1991); Bäck und Schwefel (1993); Hoffmeister und Bäck (1991) bei der „intermediate“-Rekombination der Fall ist. Auch dadurch könnten Verhältnisse zu anderen *Gewichtungsfaktoren* verloren gehen. Stattdessen wird der von Bäck et al. (1991); Bäck und Schwefel (1993); Hoffmeister und Bäck (1991) als „discrete recombination“ bezeichnete Ansatz umgesetzt: Die Komponenten eines neuen Vektors, der aus zwei Elternvektoren zusammengesetzt wird, werden jeweils zufällig vom ersten oder vom zweiten Elternteil übernommen.

Nach der beschriebenen Generierung der neuen Vektoren werden die Komponenten mutiert. Dabei erfolgt eine Mutation einer Komponente jeweils zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, die den Ausführungen von Eiben und Smith (2003) folgend als Mutationsrate p_m bezeichnet werden soll. Eine Mutation erfolgt dann durch Addition einer normalverteilten Zufallszahl, was Eiben und Smith (2003) zufolge ein verbreitetes Verfahren ist, um die harten Grenzen einer uniformen Verteilung zu vermeiden. Die Standardabweichung σ der Verteilung, die üblicherweise als „mutation step size“ bezeichnet wird, bildet einen weiteren quantitativen Parameter, der im Racing-Verfahren variiert wird.

Bei der Mutation gilt es zudem, die durch den Suchalgorithmus entstehenden unteren Grenzen zu beachten (siehe Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“). Arabas, Szczepankiewicz und Wroniak (2010) zufolge existieren hierfür verschiedene Methoden, wobei es auch in diesem Fall kein Verfahren gibt, das den anderen im Allgemeinen überlegen ist. Anhand eines Vergleichs können die Autoren jedoch zeigen, dass sich mit dem sogenannte Resampling-Verfahren in den meisten Fällen gute Ergebnisse erzielen lassen, im Speziellen bei Versu-

chen mit einem 30-dimensionalem Vektorraum, was der Zahl der Gewichtungen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit optimiert werden sollen, nahe kommt. Im implementierten Mutationsverfahren wird deshalb bei einer Unterschreitung der festgelegten Schranke erneut mutiert, bis die Komponente im gültigen Wertebereich liegt. Dabei wird die zu mutierende Komponente beibehalten, um sicherzustellen, dass alle Gewichtungen mit der selben Wahrscheinlichkeit mutieren.

4.4.6 CMA-ES

Die beschriebene Entwicklung der Evolutionsstrategie zeigt, dass die notwendige Bestimmung qualitativer und quantitativer Parameter selbst eine nicht trivial zu lösende Aufgabe darstellt. Zahlreiche Parameter müssen entweder festgelegt oder in einem zeitaufwändigen Tuning-Verfahren evaluiert werden. Dies bestätigt die Ausführungen von Eiben et al. (2007): Die Autoren nennen *Parameter*-Tuning zwar als einen verbreiteten Ansatz, führen allerdings zahlreiche Vorteile einer Anpassung von Parametern während der Laufzeit des Algorithmus auf, wie es bei *Parameter*-Control-Verfahren der Fall ist. So sei das Tuning-Verfahren nicht nur aufwändig, es zeige sich auch, dass sich jeweils ideale *Parameter*ausprägungen während der Laufzeit eines Optimierungsprozesses verändern. Eiben et al. (2007) beschreiben weiterhin drei unterschiedliche Ansätze des *Parameter*-Control. So würden *Parameter*werte beim deterministischen *Parameter*-Control („deterministic parameter control“) durch eine vorab definierte Regel während der Laufzeit des Algorithmus verändert werden. Während deterministische Verfahren kein Feedback der Optimierung zur Anpassung nutzen würden, werde dieses bei adaptiven Verfahren zur Steuerung der Parameter herangezogen. Ein bekannten Beispiel eines adaptiven Verfahrens stellt somit die in Unterabschnitt 4.4.4 „Optimierung der *Parameter*“ bereits kurz erwähnte 1/5-Erfolgsregel dar. Abhängig von der aktuellen Erfolgsrate, die die Wahrscheinlichkeit darstellt, dass ein neu erzeugter Lösungsvektor eine bessere *Fitness* als sein Elternvektor aufweist, wird die Mutationsstärke σ bei diesem Ansatz entweder erhöht oder verringert. Als dritte Variante stellen Eiben et al. (2007) selbst-adaptive Verfahren (self-adaptive parameter control) vor. Bei diesen seien die *Parameter* Teil der Lösungsvektoren und werden somit rekombiniert und mutiert. Ein adaptiver Ansatz, der in Eiben et al. (2007); Eiben und Smith (2003); Kramer (2010) hervorgehoben wird, ist die „Covariance Matrix Adaption Evolutionsstrategie“ (CMA-ES) (Hansen et al., 2003; Hansen & Ostermeier, 2001). Wie in Hansen und Ostermeier (2001) beschrieben, werde die Standardabweichung der Mutation σ in diesem Optimierungsverfahren nicht global festgelegt. Stattdessen werde jede Komponente des Lösungsvektors mit separater Standardabweichung mutiert. Die Mutationsstärken würden dabei während der Laufzeit des Algorithmus anhand zu Verbesserungen führender Mutationen adaptiert. Weiterhin würden die Standardabweichungen mutierter Vektoren nicht separat betrachtet werden. Vielmehr seien

μ	Populationsgröße
λ	Anzahl der Nachkommen
p_c	Rekombinationswahrscheinlichkeit
p_m	Mutationsrate
σ	Mutationsstärke

Tabelle 4.2: Quantitative Parameter der entwickelten Evolutionsstrategie, deren Ausprägungen mittels des Racing-Verfahrens verglichen werden

Zusammenhänge zwischen den Mutationen verschiedener Komponenten in Form einer Kovarianzmatrix gespeichert. Falls also beispielsweise gemeinsame Erhöhungen der *Gewichtungsfaktoren* von Treppen und von Drehtüren häufig zu Verbesserungen führen, werden zukünftige Mutationen verstärkt in dieser sich ergebenden Achse erfolgen.

Eiben und Smith (2003) geben an, dass dieses Verfahren zu den führenden Algorithmen zur Optimierung komplexer reellwertiger Funktionen gehöre. Auch Kramer (2010) schreibt, dass CMA-ES für viele Jahre als der Stand der Technik gegolten habe. Der Autor weist allerdings ergänzend auf einen neueren selbst-adaptiven Ansatz CMSA-ES (Beyer & Sendhoff, 2008) hin. Anstatt die implementierte Evolutionssstrategie im Rahmen der vorliegenden Arbeit weiter zu verbessern, wird aufgrund der beschriebenen Entwicklungen verschiedener Verfahren ein alternativer Ansatz herangezogen. Da eine Implementation der Evolutionsstrategie CMA zum Zeitpunkt der Durchführung der Studie frei verfügbar gewesen ist, wird eine Optimierung anhand dieses Verfahrens durchgeführt. Die *Utility* wird auch für diesen Algorithmus ermittelt, wie im folgenden Unterabschnitt aufgezeigt wird. Hierbei muss beachtet werden, dass die *Utility* die Qualität der *Parameter* des zuvor entwickelten Algorithmus bewerten soll, jedoch kein geeignetes Maß darstellt, um diesen mit CMA-ES zu vergleichen. In Unterabschnitt 4.4.8 „Ergebnisse der Optimierung“ wird darauf genauer eingegangen.

4.4.7 Ergebnisse des Racing-Algorithmus

In Folge der in Unterabschnitt 4.4.5 „Entwicklung des Algorithmus“ beschriebenen Evolutionsstrategie ergeben sich Parameter, deren optimale Ausprägung es zu ermittelt gilt. Wie in Unterabschnitt 4.4.4 „Optimierung der Parameter“ beschrieben, wird deshalb die *Utility* verschiedener Wertekombinationen verglichen. Tabelle 4.2 gibt eine Übersicht der Parameter, welche im einzelnen bereits in Unterabschnitt 4.4.5 beschrieben worden sind.

Abbildung 4.7 stellt die Ergebnisse des Racing-Verfahrens der unterschiedlichen *Parametersätze* dar. Jeder Block zeigt die Verteilung der *Fitness* eines *Parametervektors* zum Ende der jeweils dreistündigen Durchläufe. Die geschätzte Wahrschein-

4. Erlernen der Nutzerpräferenzen



Abbildung 4.7: Ergebnisse des Racing-Verfahrens für verschiedene Parameter

lichkeitsdichte sowie ein Boxplot geben Aufschluss über die Streuung. Anhand der Beschriftung jedes Bereichs $n \times (\mu; \lambda; p_c; p_m; \sigma)$ lassen sich die Anzahl der Durchläufe n sowie die verwendeten Parameter ablesen. Die einzelnen Bereiche sind nach der sich ergebenden *Utility*, die anhand des arithmetischen Mittels der erreichten *Fitness* bemessen wird, von oben nach unten und von links nach rechts angeordnet.

Da es möglicherweise verwunderlich scheint, dass die Populationsgröße μ die Anzahl der Nachkommen λ überschreitet, sei an dieser Stelle kurz an das in Survivor- und Parent-Selection aufgeteilte Selektionsverfahren erinnert. Hierbei wird der in Eiben und Smith (2003) als „generational gap“ bezeichnete Teil der Elterngeneration durch die kleinere Generation der Nachkommen ersetzt. Bei *Parametersätzen*, in denen die Gesamtpopulation μ der Größe der Kindgeneration λ entspricht, werden alle Vektoren einer Generation ersetzt. Bei diesen wird deshalb das in Anlehnung an (μ, λ) implementierte Verfahren verwendet. Bei *Parametervektoren* mit $\mu > \lambda$ kommt das Verfahren nach $(\mu + \lambda)$ zum Einsatz, es erfolgt somit der zusätzliche Schritt der Survivor-Selection.

Bei den mit $n \times \text{CMA-ES}(\sigma_0 = \dots)$ beschrifteten Verteilungen werden die Ergebnisse der Evolutionsstrategie CMA dargestellt. Wie in der Dokumentation der verwendeten CMA-Evolutionsstrategie empfohlen, wird angestrebt, die initiale Standardabweichung σ_0 so zu wählen, dass die zu erreichenden Optima möglichst innerhalb des Wertebereichs $x_0 \pm 3 * \sigma_0$ liegen. Die initialen Parameter x_0 werden dabei wie gehabt randomisiert festgelegt (siehe Unterabschnitt 4.4.5 „Entwicklung des Algorithmus“). Auch für den Parameter σ_0 werden einige verschiedene Ausprägungen verglichen.

Anhand der Abbildung lässt sich erkennen, dass die *Utility*, somit also die nach dreistündigen Durchläufen erreichte mittlere *Fitness*, in einem Wertebereich von ca. $-2,2$ bis $-2,7$ liegt. Dabei schneiden die in Anlehnung an (μ, λ) implementierten Verfahren insgesamt am schlechtesten ab, wobei sich bei diesen eine größere Varianz erkennen lässt. Aufgrund der Hinweise in Eiben und Smith (2003), dass dieses Verfahren insbesondere geeignet sei, lokalen Extremwerten zu entkommen, kann vermutet werden, dass das Festhängen in lokalen Maxima kein Grund für die vergleichsweise schlechte *Utility* ist. Vielmehr liegt es nahe, dass sich die Varianz aufgrund einer größeren Streuung der *Gewichtsvektoren* ergibt, die ein Resultat der kompletten Ersetzung der Elterngeneration ist.

In Anbetracht der vorgestellten Quellen, die die Vorteile des CMA-ES-Ansatzes hervorheben, mag es verwunderlich erscheinen, dass mit diesem Verfahren nach Verstreichen der drei Stunden nicht die besten *Fitness*-Werte erzielt werden. Ergänzend zu dieser Übersicht veranschaulicht Abbildung 4.8 die Änderungen der *Fitness* im Verlauf der jeweils dreistündigen Optimierungsphasen für einige ausgewählte *Parametervektoren*. Die multiplen Durchläufe jeweils eines *Vektors*, die Abbildung 4.6 auf Seite 129 beispielhaft getrennt aufzeigt, werden zur besseren

Übersicht zusammengefasst in nur einer Funktionskurve dargestellt. Hierfür wird das arithmetische Mittel der jeweils linear interpolierten *Fitness*-Werte berechnet. Es lässt sich nun beispielsweise erkennen dass eine Population von 15 *Gewichtsvektoren*, von denen jeweils zehn durch Nachkommen ersetzt werden, anfänglich eine schnellen Verbesserung der *Fitness* erzielt. Nach einer Stunde gibt es jedoch fast keine Änderungen mehr, vermutlich, weil sich die fünf *Gewichtsvektoren*, aus denen die nächste Generation abgeleitet wird, immer mehr angleichen. Ein Verharren in lokalen Minima wird deshalb wahrscheinlich. Auch durch diese Grafik könnte der Eindruck entstehen, dass der vorerst entwickelte Ansatz insgesamt besser zur Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* geeignet sein könnte. Es muss jedoch beachtet werden, dass die CMA-Evolutionsstrategie hier zwar zur Visualisierung der jeweils erzielten Optimierungen dargestellt wird, dass für dieses Verfahren vorab aber kein aufwändiges *Parameter*-Tuning erfolgt. So liegt ein Vorteil des adaptiven Verfahrens ja genau in der Ermittlung optimaler *Parameter* während der Laufzeit. Das *Parameter*-Tuning führt somit dazu, dass das in dieser Dissertation erarbeitete Verfahren für einige *Parameters**Parametervektoren* initial etwas schneller *Gewichtungsfaktoren* mit niedrigerer *Fitness* findet.

Nur bei einer sehr genauen Betrachtung der Kurve lässt sich beobachten, dass die *Fitness* des Ansatzes CMA-ES($\sigma_0 = 3,0$) innerhalb der letzten Stunde etwas schneller in Richtung des Optimums abfällt (bzw. ansteigt – man beachte das negative Vorzeichen der *Fitness*) als die anfänglich entwickelte Evolutionsstrategie mit den *Parametern* 60; 55; 0,9; 0,7; 1,5. Diese *Parameter* weisen insgesamt die beste *Utility* auf, gehen somit als am besten bewertete *Parameter* aus dem Tuning-Verfahren hervor und werden bei der eigentlichen Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* zur Steuerung des initial entwickelten Algorithmus verwendet.

4.4.8 Ergebnisse der Optimierung

Da anhand des Racing-Verfahrens ermittelt worden ist, dass der *Parametervektor* 60; 55; 0,9; 0,7; 1,5 die beste *Utility* aufweist, wird dieser zur eigentlichen Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* herangezogen. Insgesamt erfolgen dabei sechs Durchläufe, da die Entwicklung jeder Population jeweils von verschiedenen Zufallsgrößen abhängig ist. Dabei wird kein spezielles Terminationskriterium festgelegt, stattdessen wird ein Optimierungsvorgang händisch abgebrochen, wenn sich die *Fitness* über einen vergleichsweise langen Zeitraum nicht mehr ändert.

Zusätzlich wird die CMA-Evolutionsstrategie als Ansatz zur Optimierung verwendet, da diese, wie im vorangehenden Unterabschnitt beschrieben, nicht als Vergleichskandidat des Racing-Verfahrens angesehen werden darf. Sechs Durchläufe erfolgen mit der initialen Standardabweichung $\sigma_0 = 3,0$, da mit dieser bereits zu Beginn der dreistündigen Optimierung eine rasche Verbesserung der *Fitness* erzielt werden konnte. Auch mit den Parametern $\sigma_0 = 5,0$ sowie $\sigma_0 = 7,0$ erfolgen noch jeweils

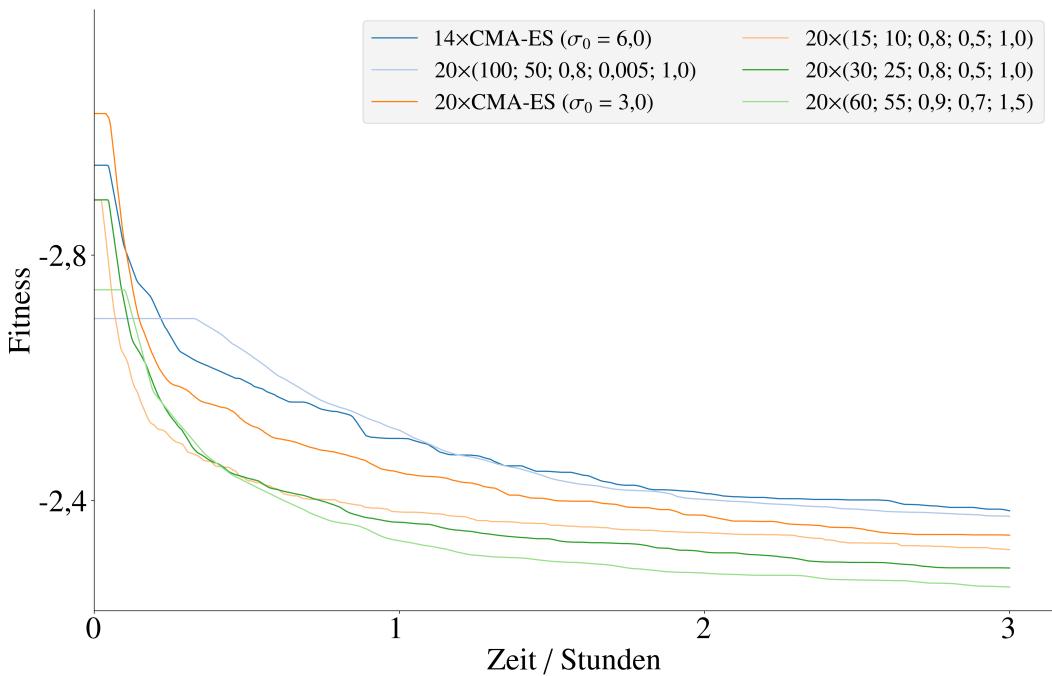


Abbildung 4.8: Zeitlicher Verlauf des Racing-Verfahrens für verschiedene Parameter

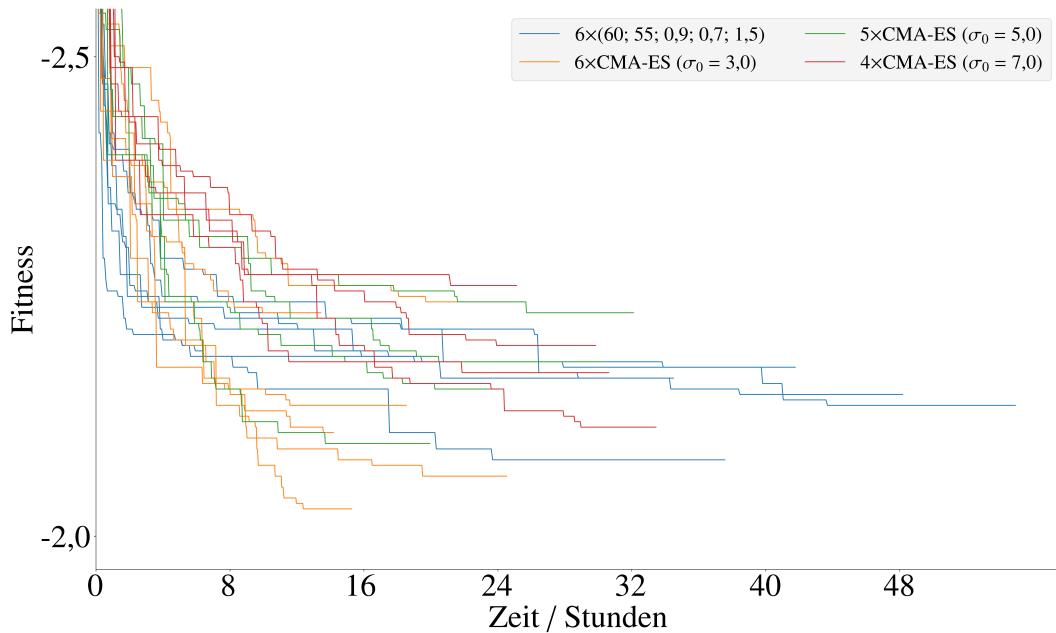


Abbildung 4.9: Zeitlicher Verlauf der endgültigen Optimierung

fünf und vier komplette Durchläufe. Die Termination des Algorithmus wird dabei von der CMA-Evolutionsstrategie (siehe Hansen, Akimoto, Brockhoff & Chan, 2019) vorgegeben, diese berücksichtigt eine Reihe verschiedener Kriterien. Abbildung 4.9 zeigt die durch die jeweiligen Optimierungen erreichte *Fitness* über die Laufzeit.

Wie sich anhand der Grafik erkennen lässt, dauern die einzelnen Durchläufe dabei bis zu zwei Tagen an.

Das ermittelte Maximum der *Fitnessfunktion* von -2,03 (gerundet) wird durch die in Tabelle 4.3 aufgelisteten *Gewichtungsfaktoren* erreicht. Diese stellen somit das Ergebnis der in diesem Abschnitt beschriebenen Optimierung dar. Die Bedeutung der einzelnen Parameter s, t, u, v, w kann in Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ ab Seite 89 nachgeschlagen werden, die genaue Beschreibung der Kategorien findet sich in Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“ ab Seite 27.

Trotz der während des Racing-Verfahrens beobachtbaren raschen Verbesserung der *Fitness* durch den selbst entwickelten Ansatz, hat das ermittelte Optimum anhand der CMA-ES gefunden werden können. Abbildung 4.10 fasst die einzelnen Durchläufe jedes Ansatzes nochmal durch Berechnung der arithmetischen Mittelwerte zu jeweils einer Kurve zusammen. Hier lässt sich einerseits erkennen, warum der initial entwickelte Ansatz im Racing-Verfahren so gut abschneidet, was jedoch andererseits die Schwachstelle dieses Verfahrens ist: Innerhalb der drei Stunden, die für den Vergleich der *Parametervektoren* festgelegt worden sind, kommt es zu vergleichsweise großen Verbesserungen der *Fitness*. Das Verfahren arbeitet in diesem Bereich deutlich schneller als die CMA-Evolutionsstrategien. Nach diesen drei Stunden ist allerdings ein deutlicher Knick in der Kurve sichtbar, Verbesserungen werden nur noch langsam erzielt. Durch das Tuning der *Parameter* hat sich somit scheinbar ein Vektor ergeben, der ideal an die dreistündige Laufzeit des Messverfahrens angepasst worden ist. Vermutlich sind die *Gewichtungsfaktoren* nach verstreichen dieser Zeit in einem Wertebereich angekommen, in dem die Mutationsstärke und Mutationsrate des Verfahrens eher zu hoch gewählt sind. Es zeigt sich dadurch die Stärke eines adaptiven Verfahrens, das diese Parameter während der Laufzeit verringern kann, um so Sprünge über das zu ermittelnde Optimum zu verhindern.

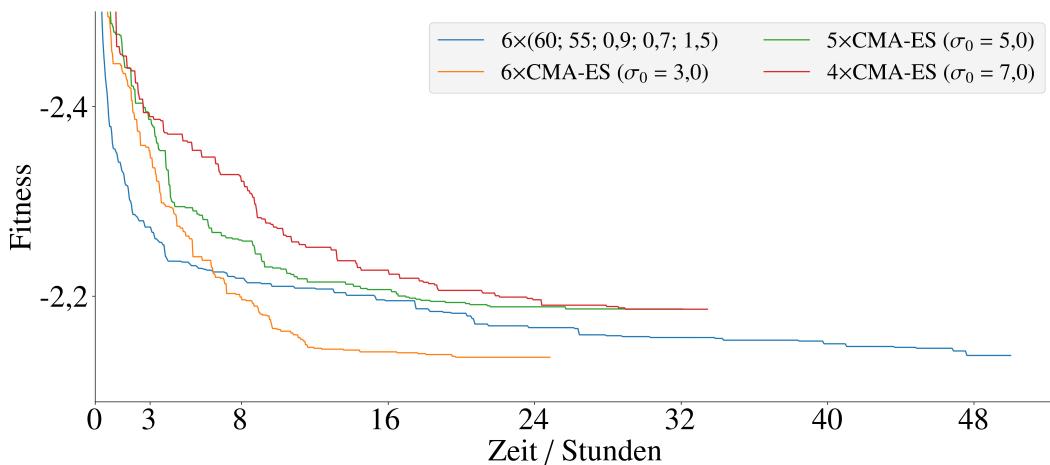


Abbildung 4.10: Mittelwerte des zeitlichen Verlaufs der endgültigen Optimierung

<i>Node-Kategorien</i>
■ Flurtür $s = 7,61769672273$
▢ Raumtür $s = 7,22071538136$
☒ Karussell-Flurtür $s = 55,9977960934$
<i>Edge-Kategorien</i>
● Überdachter Fußweg $t = 2,16906144894 \quad u = 1,00495278335$
● Unüberdachter Fußweg $t = 14,1682705231 \quad u = 1,00003284361$
● Geschlossener Bereich $t = 18,9539218508 \quad u = 3,64952566816$
● Stufen $t = 14,0544849647 \quad u = 2,41621815841$
● Rampe $t = 11,7917101331 \quad u = 3,59118313212$
● Unterführung $t = 5,42267732368 \quad u = 3,7949136719$
● Straßenübergang $t = 29,4915872829 \quad u = 10,9418781974$
<i>Leveledge-Kategorien</i>
☒ Treppe $v = 11,490811395 \quad w = 12,2571510693$
☒ Rampe $v = 7,96850518345 \quad w = 12,4627080784$
☒ Aufzug $v = 64,233649615 \quad w = 17,8020069815$

Tabelle 4.3: Die aufgelisteten Gewichtungsfaktoren stellen das Ergebnis der durchgeföhrten Optimierung dar

4.5 Evaluation und Interpretation der Ergebnisse

Im Folgenden sollen die Ergebnisse nun zunächst evaluiert werden. Dazu wird nachgewiesen, dass sich durch die erreichte Annäherung der Routenberechnung an den Referenzstandard präferierter Routen tatsächlich Eigenschaften nachbilden lassen, die systematisch in von ProbandInnen gewählten Routen enthalten sind. Dadurch wird die Generalisierbarkeit der ermittelten *Gewichtungsfaktoren* aufgezeigt und ausgeschlossen, dass die optimierte Routenberechnung nicht aufgrund einer Überanpassung ausschließlich dazu geeignet ist, den Referenzstandard nachzubilden. Danach wird in Unterabschnitt 4.5.2 „Interpretation“ im Einzelnen auf die optimierten *Gewichtungen* und deren Auswirkungen eingegangen. In Unterabschnitt 4.5.3 „Übertragbarkeit“ wird abschließend die Frage der Übertragbarkeit erörtert, indem die Auswirkungen optimierter *Gewichtungsfaktoren* auf die Routenplanung in einem Einkaufszentrum untersucht werden.

4.5.1 Evaluation

Wie in Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“ bereits kurz erwähnt, wird zur Evaluation das grundlegende Konzept verfolgt, das auch von Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) beschrieben wird, um die Verbesserungen der von den Autoren optimierten Fahrzeugrouten aufzuzeigen. Im Gegensatz zu der genannten Publikation kommt aufgrund der hohen Zeitkosten der Optimierung jedoch kein Kreuzvalidierungsverfahren zum Einsatz. Stattdessen erfolgt, wie bereits in Abschnitt 4.4 „Optimierung“ beschrieben, eine Aufteilung des Referenzstandards in eine 80 %ige Trainingsmenge, bestehend aus 176 Routen, und eine 20 %ige Testmenge aus 45 Routen zur Evaluation der anhand der Trainingsmenge ermittelten *Gewichtungsfaktoren*. Zu jeder dieser 45 Nutzerrouten wird die kürzeste Route und weiterhin die hinsichtlich der ermittelten *Gewichtungsfaktoren* kostenminimierendste Route mit jeweils gleichem Start- und Zielpunkt berechnet. Anhand des in Abschnitt 4.3 „Qualitätsmaß“ definierten Ähnlichkeitsmaßes wird dann die Übereinstimmung der Nutzerroute mit der kürzesten sowie mit der optimierten Route ermittelt. Da keine Normalverteilung vorliegt, werden die Ähnlichkeitswerte der optimierten Routen paarweise mit denen der kürzesten Routen anhand eines Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests (Wilcoxon, 1945) verglichen. Es zeigt sich, dass die optimierten Routen mit einem durchschnittlichen Wert von -2,67 signifikant ähnlicher zu den Nutzerrouten des Testdatensatzes sind als die kürzesten Routen mit einem durchschnittlichen Ähnlichkeitswert von -4,09 ($p < 0,001, z = 3,4$). Anhand der Routen des Trainingsdatensatzes hat sich die *Fitness* im Vergleich dazu während der Optimierung von -3,51 auf -2,03 erhöhen lassen.

Um dieses Evaluationsergebnis richtig interpretieren zu können, soll die durchgeführte Optimierung in aller Kürze resümiert werden: Routen, die anhand einer

Minimierung der Gesamtlänge ermittelt werden, können hinsichtlich bestimmter Kategorien von *Edges* dennoch länger als von NutzerInnen präferierte Routen sein oder *Nodes* einer bestimmten Kategorie häufiger ausweisen als diese. So könnte eine kürzeste Route beispielsweise mehr Flurtüren aufweisen oder länger durch überdachte Bereiche verlaufen als eine Route mit gleichem Start- und Zielort, die von einer realen Person präferiert wird. Es kann jedoch beispielsweise aus einem geringeren Auftreten von Türen in präferierten Routen nicht auf den Wunsch der Vermeidung derselben geschlossen werden – so könnte es sich dabei ebenfalls um eine Folge einer Bevorzugung von Außenbereichen handeln. Die *Kostenfaktoren* der Pfadelemente verschiedener Kategorien sind nun so optimiert worden, dass generierte Routen möglichst hinsichtlich aller Kriterien gleich oder kürzer sind bzw. diese seltener aufweisen als die gesammelten Routen des Referenzstandards. Nicht zuletzt aufgrund der genannten Abhängigkeiten der Pfadeigenschaften ist hierfür ein evolutionärer Algorithmus verwendet worden. Durch die Evaluation konnte nun gezeigt werden, dass diese definierte Ähnlichkeit zu Nutzer routen auch über die zur Optimierung verwendeten Referenzrouten hinaus erhalten bleibt. Zwar kann nicht auf die genauen Entscheidungsgründe der ProbandInnen geschlossen werden, durch die durchgeführte Optimierung ist es aber möglich, Muster in präferierten Routen, die sich anhand der eingeschränkten Menge betrachteter Pfadkriterien ergeben, widerzuspiegeln. Dieser Sachverhalt soll erneut an einem einfachen, konstruierten Beispiel veranschaulicht werden: Personen könnten den Wunsch haben, möglichst einfache, überschaubare Routen zu wählen. Dies könnte zu einer Vermeidung von Flurtüren führen, durch eine hohe Gewichtung dieser Türen könnten also implizit einfachere Routen erzeugt werden, die präferierten Nutzer routen ähnlich sind.

Anhand eines weiteren Beispiels soll allerdings auf eine grundsätzliche Schwachstelle der durchgeführten Evaluation hingewiesen werden. So wäre es vorstellbar, dass NutzerInnen grundsätzlich Wege mit schönen Blumen wählen. Dies äußert sich in einer Vermeidung von überdachten Bereichen, in welchen definitiv keine Blumen existieren. Ein optimiertes System würde also vermehrt Routen durch Außenbereiche erzeugen, da die Wahrscheinlichkeit $P(\text{Route durch Außenbereiche} \mid \text{Blumen})$ gegen Eins geht. Die Evaluation durch einen Vergleich mit der Testmenge an Nutzer routen würde dann den Erfolg des Verfahrens indizieren, da die optimierten Routen den Nutzer routen aufgrund der vermehrten Wege in Außenbereichen ähnlicher sind als die kürzesten Routen. Jedoch wird bei dieser Evaluation nicht berücksichtigt, in wie vielen Fällen die generierten Routen auch an schönen Blumen vorbeiführen. Zwar führt die Bevorzugung von Außenbereichen zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, auf Blumen zu treffen, jedoch könnte diese Wahrscheinlichkeit $P(\text{Blumen} \mid \text{Route durch Außenbereiche})$ aufgrund der Tatsache, dass Blumen am Campus generell nur selten existieren ($P(\text{Blumen}) \rightarrow 0$), dennoch gering ausfallen.

Nun ist das aufgeführte Beispiel speziell zur Veranschaulichung konstruiert worden. Aufgrund der Seltenheit der Blumen müssten Personen große Umwege in Kauf nehmen, um an diesen vorbeizukommen. Somit scheint es tatsächlich eher abwegig, dass Personen die von ihnen präferierten Routen hinsichtlich eines Kriteriums, wie Blumen, optimieren, dessen Auftrittswahrscheinlichkeit insgesamt gering ist. Vielmehr ist es wahrscheinlicher, dass sich die Bevorzugung bestimmter Pfadelemente unmittelbar auf die dadurch verursachten Vorteile für die NutzerInnen auswirkt, sodass also beispielsweise gilt: $P(\text{Route durch Frischluft}) \approx P(\text{Route durch Außenbereiche}) \approx P(\text{Route durch Frischluft} \cap \text{Route durch Außenbereiche})$. Es liegt deshalb nahe, dass die im Beispiel dargestellte Näherung $P(\text{Blumen} | \text{Route durch Außenbereiche}) \approx P(\text{Route durch Außenbereiche} | \text{Blumen})$ für die praktische Anwendung eine legitime Vereinfachung ist, die dem in der vorliegenden Arbeit verfolgten Verfahren zugrunde liegt. Auf die Folgen dieser Vereinfachung könnte in einer erweiterten Evaluation jedoch genauer eingegangen werden, indem ermittelt wird, inwieweit optimierte Routen gegenüber kürzesten Routen tatsächlich von Personen bevorzugt werden. Wie in Unterabschnitt 3.1.2 „Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen bei der Navigation“ erörtert, fällt es Personen jedoch schwer, verschiedene Routen gegeneinander abzuwägen, im Speziellen anhand einer Karte. Demnach wäre eine In-situ-Studie sinnvoll, um verschiedene Alternativrouten vergleichen zu lassen. Probanden könnten die präsentierten Pfade zunächst abgehen und sich dann für eine davon entscheiden. Aufgrund des damit verbundenen Aufwands wird eine solche Evaluation allerdings im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt.

4.5.2 Interpretation

In diesem Unterabschnitt wird darauf eingegangen, welche Auswirkungen die erzielte Optimierung auf die Routenführung hat. Hierfür wird zunächst ein Beispiel einer Route mit angepassten *Gewichtungsfaktoren* aufgezeigt. Es wird dann untersucht, welche Änderungen sich durch die optimierten *Gewichtungen* ergeben. Dazu wird ermittelt, welche Elemente auf den optimierten Routen seltener oder häufiger vorhanden sind als auf den kürzesten Routen und wie sich die *Gewichtungsfaktoren* im einzelnen auf die Routenberechnung auswirken.

Abbildung 4.11 zeigt vorab beispielhaft den Vergleich einer kürzesten Route zu einer Route, die anhand der optimierten *Gewichtungsfaktoren* berechnet worden ist. Es lässt sich erkennen, dass die Abkürzung durch das nördliche, rot dargestellte Gebäude in der optimierten Route übersprungen wird. Da die Faktoren $u_{\text{überdachter Fußweg}}$ und $u_{\text{unüberdachter Fußweg}}$ nahezu identisch sind und die *Gewichtungen* $t_{\text{überdachter Fußweg}} \approx 2,2$ und $t_{\text{unüberdachter Fußweg}} \approx 14,2$ weiterhin eher zu einer Bevorzugung von Innenbereichen führen, lässt sich dieses Verhalten auf die hohe *Gewichtung* $t_{\text{Flurtür}} \approx 7,6$ zurückführen. Dagegen werden im südlichen Teil der Route zwei Treppen im Au-

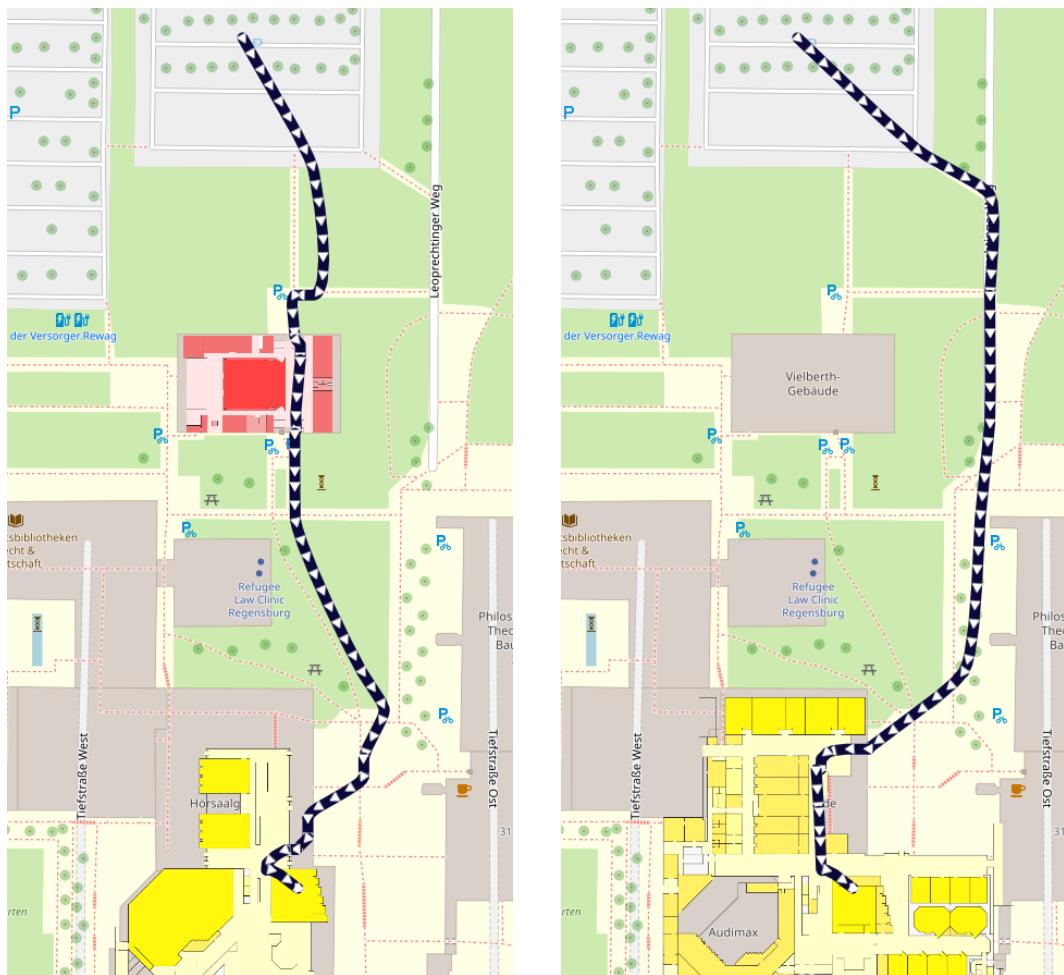


Abbildung 4.11: Vergleich einer berechneten kürzesten Route (links) zu einer Route, die anhand optimierter Gewichtungsfaktoren berechnet worden ist (rechts)
(Karte im Hintergrund übernommen von OpenStreetMap contributors (2017))

ßenbereich durch einen Gang im Innenbereich mit einer einzelnen Treppe ersetzt. Die optimierte Route mag insgesamt einfacher erscheinen, die Abbildung soll allerdings lediglich beispielhaft das Resultat der Optimierung veranschaulichen. Die genauen Auswirkungen der Optimierung lassen sich anhand einzelner Grafiken nur schwer aufzeigen, weshalb im Weiteren eine quantitative Untersuchung der durch die angepassten *Gewichtungsfaktoren* erzielten Routeneigenschaften folgt.

Durch einen Vergleich kürzester und optimierter Routen zwischen den durch den Referenzstandard festgelegten Start- und Zielpunkten kann ermittelt werden, dass die durch optimierte *Gewichtungsfaktoren* erzeugten Routen im Mittel um 4,7 % länger sind. Dies spiegelt somit den Umweg, der sich durch die Anpassung der *Gewichtungen* ergibt. Noch höher sind allerdings die Abweichungen, die die von realen ProbandInnen festgelegten Routen aufweisen. Wie bereits in Abschnitt 4.2 „Analyse der gesammelten Daten“ beschrieben, sind diese im Mittel um 18 % län-

ger als die kürzesten Routen. Damit sind sie immer noch um 13 % länger als die zugeordneten optimierten Routen mit jeweils gleichen Start- und Zielpunkten. Die Signifikanz dieser Abweichung kann anhand eines Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests bestätigt werden ($p < 0,001$). Es zeigt sich somit, dass es trotz der erzielten Annäherung an Nutzer routen noch zu erheblichen Unterschieden kommt. Ergänzend zu den Ausführungen in Unterabschnitt 3.4.2 „Berücksichtigung verschiedener Merkmale“ unterstreicht diese Abweichung den Sinn, in zukünftigen Arbeiten zusätzliche Kriterien, die beispielsweise Abbiegungskomplexität oder Schönheit der Umgebung messbar machen, zu berücksichtigen, um die Verläufe generierter Routen gegebenenfalls weiter an die der präferierten Routen anpassen zu können.

Während 36 (16 %) der kürzesten Routen exakt mit den 221 gesammelten Nutzer routen übereinstimmen, stimmt der Verlauf der optimierten Routen in 48 (22 %) Fällen mit dem der präferierten Routen überein. Zu Unterschieden zwischen den kürzesten und den optimierten Routen kommt es in 159 von 221 Fällen. Bei den verbleibenden 28 % fehlen also Alternativrouten hinsichtlich der gewichteten Pfad eigenschaften, was vermutlich auf die Kürze und die damit verbundene geringe Komplexität einiger Routen zurückzuführen ist.

Um diesen vermuteten Zusammenhang zwischen der Routenlänge und den Auswirkungen der Optimierung anhand eines größeren Datensatzes genauer analysieren zu können, werden über 100.000 Paare aus Start- und Zielpunkten generiert, indem diese zufällig aus allen im Umgebungsmodell vorhandenen *Nodes* gezogen werden. Zwischen diesen Punkten wird dann jeweils die kürzeste und die optimierte Route berechnet. Diese Routen spiegeln einerseits Eigenschaften des erstellten Umgebungsmodells der Universität – so lässt sich beispielsweise berechnen, dass die kürzesten Routen im arithmetischen Mittel 503 m lang sind. Andererseits muss angenommen werden, dass die ermittelten Start- und Zielpunkte eher untypisch für Routen realer Personen sind. So zeigt ein Mann-Whitney-U-Test (Mann & Whitney, 1947), dass die Längen der simulierten kürzesten Routen signifikant ($p < 0,001$) über denen der anhand der Start- und Zielpunkte des Referenzstandards ermittelten kürzesten Routen liegen, welche im Mittel nur 304 m lang sind. Ein plausibler Grund hierfür könnte sein, dass sich die Probanden, je nach Studienfach, in bestimmten Bereichen häufig aufhalten und deshalb auf den in der Praxis auftretenden Routen nur selten den gesamten Campus durchqueren. Ein alternativer Ansatz, um eine größere Sammlung an Routen zu erhalten, wäre deshalb gewesen, Start- und Zielpunkte protokollierter Anfragen, die im praktischen Einsatz an das Navigationssystem gestellt werden, heranzuziehen. Dies könnte allerdings wiederum die Diversität gesammelter Routen einschränken. So ist die Auswahl der angefragten Routen sicherlich davon beeinflusst, dass StudentInnen der Informationswissenschaft aufgrund unterschiedlicher Werbemaßnahmen eher Kenntnis von der Existenz des Navigationssystems haben als StudentInnen, die sich vorwiegend im südlichen Teil

des Campus aufhalten. Weiterhin werden bestimmte Start- oder Zielpunkte deutlich häufiger ausgewählt; einerseits, da es sich um besonders markante Orte handelt, andererseits, da einige feststehende Routen auf den Internetseiten verschiedener Einrichtungen der Universität, wie beispielsweise der Zentralbibliothek, direkt verlinkt werden. Der wesentliche Vorteil zufällig generierter Routen zur Untersuchung der Auswirkungen der Optimierung liegt jedoch in der Vergleichsmöglichkeit mit anderen Umgebungsmodellen, für die keine Routenanfragen realer NutzerInnen vorliegen. So werden in Unterabschnitt 4.5.3 „Übertragbarkeit“ zufällige Routen im Umgebungsmodell eines Einkaufszentrums generiert, um die Auswirkungen der Optimierung mit denen am Gelände der Universität zu vergleichen.

Um nun zu untersuchen, wie die durch die optimierten *Gewichtungsfaktoren* erzielten Änderungen von der Länge der Routen abhängen, werden die zufällig gewählten Start- und Zielpunkte anhand der Länge der kürzesten Routen in Gruppen zu jeweils 50 m eingeteilt. Abbildung 4.12 zeigt die Verteilung der relativen Längenabweichungen bzw. der „Percent Above Optimal“ (vergleiche Hölscher et al., 2011; Wiener et al., 2009) der Routen mit optimierten *Gewichtungsfaktoren*. Zusätzlich zu den Box-Plots, die die Fünf-Punkte-Zusammenfassung visualisieren, indizieren die Dreiecke die arithmetischen Mittelwerte. Ausreißer, die über der Summe des oberen Quartils und dem 1,5-fachen Interquartilsabstand liegen (vergleiche beispielsweise Fahrmeir, Künstler, Pigeot & Tutz, 2006, S. 67), werden dabei nicht dargestellt. Diese würden die Übersichtlichkeit der Grafik aufgrund der Größe des simulierten Datensatzes eher beeinträchtigen. Wie vermutet, lässt sich ablesen, dass die Optimie-

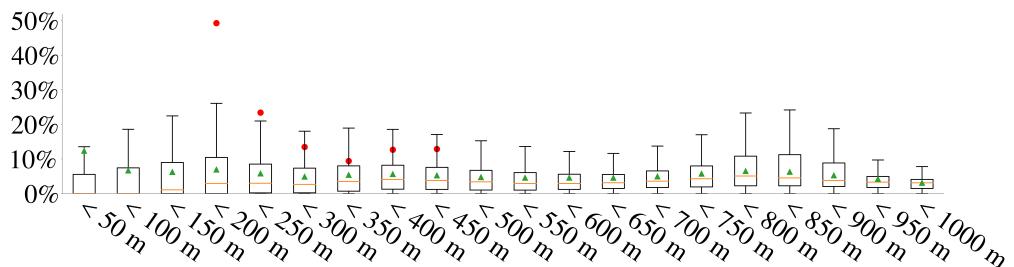


Abbildung 4.12: Relativer Umweg der optimierten Routen in Abhängigkeit der Länge der kürzesten Route

rung bei den Routen unter 50 m und ebenfalls bei denen zwischen 50 m und 100 m in über 50 % der Fälle zu keinen (Längen-)Änderungen führt. Der Median und das arithmetische Mittel liegen ab einer Länge von ca. 100 m dann aber weitgehend gleichbleibend beim globalen Median von 3,2 % bzw. arithmetischen Mittelwert von 5,3 %.

Dieser konstante relative Umweg steht konträr zu den Ergebnissen der Analyse präferierter Routen, welche in Abschnitt 4.2 „Analyse der gesammelten Daten“ ab

Seite 111 vorgestellt worden ist. Abbildung 4.2 auf Seite 112 hat dort zunächst erkennen lassen, dass die absolute Länge in Kauf genommener Umwege bei den von ProbandInnen präferierten Routen konstant über den kürzesten Routen liegt. Anhand einer Rangkorrelationsanalyse konnte dann bestätigt werden, dass der relative Umweg bei zunehmender Länge abnimmt. Zum direkten Vergleich mit den relativen Umwegen der über 100.000 simulierten Routen repräsentieren die roten Punkte in Abbildung 4.12 die mittleren Längenunterschiede der von ProbandInnen gewählten Routen des Referenzstandards. Aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl von 221 ProbandInnen werden diese Mittelwerte nur in dem Bereich von 150 m bis 450 m, in welchem mindestens 10 Routen vorliegen, dargestellt. In der bereits in Abschnitt 4.2 „Analyse der gesammelten Daten“ vorgestellten Publikation der Autoren Quercia et al. (2014) wird anhand einer ähnlichen Grafik aufgezeigt, dass die relativen Umwege der von ihnen berechneten Routen, welche unter anderem hinsichtlich einer möglichst schönen Umgebung optimiert werden, ebenfalls mit zunehmender Gesamtlänge geringer werden.

Dies könnte ein Hinweis sein, dass sich die vergleichsweise konstanten relativen Umwege der im Rahmen der vorliegenden Arbeit optimierten Routen aufgrund der getroffenen Auswahl gewichteter Pfadelemente ergeben. So wäre es denkbar, dass eine entsprechende Gewichtung von Wegen mit schöner Umgebung ebenfalls zu größeren Umwegen führt, wenn die Streckenlänge insgesamt eher kurz ausfällt. Die durchgeführte Optimierung könnte sich beim Verfügbarwerden solcher zusätzlichen Umgebungsinformationen mit geringem Aufwand erneut durchführen lassen, um diese ebenfalls zu berücksichtigen.

Weiterhin ist es jedoch denkbar, dass die aufgezeigten Unterschiede optimierter und präferierter Routen eine Folge der bereits in Unterabschnitt 3.4.3 „Separierbarkeit der Routenelemente“ ab Seite 103 beschriebenen Limitation sind, welche sich durch die in Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ ab Seite 89 definierte lineare Gewichtungsfunktion ergibt. Möglicherweise sind Personen einfach bereit, bei insgesamt kürzeren Strecken längere Umwege in Kauf zu nehmen, um dadurch andere Pfadeigenschaften verstärkt zu optimieren. In diesem Fall könnte beispielsweise eine Gewichtungsfunktion der Pfadelemente sinnvoll sein, in der der Abstand zwischen Start- und Zielpunkt mit einem weiteren zu optimierenden *Faktor* versehen ist. Um die sich ergebenden *Faktoren* datengetrieben zu optimieren, wäre allerdings ein Referenzstandard notwendig, der den Zusammenhang der Pfadlängen zu der Gewichtung unterschiedlicher Pfadelemente auch implizit enthält. Dieser müsste somit hinreichend viele Routen unterschiedlicher Längen enthalten, sodass, wie in Abschnitt 3.4.3 erörtert, davon ausgegangen werden kann, dass eine entsprechend größere Datengrundlage sinnvoll wäre.

Im Folgenden wird nun genauer auf die ermittelten *Gewichtungsfaktoren* der verschiedenen semantischen Kategorien von Pfadelementen eingegangen. Hierfür

gibt Abbildung 4.13 zunächst eine Übersicht der Auswirkungen der Optimierung auf die Häufigkeit verschiedener Pfadelemente. Zur Erstellung der Grafik ist die Differenz der Anzahl unterschiedlicher *Node*- und *Leveledge*-Kategorien (links) sowie die Längendifferenz der *Edge*-Kategorien (rechts) der 100.000 optimierten Routen mit zufälligen Start- und Zielorten gegenüber den jeweils kürzesten Routen gebildet worden. Die positiven Werte indizieren, dass Pfadelemente in optimierten Routen häufiger vorkommen als in kürzesten, negative Werte deuten hingegen auf eine vermehrte Ausprägung einer semantischen Kategorie in den kürzesten Routen hin.

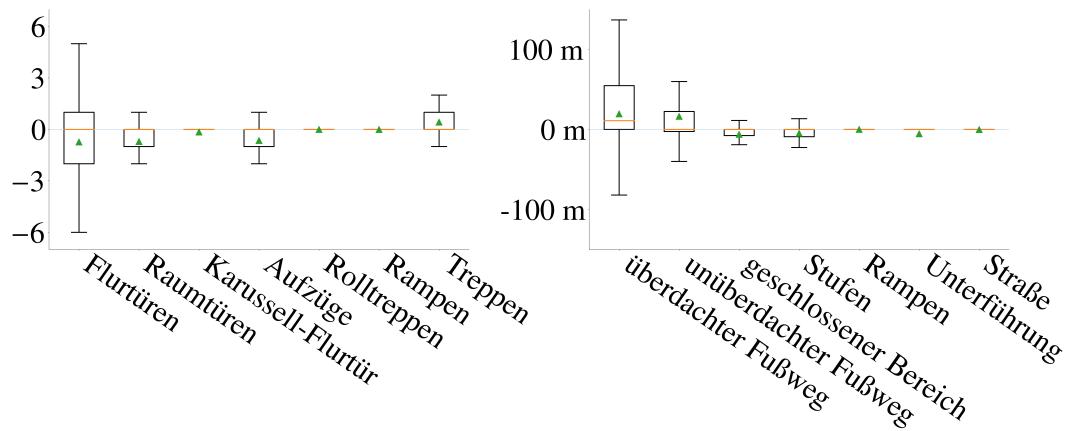


Abbildung 4.13: Überblick der durch die Optimierung hervorgerufenen Häufigkeitsdifferenzen verschiedener Pfadelemente gegenüber kürzesten Routen

Zunächst ist auffällig, dass der orange markierte Median der Verteilung bei allen Kategorien mit Ausnahme der überdachten Fußwege bei null liegt. Eine naheliegende Annahme wäre gewesen, dass beispielsweise der Faktor $s_{\text{Flurtür}} \approx 7,6$ zu einer Vermeidung von Flurtüren führt und optimierte Route deshalb generell weniger Pfadelemente dieses Typs aufweisen. Die dargestellte Verteilung zeigt deshalb die gegenseitige Abhängigkeit der verschiedenen Pfadelemente auf. Dadurch wird zusätzlich die in Ludwig et al. (2009); Zenker und Ludwig (2009b) beschriebene Schwierigkeit bestätigt, die Wahl optimaler Pfadelemente den Entwicklern oder den NutzerInnen selbst zu überlassen. Weiterhin wird im Nachhinein die Sinnhaftigkeit des iterativen Optimierungsverfahrens zur Ermittlung des *Gewichtungsvektors* bestätigt: Anhand eines simplen Ansatzes, in dem ein *Gewichtungsfaktor* entsprechend hoch festgelegt wird, wenn präferierte Routen weniger Elemente der jeweils zugeordneten Kategorie enthalten, wäre es nicht möglich gewesen, die Wechselwirkungen unterschiedlicher Pfadelemente zu berücksichtigen.

Diese Wechselwirkungen sollen durch Tabelle 4.4 genauer dargestellt werden. Hierfür wird untersucht, wie sich die durch die Optimierung abgeänderten Auftrittshäufigkeiten der Elemente verschiedener semantischer Kategorien auf die Anzahl der

4. Erlernen der Nutzerpräferenzen

	█	🏃	☒	⬆	↗	↔
█	1.000****	-0.009	-0.374***	-0.269***	0.328***	0.543***
🏃	-0.009	1.000****	-0.012*	0.105***	0.024***	-0.191***
☒	-0.374***	-0.012*	1.000****	0.181***	-0.269***	-0.377***
⬆	-0.269***	0.105***	0.181***	1.000****	-0.663***	-0.200***
↗	0.328***	0.024***	-0.269***	-0.663***	1.000***	0.258***
↔	0.543***	-0.191***	-0.377***	-0.200***	0.258***	1.000***
↔	-0.573***	-0.044***	0.357***	0.081***	-0.215***	-0.769***
▬▬	0.033***	0.818***	0.001	0.068***	0.106***	-0.180***
▬▬	0.201***	0.050***	0.004	-0.122***	0.070***	0.082***
▬▬	-0.403***	-0.080***	0.101***	0.028***	-0.086***	-0.396***
▬▬	0.463***	0.017***	-0.159***	-0.055***	0.104***	0.406***
▬▬	-0.037***	-0.028***	-0.037***	-0.017***	-0.004	-0.045***

	↔↔	▬▬▬▬	▬▬▬▬	▬▬▬▬	▬▬▬▬	▬▬▬▬
█	-0.573***	0.033***	0.201***	-0.403***	0.463***	-0.037***
🏃	-0.044***	0.818***	0.050***	-0.080***	0.017***	-0.028***
☒	0.357***	0.001	0.004	0.101***	-0.159***	-0.037***
⬆	0.081***	0.068***	-0.122***	0.028***	-0.055***	-0.017***
↗	-0.215***	0.106***	0.070***	-0.086***	0.104***	-0.004
↔	-0.769***	-0.180***	0.082***	-0.396***	0.406***	-0.045***
▬▬	1.000***	-0.079***	-0.253***	0.429***	-0.554***	-0.021***
▬▬	-0.079***	1.000***	0.074***	-0.082***	0.019***	-0.030***
▬▬	-0.253***	0.074***	1.000***	-0.242***	0.384***	-0.011*
▬▬	0.429***	-0.082***	-0.242***	1.000***	-0.556***	-0.029***
▬▬	-0.554***	0.019***	0.384***	-0.556***	1.000***	-0.022***
▬▬	-0.021***	-0.030***	-0.011*	-0.029***	-0.022***	1.000***

Tabelle 4.4: Rangkorrelationskoeffizienten der Häufigkeiten bzw. Längen der Pfadelemente
 █ Flurtür, ⚑ Raumtür, ☒ Karussell-Flurtür, ⬆ Aufzug, ↗ Treppe, ↔ überdachter Fußweg,
 ↔ unüberdachter Fußweg,▬▬ geschlossener Bereich,▬▬▬▬ Stufen,▬▬▬▬ Rampe,▬▬ Unterführung
 und▬▬▬▬ Straßenübergang

Elemente der jeweils anderen Kategorien auswirken. Bei den *Nodes* verschiedener Kategorien wird dabei jeweils die Anzahl in präferierten und kürzesten Routen ermittelt und die Differenz gebildet. Bei *Leveledges* wird entsprechend die Abweichung der Anzahl von Etagen berechnet, die mit einem bestimmten Stockwerksübergang überwunden werden. *Edges* fließen mit den aufsummierten Gesamtlängen in die Berechnung ein. Anschließend werden für die nicht normalverteilten Abweichungen jeder Kategorie paarweise Rangkorrelationen nach Spearman (Spearman, 1904) berechnet. Die Tabelle zeigt nun die Rangkorrelationskoeffizienten jeweils jeder paarweisen Kombination der Kategorien. Aufgrund der hohen Zahl von 100.000 simulierten Routen kommt es trotz einer Bonferroni-Korrektur, bei der das α -Niveau von 0,05 durch die Anzahl der getesteten Paarungen ($\frac{12 \cdot 11}{2} = 66$) dividiert wird, zu signifikanten Ergebnissen, vier Sterne in der Tabelle weisen darauf hin, dass $p < \frac{0,0001}{66}$. Die farbliche Hervorhebung soll helfen, stark korrelierende Paare schnell erkennen zu können. Beispielsweise zeigt die erste Spalte den intuitiv nachvollziehbaren Zusammenhang auf, dass optimierte Routen, bei denen der Vergleich der Anzahl von Flurtüren mit kürzesten Routen relativ hoch ausfällt, gleichzeitig eher lange Wege in Innenbereichen aufweisen.

Im Weiteren wird nun auf jede der Pfadkategorien eingegangen, wobei die Auswirkungen der jeweils zugeordneten Gewichtungen untersucht werden. Die Tabelle soll dabei genutzt werden, um kurz auf die Wechselwirkungen jeder Kategorie eingehen zu können.

■ Flurtür ($s \approx 7,6$)

In Abschnitt 4.2 „Analyse der gesammelten Daten“ hat kein signifikanter Unterschied in der Anzahl von Flurtüren in präferierten Routen im Vergleich zu kürzesten Routen gezeigt werden können. Es hat sich dabei eher die Tendenz abgebildet, dass die Türen in präferierten Routen häufiger enthalten sind, obwohl der trainierte *Gewichtungsfaktor* von $s_{\text{Flurtür}} \approx 7,6$ alleine betrachtet vermuten ließe, dass die Routen der ProbandInnen durchschnittlich weniger Raumtüren enthalten.

Die Vermeidung von Flurtüren muss deshalb im Zusammenspiel mit anderen *Gewichtungsfaktoren* betrachtet werden. So zeigt Tabelle 4.4, dass die Anzahl von Flurtüren mit Wegen in Innenbereichen positiv und mit Wegen in Außenbereichen negativ korreliert, was sich leicht damit begründen lässt, dass Türen vornehmlich in Innenbereichen vorhanden sind. Der höhere *Faktor t* unüberdachter gegenüber überdachter Fußwege führt insgesamt trotz der *Gewichtung* von Flurtüren zu tendenziell längeren überdachten Wegen in optimierten Routen, wie Abbildung 4.13 auf Seite 149 zeigt. Dennoch zeichnet sich im Gegensatz zu den Routen des Referenzstandards ab, dass Flurtüren in optimierten Routen im Mittel etwas weniger vorkommen als in den kürzesten Routen, möglicherweise, da weitere Kriterien Einfluss auf die ProbandInnen genommen haben, die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

So könnte beispielsweise ein Zusammenhang zwischen Flurtüren und der empfundenen Komplexität von Routen bestehen. Ein hoher Vermeidungsfaktor von Flurtüren könnte dann zu durchschnittlich einfacheren Routen führen, jedoch ist naheliegend, dass auch Abschnitte ohne Türen schwierige Passagen darstellen können, die sich durch eine Gewichtung von Flurtüren alleine nicht vermeiden lassen. An dieser Stelle lässt sich nur spekulieren, welche Präferenzen der relativ hohe *Faktor* im Einzelnen widerspiegelt. Denkbar ist ebenfalls, dass sich das *Gewicht* an die Strecke annähert, die in der Zeit gelaufen werden könnte, anstelle eine Tür öffnen zu müssen.

Um nun zu bestimmen, inwieweit sich die definierte Ähnlichkeit zu präferierten Routen anhand einer Berücksichtigung von Flurtüren steigern lässt, könnte das beschriebene Optimierungsverfahren erneut ohne eine *Gewichtung* von Flurtüren durchgeführt werden. Die dadurch erreichte *Fitness* könnte dann mit der *Fitness* verglichen werden, bei der auch Flurtüren einbezogen werden. Weiterhin wäre interessant, welche Verbesserung sich durch die kombinierte Gewichtung von Flurtüren, überdachten und unüberdachten Bereichen ergibt, ein weiterer Durchlauf der Evolutionsstrategie könnte deshalb ohne Beachtung dieser Kriterien erfolgen, um erneut die sich ergebende *Fitness* zu vergleichen. Die Optimierung nochmals unter Ausschluss jeweils jeder einzelnen semantischen Kategorie zu durchlaufen, die im Rahmen des hier aufgezeigten Verfahrens berücksichtigt wird, ist jedoch zeitaufwändig und wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Dennoch soll an dieser Stelle erörtert werden, welche Verbesserung sich durch die Berücksichtigung jeder semantischen Kategorie, wie Flurtüren, erzielen lässt und welche Verbesserung sich weiterhin im Zusammenspiel mit den anderen gewichteten *Faktoren* ergibt.

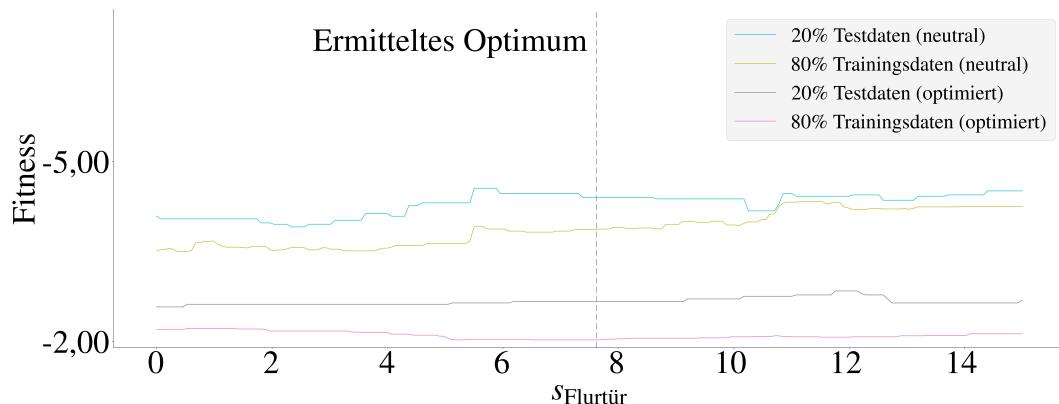


Abbildung 4.14: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors $s_{\text{Flurtür}}$

Dazu zeigt Abbildung 4.14, wie sich verschiedene Ausprägungen des *Faktors* $s_{\text{Flurtür}}$ auf die Fitness, also auf die Ähnlichkeit der optimierten Routen zu den Routen des Referenzstandards, auswirken. Die Pfadelemente der anderen Kategorien werden zur Berechnung dabei einerseits gleichbleibend mit den ermittelten optimalen *Faktoren* gewichtet, diese Funktionen sind deshalb mit dem Vermerk „optimiert“

versehen. Es lässt sich daran erkennen, wie eine *Gewichtung* von Flurtüren im Zusammenspiel mit den anderen *Faktoren* zu einer Verbesserung der *Fitness* beiträgt. Die mit „neutral“ beschrifteten Funktionen zeigen im Gegensatz dazu, wie sich die *Fitness* ändert, wenn alle anderen *Faktoren* mit $s = t = v = w = 0, u = 1$ gewichtet werden, wie es zur Berechnung der kürzesten Route notwendig ist. Diese Kurvenverläufe zeigen deshalb, wie sich die *Fitness* verbessern ließe, falls zur Routenoptimierung ausschließlich Flurtüren herangezogen werden würden. In der Grafik lässt sich nun der Unterschied einer neutralen Gewichtung von Flurtüren, die sich durch einen *Faktor* $s_{\text{Flurtür}} = 0$ ergeben würde, im Gegensatz zum ermittelten Optimum, das durch eine gestrichelte Linie erkennbar ist, ablesen. Die *Fitness* der 80 %igen Trainingsmenge, bestehend aus 176 Routen des Referenzstandards, die zum Erlernen der *Gewichtungsfaktoren* herangezogen worden ist, wird dabei jeweils getrennt von der erreichten *Fitness* des 45-elementigen Testdatensatzes dargestellt.

Der Verlauf der durch die Trainingsdaten erreichten *Fitness* mit optimierter Belebung aller anderen *Gewichtungsfaktoren* lässt erkennen, dass durch die *Gewichtung* der Flurtüren eine leichte Verbesserung ($\approx 0,178$) erzielt wird. Bei der durch die Testdaten erzeugten *Fitness* kommt es jedoch zu einer minimalen Verschlechterung ($\approx 0,0889$). Dies deutet darauf hin, dass Flurtüren insgesamt zu selten vorkommen, um von der Größe des Testdatensatzes ausreichend erfasst zu werden. Ein größerer Referenzstandard könnte deshalb zu weiterer Optimierung des ermittelten *Faktors* führen. Die aufgezeigte Korrelation zwischen Flurtüren und überdachten sowie unüberdachten Bereichen erklärt den stark abweichenden Verlauf der beiden Kurven mit ansonsten neutralen *Gewichtungen*. Der Einfluss von Flurtüren lässt sich dadurch zusammenfassend wie folgt interpretieren: Eine Vermeidung von Flurtüren ohne die Beachtung weiterer Kriterien scheint nicht zielführend, da dadurch überdachte Bereiche, die in der Regel mit Innenbereichen gleichgesetzt werden können, umgangen werden. Diese werden von den Probanden jedoch gegenüber unüberdachten Bereichen bzw. Außenbereichen tendenziell bevorzugt. Werden überdachte und unüberdachte Bereiche aber ebenfalls als Einflusskriterien herangezogen und entsprechend gewichtet, führt eine Vermeidung von Flurtüren durch einen leicht erhöhten *Faktor* aber durchschnittlich zu besseren Routen. Wie erwähnt, mögen die Gründe hierfür in einer Reduktion der Komplexität oder auch in dem Aufwand liegen, der notwendig ist, eine Tür zu öffnen.

☒ Raumtür ($s \approx 7,2$)

Wie die oberen zwei Kurven in Abbildung 4.15 veranschaulichen, führt ein höherer *Faktor* $s_{\text{Raumtür}}$ bei neutraler Gewichtung aller anderen Kriterien zu einer besseren *Fitness*. Durch eine genauere Untersuchung der kürzesten Routen, die anhand der Start- und Zielpunkte des Referenzstandards erzeugt worden sind, hat sich gezeigt, dass es am Gelände der Universität Situationen gibt, in denen kürzeste Routen durch

4. Erlernen der Nutzerpräferenzen

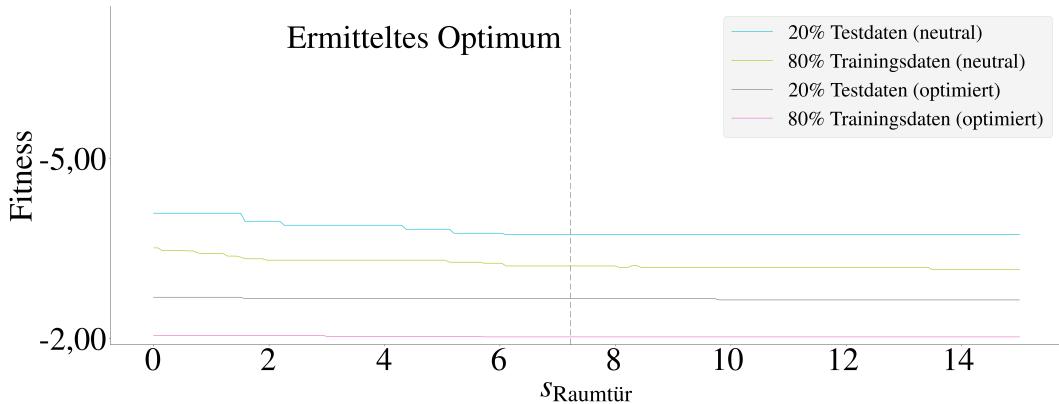


Abbildung 4.15: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors $s_{Raumtür}$

Hörsäle, Büros und durch eine Besenkammer verlaufen. Es liegt nahe, dass diese in den Routen der ProbandInnen vermieden werden, wodurch sich der Verlauf der gezeigten Funktionen leicht begründen lässt. Dass es im Zusammenspiel mit den anderen optimierten *Gewichtungsfaktoren* kaum zu Verbesserungen kommt, wie anhand der zwei unteren Funktionsgraphen abgelesen werden kann, lässt sich durch die naheliegende Wechselwirkung mit der Gewichtung von geschlossenen Bereichen begründen, die in Tabelle 4.4 aufgezeigt ist. Da die semantische Kategorie dieser geschlossenen Bereiche im Gelände der Universität Regensburg genutzt wird, um Wege in Räumen und Hörsälen zu kennzeichnen, sind diese in fast allen Fällen von Raumtüren abgetrennt. Die hohe *Gewichtung* dieser Bereiche verringert deshalb den Einfluss der *Gewichtung* von Raumtüren.

☒ Karussell-Flurtür ($s \approx 56,0$)

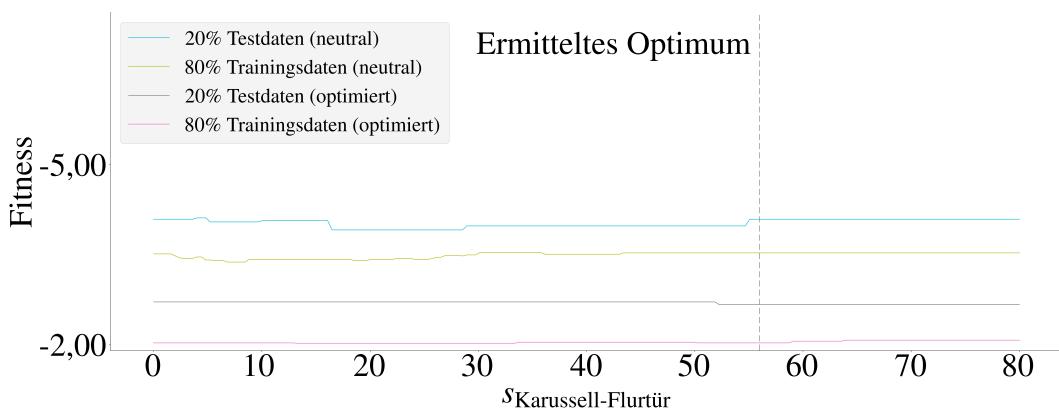


Abbildung 4.16: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors $s_{Karussell-Flurtür}$

Um die geringe Änderung der *Fitness* interpretieren zu können, die Abbildung 4.16 insgesamt aufgezeigt, muss beachtet werden, dass Karusselltüren am Gelände

der Universität nur vereinzelt vorhanden sind. So enthält das Umgebungsmodell zum derzeitigen Stand im August 2019 nur sechs Karusselltüren, während beispielsweise 1563 Flurtüren existieren, weshalb die Anzahl von Karusselltüren in optimierten Routen auch nahezu identisch mit der Anzahl in kürzesten Routen ist, wie Abbildung 4.13 zeigt. Es muss somit davon ausgegangen werden, dass die Änderung der *Fitness* durch unterschiedliche *Gewichtung* von Karusselltüren stark von den konkret gegebenen Situationen abhängt und nicht verallgemeinerbar ist. Weiterhin lassen die unteren Funktionsgraphen erkennen, dass eine Gewichtung der Flurtüren in Kombination mit anderen gewichteten Kriterien kaum Einfluss auf die *Fitness* nimmt. Es kann angenommen werden, dass dies am Einfluss der *Gewichtungen* der korrelierenden Elemente Flurtüren, überdachte und unüberdachte Wege (siehe Tabelle 4.4) liegt.

→ überdachter Fußweg ($t \approx 2,2; u \approx 1,0$)

Aufgrund der *Gewichtung* der *Edges* durch Kombination der *Faktoren* t und u muss zur Interpretation das Zusammenwirken beider Elemente betrachtet werden. Es liegt in der in Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ definierten Gewichtung von *Edges* begründet, dass die in den Abbildungen 4.17 und 4.18 dargestellten *Fitnessfunktionen* der Faktoren t und u stark korrelieren. Wie in dem genannten Abschnitt erörtert worden ist, könnte das bestehende System durch eine alternative Gewichtungsvorschrift verbessert werden: Anstelle des bestehenden Faktors t , der einen längenunabhängigen Gewichtungswert für *Edges* einer bestimmten Kategorie festlegt, wäre es sinnvoll, eine beliebige Zahl direkt aufeinanderfolgender *Edges* mit einem einzelnen konstanten Wert zu gewichten. Neben den in Abschnttt 3.3.1 genannten Vorteilen würde dieses Vorgehen auch die Interpretierbarkeit erleichtern, da die gegenseitige Abhängigkeit beider Faktoren reduziert werden würde.

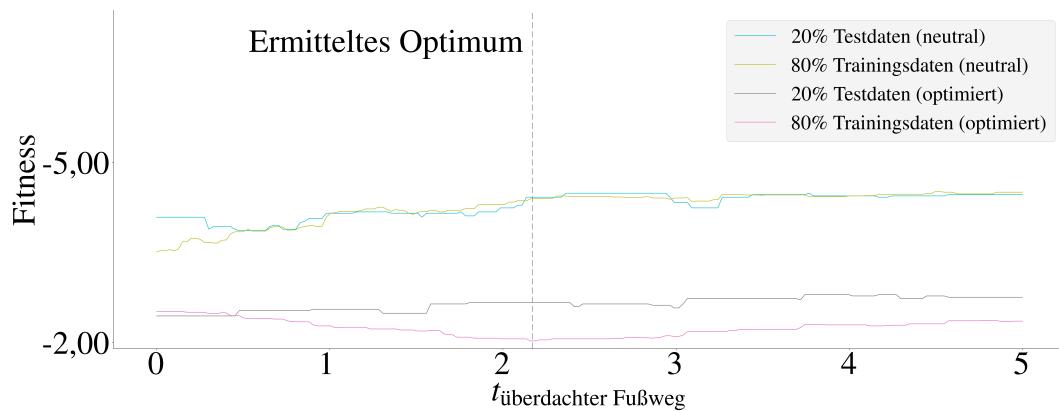


Abbildung 4.17: Änderung der *Fitness* in Abhängigkeit des Faktors $t_{\text{überdachter Fußweg}}$

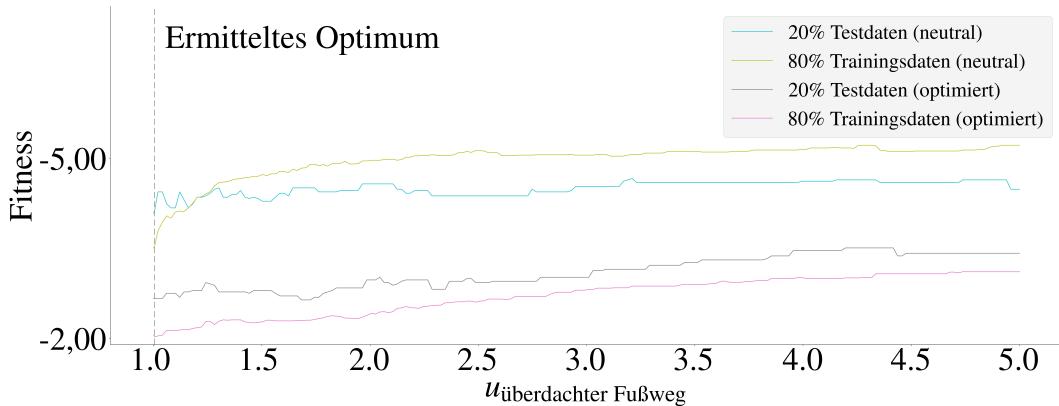


Abbildung 4.18: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors $u_{\text{überdachter Fußweg}}$

Die jeweils oberen Kurven beider *Gewichtungsfaktor*Faktoren zeigen nun, dass eine höhere Gewichtung überdachter Wege ohne Beachtung weiterer Kriterien zu einer Verschlechterung der *Fitness* führt. Zwar kommt es in einem Bereich von $t \approx 0,7$ und $u \approx 1,1$ zu einer leichten Verbesserung, da sich dieses Verhalten jedoch nicht von dem umfangreicheren Trainingsdatensatz bestätigen lässt, wird davon ausgegangen, dass diese Schwankung eine Folge des geringen Umfangs des Testdatensatzes ist.

Im Gegensatz zur neutralen Gewichtung durch den *Faktor* $u \approx 1,0$, der sich bei der Optimierung ergeben hat, führt ein Wert von 2,2 des *Faktors* t zum erreichten Optimum. Die untere Funktionskurve „80 % Trainingsdaten (optimiert)“ visualisiert die dadurch erzielte Verbesserung der *Fitness*, die allerdings nicht durch die Testdaten bestätigt wird. Dass der *Faktor* $t_{\text{überdachter Fußweg}} = 2,2$ gegenüber einer neutralen Gewichtung von überdachten Wegen leicht erhöht ist, kann als ein Entgegenwirken der Gewichtungen der korrelierenden semantischen Kategorien Flurtüren und unüberdachter Wege interpretiert werden. Auch hier soll betont werden, dass die minimalen Funktionsschwankungen, die sich aufgrund des Umfangs des Referenzdatensatzes ergeben, nur erlauben, zu spekulieren. Es scheint plausibel, dass der ermittelte *Faktor* $t \approx 2,2$ bei der Optimierung durch eine Wechselwirkung zustande gekommen ist, sodass die erzielte *Fitness* möglicherweise auch erreicht werden könnte, indem t neutral und unüberdachte Bereiche entsprechend niedriger bzw. Flurtüren entsprechend höher gewichtet werden. Zusammenfassend kann somit nicht das Fazit gezogen werden, dass eine Vermeidung von Innenbereichen im Allgemeinen sinnvoll ist. Auch in Abschnitt 4.2 „Analyse der gesammelten Daten“ ist bereits festgestellt worden, dass die Routen der ProbandInnen signifikant längere Wege in Innenbereichen aufweisen. Zusätzlich ist in diesem Abschnitt der Einfluss der Wetterverhältnisse auf die Länge unüberdachter Wege in präferierten Routen untersucht worden, Abbildung 4.4 auf Seite 117 visualisiert die dort gefundenen Erkenntnisse. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass bei einer zusätzlichen Berücksichtigung des Wetters wäh-

rend der Navigation eine höhere *Gewichtung* überdachter Wege bei Sonnenschein vorteilhaft ist.

• unüberdachter Fußweg ($t \approx 14,2; u \approx 1,0$)

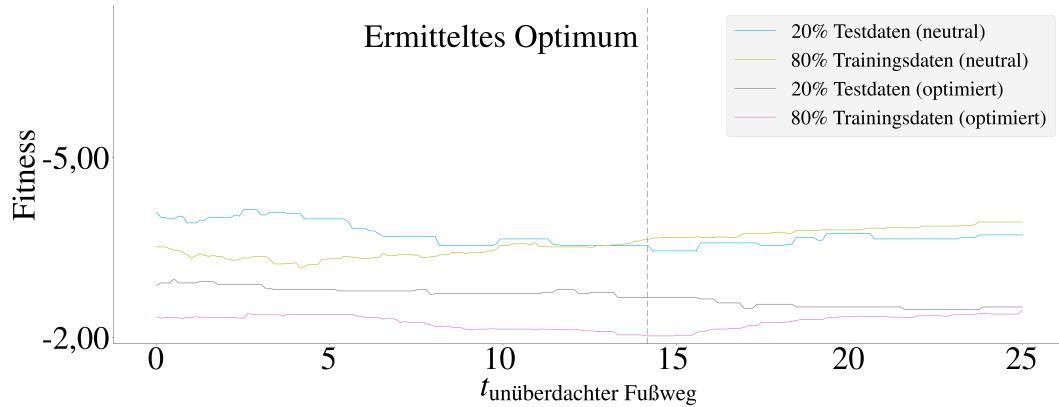


Abbildung 4.19: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors $t_{\text{unüberdachter Fußweg}}$

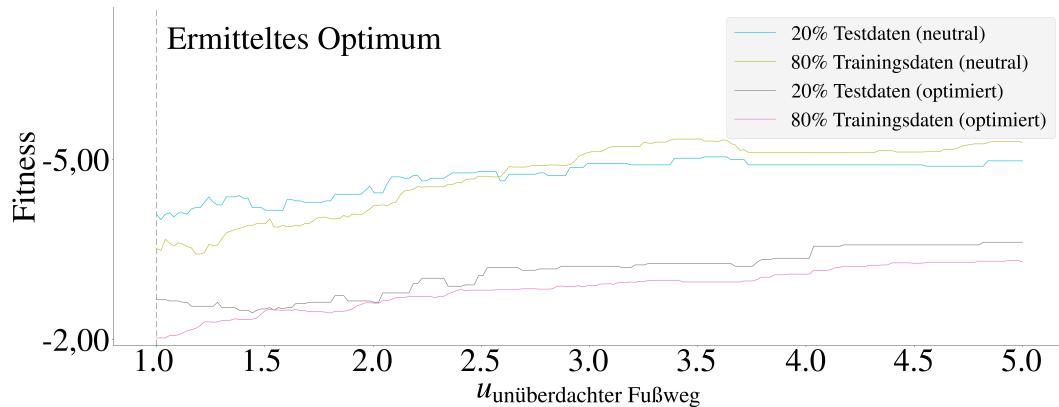


Abbildung 4.20: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors $u_{\text{unüberdachter Fußweg}}$

Die oberen Funktionskurven beider *Faktoren* in den Abbildungen 4.19 und 4.20 zeigen, dass eine leicht erhöhte Gewichtung unüberdachter Wege zu einer höheren Ähnlichkeit zu den präferierten Routen führt. So ist das Minimum des *Faktors* t bei den Trainingsdaten (neutral) knapp unter fünf, bei den Testdaten liegt es bei ungefähr 15. Auch die *Fitness* in Abhängigkeit von u bei ansonsten neutralen *Gewichtungsfaktoren* hat ihr Minimum bei einem Wert knapp über eins. Es erscheint hier zu spekulativ, auf die Gründe einzugehen, warum das Minimum von u bei den Testdaten unter und nicht wie beim Faktor t über dem Minimum der Trainingsdaten liegt, zumal die Schwankungen minimal sind. Auch im Zusammenwirken mit den anderen gewichteten Kriterien zeigt sich anhand des optimalen *Faktors* $t \approx 14,2$,

dass eine leicht höhere Gewichtung unüberdachter Wege zu Verbesserungen führt. Dennoch liegt das arithmetische Mittel der Weglängen in unüberdachten Bereichen bei optimierten Routen leicht über dem der kürzesten Routen, wie Abbildung 4.13 auf Seite 149 zeigt, weshalb auch hier auf eine Wechselwirkung mit anderen Kriterien geschlossen werden kann.

• geschlossener Bereich ($t \approx 19,0; u \approx 3,6$)

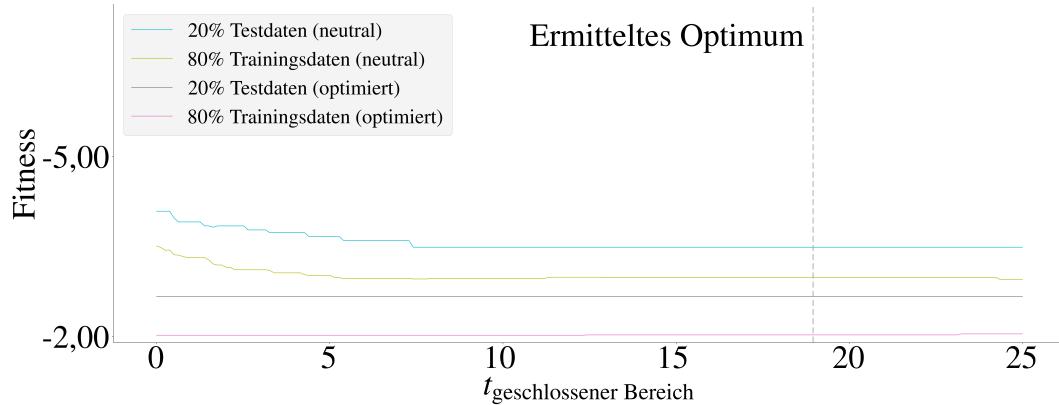


Abbildung 4.21: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors $t_{geschlossener Bereich}$

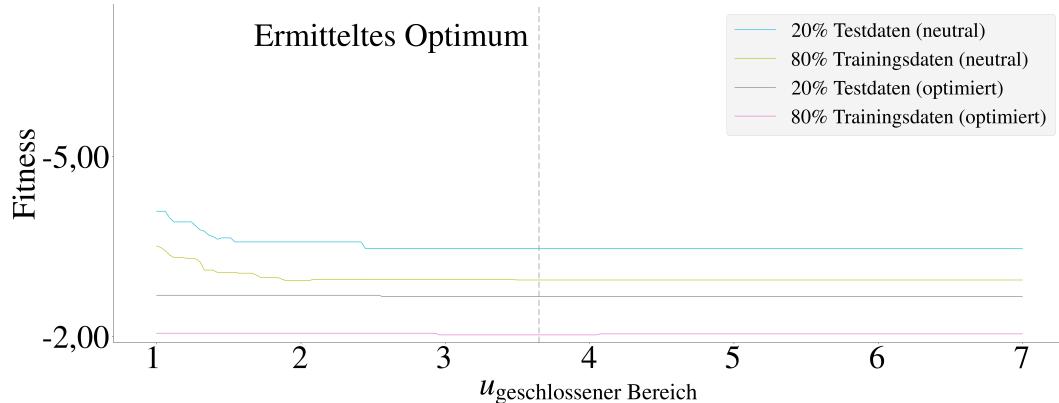


Abbildung 4.22: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors $u_{geschlossener Bereich}$

Wie bei den mit geschlossenen Bereichen korrelierenden Raumtüren (siehe Tabelle 4.4 auf Seite 150) zeigt sich anhand der ansonsten neutral gewichteten Kurven in den Abbildungen 4.21 und 4.22, dass generell eine hohe Gewichtung dieser Kategorie sinnvoll ist, um Abkürzungen durch Hörsäle, Büros oder Besenkammern zu vermeiden. Die unteren Kurven zeigen, dass zumindest am Gelände der Universität eine separate Gewichtung dieser Bereiche unnötig ist, da die Vermeidung bereits durch Raumtüren erzielt wird. Es mag dennoch Situationen geben, in denen eine

Gewichtung geschlossener Bereiche sinnvoll ist. Beispielsweise ist das Bestreben denkbar, einen besonders großen Hörsaal in der Nähe des gewünschten Sitzplatzes zu betreten, um bereits anwesende Personen nicht zu stören. Dies könnte durch eine entsprechende Gewichtung geschlossener Bereiche erzielt werden, während sich der *Gewichtungsfaktor* für Raumtüren nicht zur Modellierung dieser Präferenz eignet.

→ Stufen ($t \approx 14,1; u \approx 2,4$)

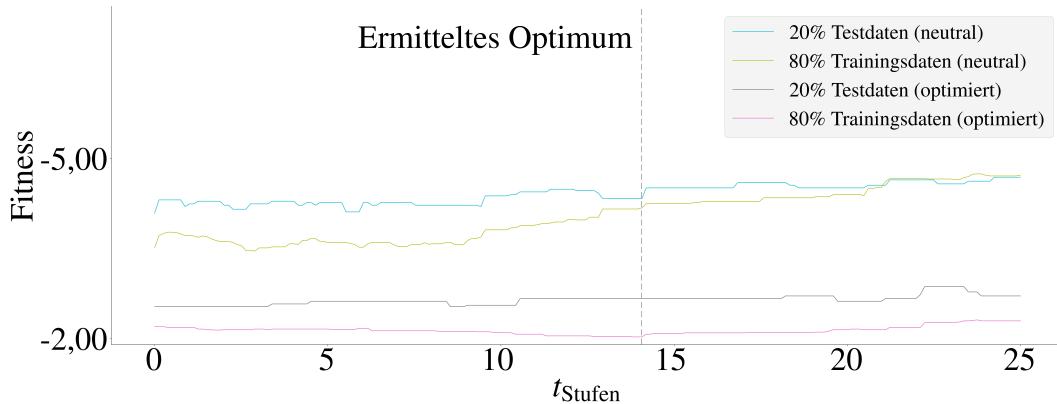


Abbildung 4.23: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors t_{Stufen}

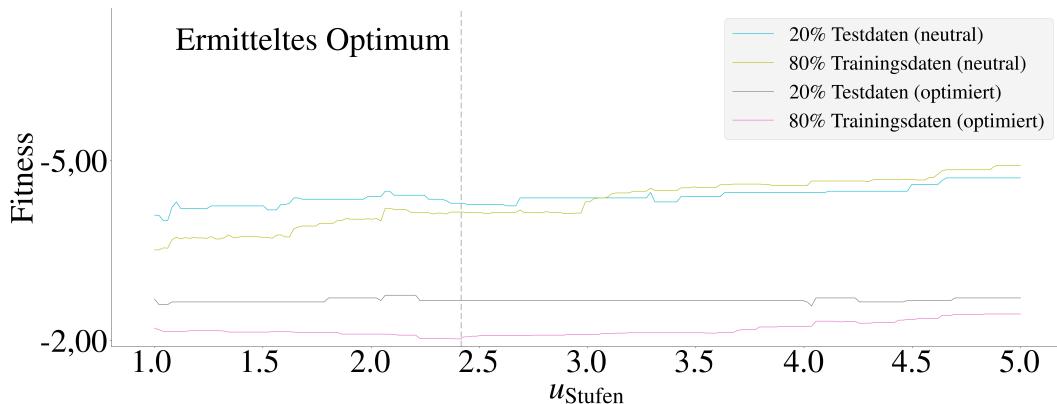


Abbildung 4.24: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors u_{Stufen}

In Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“ sind Stufen als semantische Kategorie definiert worden, um diese von Treppen zu unterscheiden, welche verschiedene Stockwerke miteinander verbinden. Der Verlauf der *Fitness* weist in den Abbildungen 4.23 und 4.24 keine klare Tendenz auf, die oberen Kurven mit ansonsten neutralen *Gewichten* lassen aber eine gewisse Ähnlichkeit zwischen Test- und Trainingsdaten erkennen. Die Festlegung optimaler Faktoren scheint hier eher willkürlich. Da am Campus der Universität Regensburg zahlreiche Stufen existieren, kann vermutet

werden, dass die Auswirkungen der *Faktoren t* und *u* aufgrund vieler einzelner konkreter Situationen zustande kommen, aus denen sich kaum eine generelle Regel ableiten lässt. Auch die Korrelation von Stufen mit Unterführungen (siehe Tabelle 4.4 auf Seite 150) kann auf eine konkrete Situation am Campus zurückgeführt werden, bei der eine Unterführung durch die Tiefstraße durch Stufen erreicht werden kann. Relevanz gewinnen die *Gewichtungsfaktoren* für Stufen und Rampen sicherlich bei einer Optimierung hinsichtlich der Präferenzen von Rollstuhlfahrern.

• Rampe ($t \approx 11,8; u \approx 3,6$)

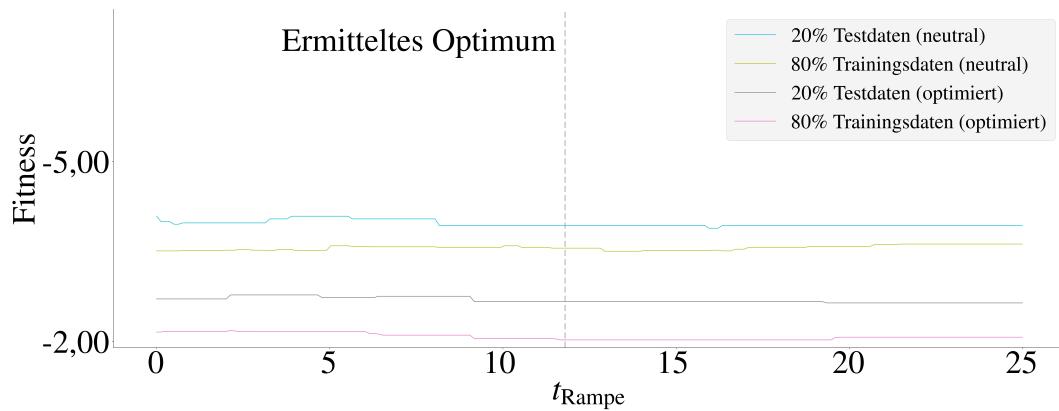


Abbildung 4.25: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors t_{Rampe}

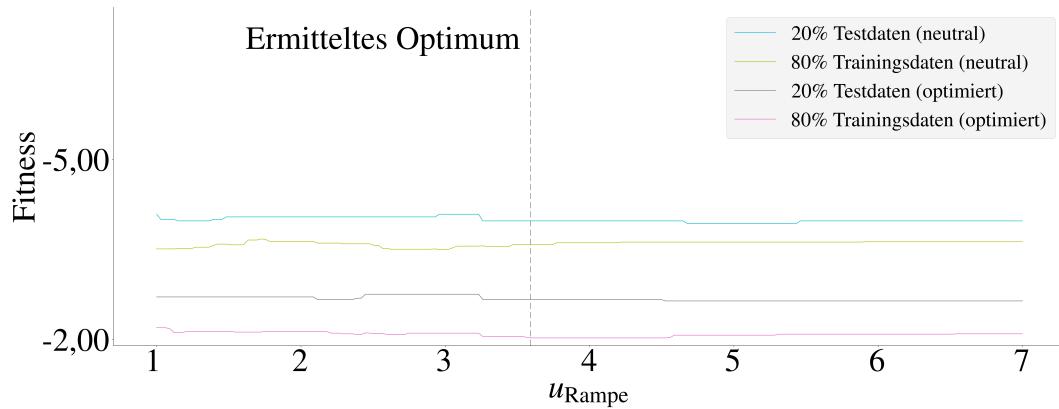


Abbildung 4.26: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors u_{Rampe}

Wie bei der semantischen Kategorie der Stufen lassen die durch die Abbildungen 4.25 und 4.26 aufgezeigten Änderungen der *Fitness* keine klare Tendenz erkennen, zumal in den erstellten Umgebung insgesamt nur 45 Rampen existieren, während immerhin 164 Stufen verzeichnet sind (Stand zum August 2019). Auch Abbildung 4.13 auf Seite 149 zeigt, dass es in den optimierten Routen keinen Unterschied in der Anzahl der Rampen im Gegensatz zu den kürzesten Routen gibt.

• Unterführung ($t \approx 5,4; u \approx 3,8$)

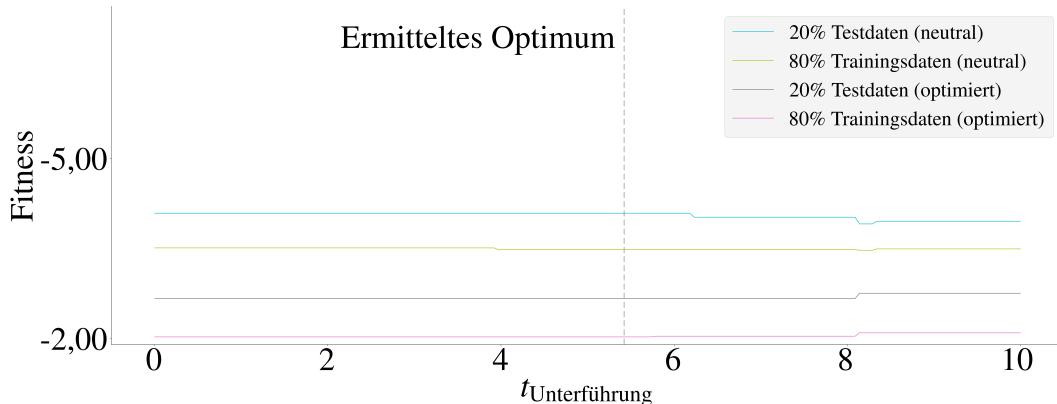


Abbildung 4.27: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors $t_{\text{Unterführung}}$

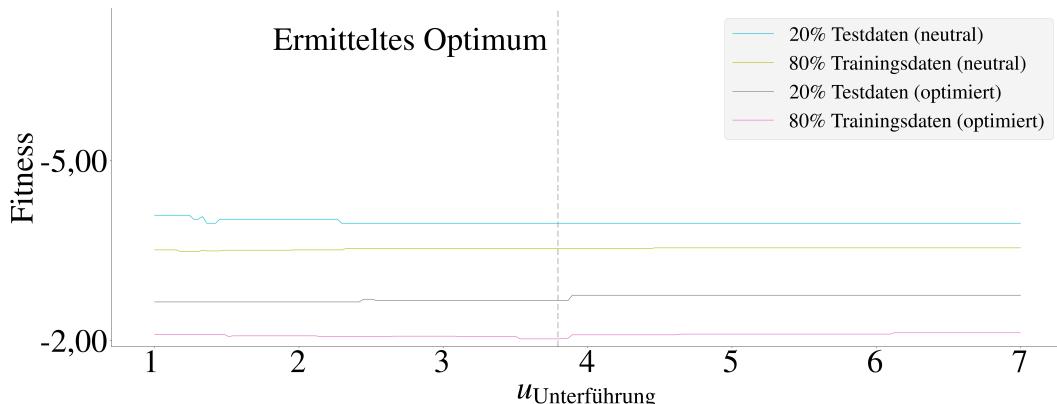


Abbildung 4.28: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors $u_{\text{Unterführung}}$

Am Gelände der Universität Regensburg existieren zahlreiche Unterführungen durch eine mit dem Parkhaus verbundene Tiefstraße, die sich in einigen Situationen als Abkürzungen anbieten, was vermutlich der Grund für die in Tabelle 4.4 auf Seite 150 gezeigte negative Korrelation mit unüberdachten Wegen ist. Es ist jedoch denkbar, dass diese Unterführungen vermieden werden, da die dunklen abgelegenen Passagen ein Gefühl der Unsicherheit vermitteln könnten. Die Abbildungen 4.27 und 4.28 lassen einen solchen Vermeidungswunsch allerdings kaum erkennen, lediglich die Testdaten führen bei ansonsten neutral festgesetzten *Gewichtungsfaktoren* zu einer leichten Verbesserung der *Fitness*. Auch Abbildung 4.13 auf Seite 149 zeigt, dass es zu fast keinen Unterschieden bezüglich der Anzahl von Unterführungen in kürzesten und optimierten Routen kommt. Der plötzliche Anstieg der *Fitness* bei Kombination mit anderen optimal gewichteten Kriterien bei $t \approx 8$ und $u \approx 4$ deutet auf eine konkrete Situation hin, die sowohl in Routen des Trainings- als auch des

Testdatensatzes vorkommt. Bei einer zu hohen Gewichtung von Unterführungen ergibt sich dort somit ein Umweg, der eine Verschlechterung der *Fitness* bedingt. Möglicherweise könnte die Vermutung, dass Unterführungen zwar höher gewichtet werden sollten als unüberdachte Bereiche, jedoch nicht zu hoch, um unverhältnismäßig lange Umwege zu vermeiden, durch einen umfangreicheren Referenzstandard gestützt werden.

• Straßenübergang ($t \approx 29,5; u \approx 10,9$)

Obwohl am Gelände der Universität einzelne relativ zentral gelegene Straßenübergänge existieren, zeigt Abbildung 4.13 auf Seite 149, dass es durch die erreichte Optimierung zu keiner Änderung der Anzahl von Straßenübergängen kommt. Auch die erzielte *Fitness* lässt sich durch die Faktoren t und u zum mindesten im abgetasteten Bereich nicht beeinflussen, weshalb hier auf die Darstellung der Funktionen verzichtet wird. Dieses Verhalten kann mit der konkreten Situation am Campus begründet werden: So existieren zwar Routen, bei denen die zentral gelegene Straße überquert wird, diesen Abschnitt zu vermeiden ist möglich, aber mit einem enormen Umweg verbunden. Um die Verhältnisse optimaler *Gewichtungsfaktoren* von Straßenübergängen in Kombination mit Ampeln oder Zebrastreifen sinnvoll untersuchen zu können, ist das Gelände der Universität Regensburg nicht geeignet.

• Aufzug ($v \approx 64,2; w \approx 17,8$)

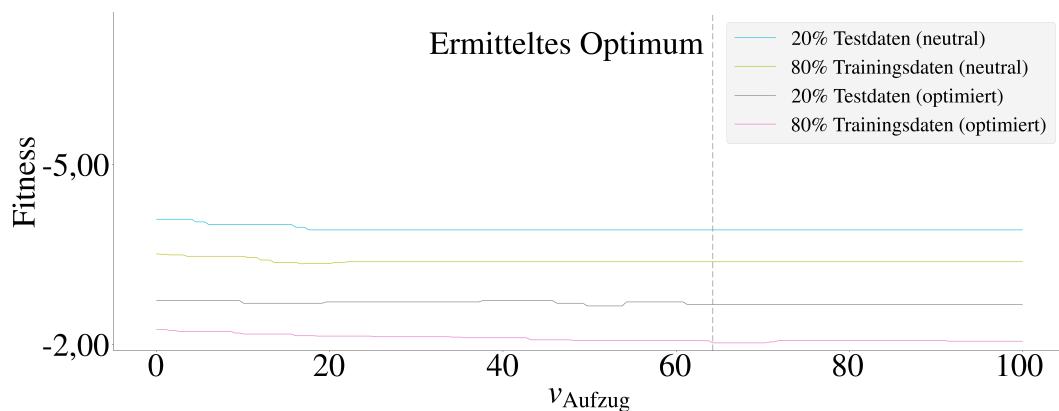
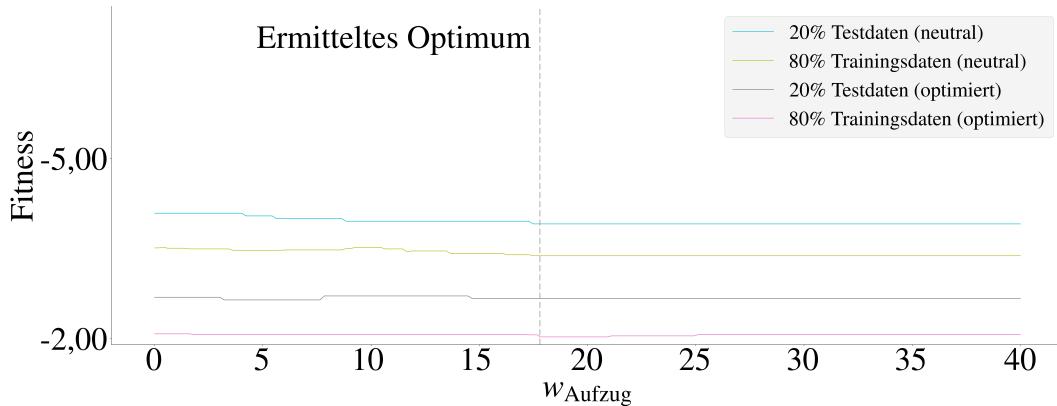


Abbildung 4.29: Änderung der *Fitness* in Abhängigkeit des Faktors v_{Aufzug}

Da am Gelände der Universität zahlreiche unterschiedliche Gebäude existieren, die im Mittel aber weniger als fünf Etagen umfassen, liegt nahe, dass Aufzüge eher vermieden und Treppen bevorzugt werden. Dies wird einerseits durch Abbildung 4.13 auf Seite 149 demonstriert, dort wird aufgezeigt, dass optimierte Routen im Mittel weniger Aufzüge und mehr Treppen als kürzeste Pfade beinhalten. Die negative Korrelation von Aufzügen und Treppen wird zusätzlich in Tabelle 4.4 auf Seite 150


 Abbildung 4.30: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors w_{Aufzug}

bestätigt. Auch der Verlauf der Funktionskurven in den Abbildungen 4.29 und 4.30 lässt erkennen, dass erhöhte *Faktoren v* und *w* bei Aufzügen zu besserer *Fitness* führen. Auch die relativ hohe Ausprägung des Faktors *v*, der unabhängig von der Zahl der zu überwindenden Etagen in die Kostenfunktion einberechnet wird, ist intuitiv zunächst nachvollziehbar. Dass die durch die Trainingsdaten (optimiert) erreichte *Fitness* in einem Bereich von ungefähr $64 < v < 72$ ein Minimum annimmt, könnte damit zusammenhängen, dass die benötigte Wartezeit auf einen Aufzug unabhängig von der Anzahl der Stockwerke ist, die damit gefahren werden sollen. Damit es ab einer bestimmten Etagenzahl aber zu einer Bevorzugung von Aufzügen kommt, wäre zusätzlich notwendig, dass der von der konkreten Etagenzahl abhängige Faktor *w* bei Aufzügen dementsprechend niedriger ist als bei Treppen. Dies ist jedoch nicht der Fall, da weiterhin auf den von ProbandInnen gewählten Routen des Referenzstandards insgesamt nur elf Etagen durch acht Aufzüge überwunden werden, scheint die dargelegte Interpretation nicht realistisch. Vielmehr liegt nahe, dass die Zahl der gesammelten Routen zu klein ist, um die Benutzung von Treppen und Aufzügen in Abhängigkeit der Etagenzahl zu erlernen. Da auf den Routen 190 Etagen durch 189 Treppenhäuser gewechselt werden, da somit auf den Pfaden fast immer nur ein einziges Stockwerk auf- oder abgestiegen wird, ist die Notwendigkeit, einen solchen Zusammenhang für die Routenführung an der Universität Regensburg zu erlernen, auch vergleichsweise gering.

Treppe ($v \approx 11,5$; $w \approx 12,3$)

Die jeweils oberen Funktionskurven mit ansonsten neutralen *Gewichtungsfaktoren* in Abbildung 4.31 und 4.32 zeigen, dass sich die *Fitness* ab einer gewissen Höhe beider *Faktoren* verschlechtert. Dies kann leicht mit dem bereits beschriebenen Umstand erklärt werden, dass Treppen in den Routen des Referenzstandards gegenüber Aufzügen bevorzugt werden. Es lässt sich jedoch weiterhin erkennen, dass

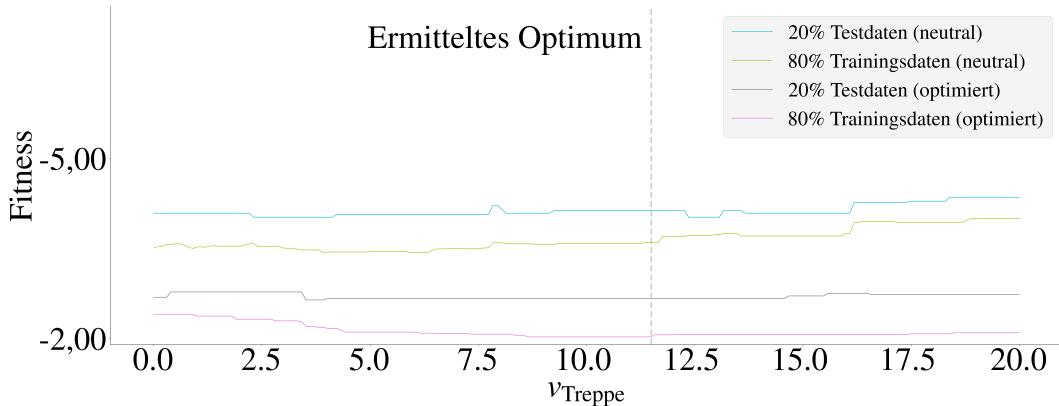


Abbildung 4.31: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors v_{Treppe}

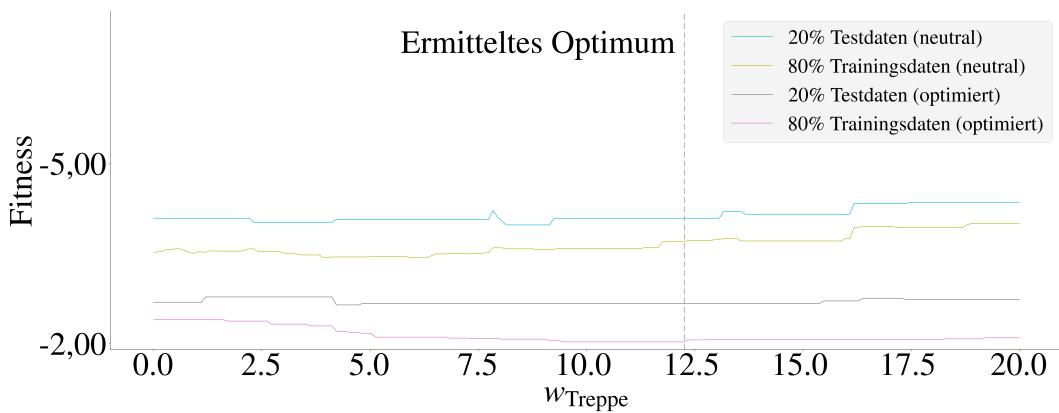


Abbildung 4.32: Änderung der Fitness in Abhängigkeit des Faktors w_{Treppe}

die *Fitness* in allen Kurven, auch mit ansonsten optimalen *Gewichten*, besser wird, wenn Treppen nicht neutral, sondern mit leicht erhöhten *Faktoren* versehen werden. Möglicherweise ergibt sich dieser Zusammenhang aufgrund der leichten Hanglage des Campus der Universität Regensburg. Dort ist es auf manchen Routen möglich, Treppenhäuser komplett zu vermeiden und stattdessen einen leichten Anstieg am Außengelände des Campus, teils mit durch *Edges* modellierten Stufen, in Kauf zu nehmen. Dieser vermutete Zusammenhang lässt sich durch die in Tabelle 4.4 auf Seite 150 aufgelisteten Korrelationen jedoch nicht bestätigen und bleibt spekulativ.

Rampe ($v \approx 8,0; w \approx 12,5$)

Im Umgebungsmodell der Universität sind insgesamt lediglich vier Rampen enthalten, die aufgrund eines Etagenwechsels mittels *Leveledges* modelliert worden sind. Diese sind weder in den von Personen präferierten noch in den zugeordneten kürzesten oder optimierten Routen enthalten. Es kommt dadurch zu keiner Änderung der *Fitness* in Abhängigkeit der Faktoren v und w . Die ermittelten Werte haben sich

bei der Optimierung somit willkürlich ergeben, eine Interpretation ist deshalb nicht möglich, auf eine Darstellung der Funktionskurven wird verzichtet.

4.5.3 Übertragbarkeit

Wie Lyardet et al. (2008) betonen, könne eine Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Route von individuellen Bedürfnissen abhängen. Auf diesen Aspekt ist bereits in Unterabschnitt 3.4.1 „Berücksichtigung individueller Präferenzen“ eingegangen worden. Die Autoren schreiben weiterhin, dass die Bedingungen in unterschiedlichen Umgebungen so weit auseinander gehen würden, dass sie entscheidenden Einfluss auf die Gestaltung präferierter Pfade nähmen.

Im Hinblick auf die im Rahmen dieser Dissertationsschrift ermittelten *Gewichtungsfaktoren* stellt sich deshalb die Frage, ob die konkreten Ausprägungen genutzt werden können, um die Routenberechnung auch in anderen Arealen zu verbessern. Bereits im vorangegangenen Unterabschnitt 4.5.2 „Interpretation“ ist auf den Einfluss spezieller Gegebenheiten am Campus auf verschiedene *Faktoren* eingegangen worden. Beispielsweise werden Treppen in den Routen des Referenzstandards fast immer gegenüber Aufzügen bevorzugt. Rolltreppen kommen am Gelände der Universität schlichtweg nicht vor, ein sinnvoller *Faktor* kann somit nicht bestimmt werden. Dennoch können die *Gewichtungsfaktoren* prinzipiell auf andere Umgebungen übertragen werden, es wäre durchaus denkbar, dass die dadurch ermittelten Routen ähnlicher zu von Personen präferierten Routen sind als kürzeste Routen mit neutralen *Gewichtungen*. Dies könnte anhand eines Referenzstandards geprüft werden, der aus favorisierte Routen in einer andersgearteten Umgebung besteht. Aufgrund des Aufwands einer solchen Datenerhebung wird diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht durchgeführt. Stattdessen sollen die Auswirkungen der Routenberechnung mit angepassten *Gewichtungsfaktoren* erneut mittels eines Datensatzes aus Routen mit zufällig gewählten Start- und Zielpunkten untersucht werden. Zum Vergleich wird hierfür ein Regensburger Einkaufszentrums, das Donau-Einkaufszentrum, herangezogen, für das unter Mithilfe verschiedener studentischer Hilfskräfte ein Umgebungsmodell erstellt worden ist, das konform zur in Abschnitt 2.3 „Spezifikation des Umgebungsmodells“ aufgeführten Spezifikation ist.

Vor der eigentlichen Untersuchung berechneter Routen wird hier zunächst eine Übersicht über das Areal des Einkaufszentrums im Vergleich zum Modell der Universität Regensburg gegeben. Hierfür stellt Tabelle 4.5 einige Kennwerte gegenüber. Trotz der 140 Einzelhandelsgeschäfte weist das Donau-Einkaufszentrum eine weit geringere Gesamtfläche als die Universität auf. Dabei handelt es sich bei dem in der Tabelle eingetragenen Wert um die rechnerische Fläche, die von den *Nodes* im Umgebungsmodell aufgespannt wird, die eigentliche Verkaufsfläche fällt geringer aus.

	Universität Regensburg	Einkaufs- zentrum	Verhältnis $\frac{\text{Universität}}{\text{Einkaufszentrum}}$
Gesamtfläche aller Stockwerke	4,3 km ²	0,15 km ²	29
Aufaddierte Länge aller <i>Edges</i>	110 km	6,5 km	17
• Unüberdachte Wege	22 km	0,70 km	31
● einfache Stützpunkte	12.365	205	60
☒ Freiflächen	218	39	6
☐ Flurtüren	1.563	3	521
☒ Einzelhandelsgeschäfte	2	140	0,01
☒ Aufzüge	320	9	36
☒ Treppen	151	9	17
☒ Rolltreppen	-	2	-

Tabelle 4.5: Vergleich des Umgebungsmodells der Universität Regensburg mit einem Einkaufszentrum

Das in der dritten Spalte gezeigte Verhältnis von durch *Edges* verzeichneter Wege (17) ist etwas niedriger als das Flächenverhältnis (29), was bei einer rentablen Nutzung der Verkaufsfläche gegenüber den weitläufigen Grünflächen am Campus naheliegend ist. Außenbereiche existieren im Umgebungsmodell des Einkaufszentrums lediglich zur Verzeichnung einiger Parkflächen, auf die Modellierung von Parkhäusern ist allerdings in beiden Arealen verzichtet worden. Da die absolute Länge aufaddierter *Edges* im Einkaufszentrum (6,5 km) trotz der höheren Dichte deutlich geringer ist als an der Universität (110 km), kann vermutet werden, dass es für Pfadverläufe im Einkaufszentrum weniger Variationsmöglichkeiten gibt.

Das im Speziellen hohe Verhältnis einfacher Stützpunkte (60) kann anhand der zahlreichen Korridore in den Gebäuden der Universität erklärt werden, in denen jede Abzweigung zu einem Bürraum durch einen solchen Stützpunkt modelliert ist. Im Gegensatz dazu zeichnet sich das Gelände des Einkaufszentrums durch sehr viel breitere Einkaufspassagen aus, was sich in dem relativ niedrigen Verhältnis der Freiflächen-*Nodes* niederschlägt (6), die zur Modellierung dieser Bereiche hauptsächlich verwendet worden sind.

Zur Ermittlung der Auftrittshäufigkeiten von Aufzügen, Treppen und Rolltreppen sind die Zahlen der im Umgebungsmodell eingetragenen *Leveledges* durch zwei dividiert worden, da eine einzelne *Leveledge*, wie in Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“ erläutert, einen unidirektionalen Etagenübergang repräsentiert. Es werden somit nicht die Anzahlen von Treppenhäusern oder Aufzugschächten verglichen, die Zahlen geben vielmehr die Verbindungen jeweils zweier Stockwerke wieder. Zwar

entspricht die Zahl der Treppen im Einkaufszentrum derer von Aufzügen (9), diese liegen jedoch häufig nicht in unmittelbarer Nähe zueinander. Hierdurch könnten durch die trainierten *Gewichtungen* somit Abweichungen von den kürzesten Routen entstehen.

Wie dies bereits in Unterabschnitt 4.5.2 „Interpretation“ für das Gelände der Universität geschehen ist, werden die Auswirkungen der Routenberechnung nun durch einen Datensatz von 100.000 Routen mit zufällig gezogenen Start- und Zielpunkten untersucht. Da es anhand der in Abschnitt 4.4 „Optimierung“ durchgeföhrten Optimierung nicht möglich gewesen ist, *Gewichtungsfaktoren* für Rolltreppen festzulegen, werden die *Faktoren v* und *w* für Rolltreppen auf die für Treppen ermittelten Werte eingestellt. Während die simulierten kürzesten Routen an der Universität Regensburg, wie in Unterabschnitt 4.5.2 „Interpretation“ aufgeführt worden ist, im arithmetischen Mittel 503 m lang sind, weisen die Routen durch das Einkaufszentrum eine durchschnittliche Strecke von nur 118 m auf. Es könnte nun unterstellt werden, dass Wege im Donau-Einkaufszentrum mit dem Ziel angelegt worden sind, Kunden auf Umwegen zu leiten, die an möglichst vielen Geschäften vorbeiführen. Um auf diese Vermutung einzugehen, können die ermittelten kürzesten Routen ins Verhältnis zur Luftlinie zwischen den jeweiligen Start- und Zielpunkten gesetzt werden. Da die Höhe der Stockwerke nicht bekannt ist, wird sie bei der Berechnung der Luftlinie, wie dies auch bei der Ermittlung der kürzesten Route der Fall ist, vernachlässigt. Es zeigt sich, dass die kürzesten Routen durch das Einkaufszentrum im arithmetischen Mittel 40 % länger sind als der direkte Abstand. Dagegen liegen die kürzesten Routen durch die Universität sogar 65 % über der Luftlinie. Entgegen der Vermutung ergeben sich am Gelände der Universität somit vergleichsweise längere Wege, aufgrund der Größe des Datensatzes wird darauf verzichtet, die Signifikanz dieses Unterschiedes zu zeigen. Eine mögliche Erklärung des höheren Streckenverhältnisses ergibt sich aufgrund der Vielzahl an großen Gebäuden an der Universität. So liegen die Aus- bzw. Eingänge der Gebäude häufig nicht im idealen Winkel zum Zielpunkt, das Verlassen und Betreten von Gebäuden führt somit am Campus zwangsläufig zu Umwegen.

Um nun nach diesem allgemeinen Vergleich der Areale der Frage nachzugehen, wie sinnvoll eine Übertragung der ermittelten *Gewichtungsfaktoren* auf die Umgebung des Einkaufszentrums ist, sollen die Auswirkungen einer Routenberechnung mit optimierten *Gewichten* verglichen werden. Wie in Unterabschnitt 4.5.2 „Interpretation“ beschrieben, sind die optimierten Routen an der Universität im arithmetischen Mittel um 5,3 % länger als die kürzesten. Im Vergleich dazu sind die optimierten Pfade durch das Einkaufszentrum nur 4,1 % länger. Grundsätzlich zeigt sich dadurch, dass sich Alternativrouten anhand der modifizierten *Gewichtungsfaktoren* selbst in der vergleichsweise kleinen Umgebung des Einkaufszentrums ermitteln lassen. Ein naheliegender Grund für die geringere Abweichung im Einkaufszentrum

könnte sein, dass die simulierten Routen durch das Einkaufszentrum sehr viel kürzer sind als am Gelände der Universität, was auf den in Tabelle 4.5 aufgezeigten Größenunterschied zurückgeführt werden kann. So ist bereits in Unterabschnitt 4.5.2 „Interpretation“ gezeigt worden, dass es bei Routen unter ca. 100 m an der Universität nur zu geringen Unterschieden zwischen optimierten und kürzesten Routen kommt. Es werden deshalb erneut die zufällig gewählten Start- und Zielpunkte anhand der Länge der kürzesten Routen in Gruppen zu 50 m unterteilt. Abbildung 4.33 zeigt die Verteilung des relativen Umwegs bzw. der „Percent Above Optimal“ (vergleiche Hölscher et al., 2011; Wiener et al., 2009) der gruppierten Routen durch das Einkaufszentrum im Vergleich zu den Routen am Gelände der Universität. Auch

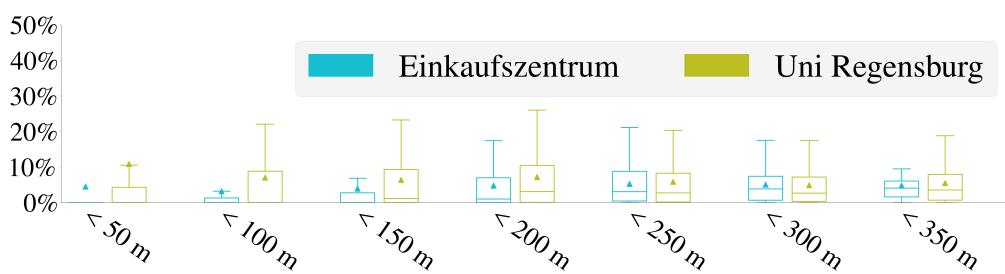


Abbildung 4.33: Relativer Umweg der optimierten Routen durch das Einkaufszentrum im Vergleich zur Universität Regensburg

hier werden Ausreißer entfernt, die über der Summe des oberen Quartils und dem 1,5-fachen Interquartilsabstand liegen. Die Grafik endet bei einer Streckenlänge von 350 m, da die längste Route im Einkaufszentrum 347 m umfasst. Es lässt sich erkennen, dass der durch die Optimierung erzeugte Umweg bei den Routen unter 200 m im Einkaufszentrum deutlich geringer ist. Auch unabhängig von der Streckenlänge haben die ermittelten *Gewichtungsfaktoren* im Einkaufszentrum somit geringere Auswirkungen als an der Universität. Dieser Umstand legt die Theorie nahe, dass die durchgeführte Optimierung in der Umgebung der Universität zu einer Vermeidung bestimmter semantischer Kategorien führt, welche für die Umgebung des Einkaufszentrums nicht relevant ist. Es sollen deshalb im Weiteren die Auswirkungen auf die einzelnen Routenbestandteile aufgezeigt und mit denen der Universität verglichen werden.

Abbildung 4.34 stellt dazu die Verteilungen der Abweichungen hinsichtlich verschiedener *Node*-, *Leveledge*- und *Edge*-Typen gegenüber.

Wie bereits im vorhergehenden Unterabschnitt werden dazu die Differenzen aus den Vorkommenshäufigkeiten von *Nodes* und *Leveledges* bzw. den aufaddierten Längen von *Edges* zwischen den Routen mit optimierten *Gewichtungen* und kürzesten Routen gebildet. Auch bei diesem Vergleich stellen die Streckenlängen der simulierten Routen eine entscheidende Einflussgröße dar: Da die Routen an der

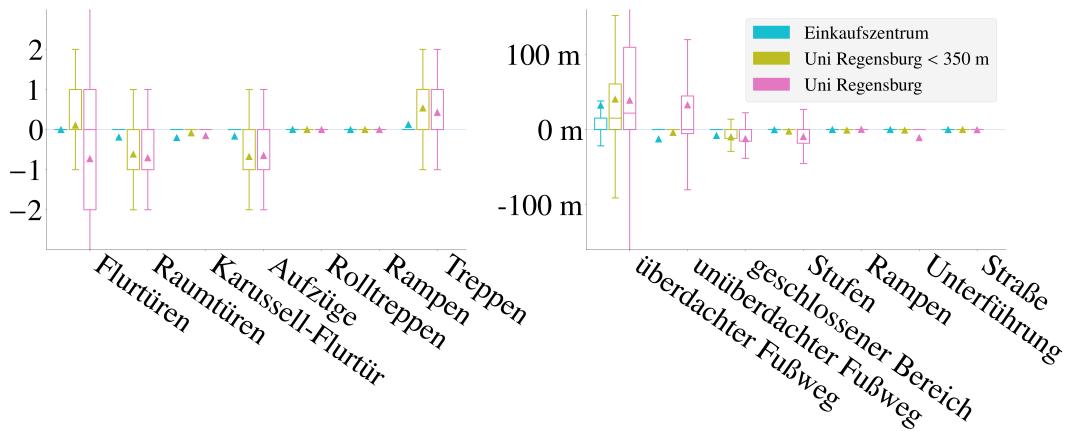


Abbildung 4.34: Vergleich der durch die Optimierung hervorgerufenen Häufigkeitsdifferenzen verschiedener Pfadelemente gegenüber kürzesten Routen

Universität im Mittel mit 503 m länger sind als die Routen am Einkaufszentrum mit 118 m, ist naheliegend, dass an der Universität auch eine höhere Anzahl der verschiedenen Pfadelemente vermieden wird. Zusätzlich zu dem Vergleich zwischen Einkaufszentrum und Universität werden deshalb in der Grafik die Routen an der Universität separat dargestellt, die maximal 350 m lang sind. Zwar erfolgt dadurch keine Angleichung der Längenverteilungen – die Routen der Universität unter 350 m liegen mit durchschnittlich 218 m immer noch über den Routenlängen am Einkaufszentrum. Dennoch können durch diesen zusätzlichen Vergleich Tendenzen aufgezeigt werden.

Zum einen zeigt die Grafik, dass es hinsichtlich Rampen und Straßenübergängen genau wie am Gelände der Universität zu keinen Änderungen kommt. Ebenfalls werden die Rolltreppen, die an den Enden zweier Flure des Einkaufszentrums liegen, auf optimierten Routen weder bevorzugt noch vermieden. Flurtüren, Unterführungen sowie Stufen innerhalb eines Stockwerks kommen am Gelände des Einkaufszentrums nicht vor, weshalb es auch bei diesen Kategorien im Gegensatz zur Universität zu keinen Änderungen kommt.

Wie vermutet, ergibt sich eine Abweichung aus der Bevorzugung von Treppen gegenüber Aufzügen. So liegen auf den optimierten Routen weniger Aufzüge, dafür mehr Treppen. Dass die Höhe der Abweichung geringer ist als die beiden Vergleichswerte der Universität, kann leicht damit erklärt werden, dass sich die Verkaufsfläche des Einkaufszentrums auf nur zwei Stockwerke verteilt. Einerseits ist dadurch die Wahrscheinlichkeit hoch, dass Start- und Zielpunkt innerhalb derselben Etage liegen, andererseits sind die zwei Etagen sehr ähnlich zueinander aufgebaut, sodass auf einer Route maximal ein Aufzug durch eine Treppe ersetzt werden kann.

Weitere Abweichungen in den optimierten Routen des Einkaufszentrums ergeben sich bei den Zahlen von Karussell-Flurtüren sowie bei den Längen überdachter und

unüberdachter Bereiche. Eine genauere Betrachtung konkreter Routen zeigt, dass in kürzesten Routen gelegentlich quer über die Parkplatzanlagen abgekürzt wird, welche durch Drehtüren erreicht werden können. Eine Vermeidung dieser Außenbereiche mag tatsächlich sinnvoll sein, zumal parkende Autos in der Modellierung vernachlässigt worden sind, sodass die tatsächlichen Wege über die Parkplatzbereiche länger sein könnten als die im Modell verzeichneten *Edges*. Dennoch muss angeommen werden, dass die optimalen *Gewichtungsfaktoren* dieser Kategorien nicht mit den *Faktoren* an der Universität übereinstimmen. Inwieweit die Einkaufspassagen tatsächlich gegenüber den Parkflächen bevorzugt werden, kann nur durch eine Betrachtung präferierter Routen festgestellt werden, die nicht Teil der vorliegenden Arbeit ist.

Zuletzt zeigt sich, dass es im Einkaufszentrum, genau wie an der Universität, zu einer Vermeidung von geschlossenen Bereichen und Raumtüren kommt. In den Modellen des Einkaufszentrums sind geschlossene Bereiche zur Kennzeichnung von Wegen innerhalb der Einzelhandelsgeschäfte genutzt worden. Raumtüren kennzeichnen die meist offen stehenden Eingangstüren zu diesen Geschäften. Der Grund des geringeren Auftretens der Elemente dieser semantischer Kategorien in optimierten Routen lässt sich erneut durch eine Untersuchung einzelner konkreter Routen ermitteln. So existieren im Einkaufszentrum zwei Bekleidungsgeschäfte, durch welche Pfade potentiell abgekürzt werden können. Da Abkürzungen durch Büros, Hörsäle und Besenkammern an der Universität in den präferierten Routen des Referenzstandards eher vermieden werden, kommt es auch zu einer Vermeidung von Pfaden durch diese Geschäfte hindurch. Dies mag jedoch nicht unbedingt den Präferenzen realer Personen entsprechen. So ist zwar einerseits vorstellbar, dass es innerhalb der Bekleidungsgeschäfte zu Engpässen kommt, sodass ein längerer Weg um das Geschäft herum trotzdem schneller zurückgelegt werden kann. Andererseits könnte der Weg durch das Geschäft aber auch abwechslungsreicher sein und deshalb, im Gegensatz zu den universitären Routen, von Personen eher bevorzugt werden.

Insgesamt lässt sich somit zunächst zusammenfassend sagen, dass höhere Gewichtungen einzelner *Faktoren* auch im Areal des Einkaufszentrums zu Routen führen, die von den kürzesten abweichen. Bei der Vermeidung von Aufzügen und Wegen über Parkflächen mögen diese Abweichungen sinnvolle Verbesserungen darstellen. In anderen Situationen führen die optimierten Werte allerdings zu keinen Verbesserungen, die Vermeidung der Innenbereiche von Einzelhandelsgeschäften könnte beispielsweise sogar zu einer Verschlechterung gegenüber kürzesten Routen führen. Ein Referenzstandard, der aus präferierten Pfaden in dieser Umgebung besteht, könnte also helfen, die *Gewichtungsfaktoren* besser an das Areal des Einkaufszentrums zu adaptieren. Um eine generischere Routenberechnung zu ermöglichen, könnten weiterhin zusätzliche semantische Kategorien eingeführt werden, sodass beispielsweise

nicht Parkflächen mit Grünflächen oder Verkaufsflächen mit Wegen durch Hörsäle gleichgesetzt werden.

Eine nicht zu vernachlässigende Schwierigkeit ergibt sich allerdings aus dem bereits genannten Umstand, dass Personen Wege durch oder auch entlang von Geschäften bevorzugen könnten. Es ist deshalb notwendig, eine grundsätzliche Limitation zu hinterfragen, die in Kapitel 3 „Präferenzbasierte Pfadplanung“ getroffen worden ist, um den Rahmen dieser Dissertation zu beschränken. Dort ist festgelegt worden, dass mittels des erarbeiteten Verfahrens immer ein fest definierter Zielpunkt erreicht werden soll. Durch die *Gewichtungsfaktoren* lassen sich verschiedene Pfadelemente vermeiden oder gegenüber anderen bevorzugen, jedoch wird durch den A*-Algorithmus immer die kürzeste Route hinsichtlich der verschiedenen gewichteten Entitäten berechnet. Es ist deshalb beispielsweise nicht möglich, eine Route einzig aufgrund der Tatsache zu bevorzugen, dass entlang des Pfades zwei statt einem einzelnen favorisierten Objekt, wie einem Einzelhandelsgeschäft, liegen. In Abschnitt 3.2 „Nutzerstudien“ ist gezeigt worden, dass sich Präferenzen, die Personen bei ihren Routen durch den Nürnberger Hauptbahnhof nennen, mittels dieser Herangehensweise erfolgreich berücksichtigen lassen. Beispielsweise haben Probanden den Wunsch geäußert, Rolltreppen zu bevorzugen, tatsächlich liegt aber nahe, dass sie keine Route favorisieren, auf der möglichst alle Rolltreppen am Bahnhof besichtigt werden können. Vielmehr werden Rolltreppen gegenüber anderen Pfadelementen, wie Aufzügen oder Treppen, bevorzugt, was durch eine höhere Gewichtung der Letzteren erreicht werden kann.

Es wäre jedoch denkbar, dass BesucherInnen eines Einkaufszentrums nicht bemüht sind, ein einzelnes konkretes Geschäft anzusteuern, sondern vielmehr möglichst unterschiedliche Schaufenster begutachten möchten. Wer Schuhe kaufen will, sucht möglicherweise einen Rundweg, der an allen Schuhläden vorbeiführt, dies ließe sich gegebenenfalls durch eine Routenplanung mit mehreren Zielorten, die nacheinander angesteuert werden, erreichen. Schwieriger wird die Situation, wenn die Präferenz existiert, entlang möglichst vieler Geschäfte zu laufen, während gleichzeitig die dafür notwendige Strecke minimiert werden soll. Um eine solche Bestrebung berücksichtigen zu können, wäre eine Gewichtung verschiedener Objekte sinnvoll, die mit negativen Kosten in die Routenberechnung einfließt. Um dabei zu verhindern, dass Pfade ermittelt werden, die im Kreis laufen, könnten Rundwege generell verhindert werden. Alternativ wäre es möglich, den Betrag der Negativkosten für Objekte zu verringern, wenn diese wiederholt auf einer Route liegen. Ein Algorithmus zur Suche nach dem kürzesten bzw. kostenminimierendsten Pfad, wie er im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, ist für die Berücksichtigung solcher Gewichtungen jedoch nicht unmittelbar geeignet.

Die Frage der Übertragbarkeit der in dieser Dissertation erarbeiteten Gewichtungen lässt sich somit nicht eindeutig beantworten. Wie bereits geschrieben, mag

es zu Verbesserungen gegenüber kürzesten Routen führen, wenn die konkreten *Gewichtsausprägungen* direkt auf ähnliche Umgebungen übertragen werden. Da die Situation an der Universität Regensburg viele Eigenheiten aufweist, ist eine Erhebung von präferierten Routen in anderen Umgebungen sinnvoll, um entweder generischere Ausprägungen zu erhalten oder um die speziellen Gegebenheiten in anderen Umgebungen besser abbilden zu können. In Arealen, wie dem betrachteten Einkaufszentrum, in denen Personen möglicherweise gerne Zeit verbringen und in denen nicht die Erreichung eines Zielpunktes im Vordergrund steht, scheint der verwendete Pfadsuchalgorithmus problematisch. Dennoch können Präferenzen datengetrieben operationalisiert werden, auf alternative Ansätze wird deshalb in Abschnitt 5.3 „Ausblick“ eingegangen.

5. Fazit

In diesem abschließenden Kapitel wird die Arbeit nun zunächst zusammengefasst. In Abschnitt Abschnitt 5.2 „Wissenschaftliche Verwertbarkeit der Arbeit“ werden die wesentlichen Erkenntnisse aufgeführt und in Abschnitt 5.3 „Ausblick“ wird auf offene Fragen, die Inhalt anknüpfender Arbeiten sein könnten, eingegangen.

5.1 Zusammenfassung

Die hier vorliegende Forschungsarbeit lässt sich in zwei aufeinander aufbauende Aspekte unterteilen. Das erste der verfolgten Ziele stellt die Entwicklung eines Systems zur Berechnung von Fußwegrouten in Innen- und Außenbereichen dar. Dieses wird am konkreten Beispiel der Universität Regensburg umgesetzt und erprobt. Aufbauend auf diesem System beschreibt der zweite Teil der Arbeit die Ermittlung von Pfadverläufen, die von Personen gegenüber kürzesten Pfaden präferiert werden, als Optimierungsproblem. Durch Maximierung einer definierten Qualitätsfunktion können dadurch datengetrieben Alternativen zu kürzesten Routen ermittelt werden. Auch dieses Verfahren wird für die beispielhafte Umgebung der Universität Regensburg angewandt und evaluiert.

Beide Aspekte dieser Arbeit lassen sich nun in kleinere Teilbereiche zerlegen. So muss zur Generierung von Pfadverläufen vorerst ein Modell der Außen- und Innenbereiche erstellt werden, innerhalb derer die NutzerInnen navigiert werden sollen. Das Vorgehen zur Spezifikation eines geeigneten Modells findet sich in Kapitel 2 „Modellierung der Umgebung“. Zunächst werden die sich stellenden Anforderungen in Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“ zusammengefasst. Anhand einiger Übersichtsarbeiten werden in Abschnitt 2.2 „Forschungsstand“ verschiedene Varianten von Umgebungsmodellen vorgestellt und erläutert. Das für den Rahmen dieser Dissertation erarbeitete Umgebungsmodell wird dann in Abschnitt 2.3 „Spezifikation des Umgebungsmodells“ beschrieben. Dabei erfolgt eine semantische Unterscheidung der für die Routenberechnung und Navigation relevanten Elemente entlang potentieller Routen, wie beispielsweise Unterführungen, Büroräume oder Drehtüren. Der Routenberechnung liegt weiterhin ein hybrides Modell zugrunde, das die Umgebung hierarchisch unterteilt und die Pfadsuche anhand eines Graphen ermöglicht, der neben der Topologie auch Informationen zur geometrischen Lage

der symbolischen Koordinaten enthält. Auf die zur konkreten Realisierung festzulegenden Details wird in Abschnitt 2.4 „Technische Umsetzung“ eingegangen. Abschließend wird in diesem Kapitel in Abschnitt 2.5 „Modellierungsapplikation“ die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte webbasierte Plattform zur Erstellung spezifikationskonformer Modelle vorgestellt. Mit der Unterstützung zahlreicher studentischer Hilfskräfte sind damit Pläne der Außen- und Innenbereiche der Universität Regensburg und eines Einkaufszentrums erstellt worden. Mehrere in der Ausbildung befindliche ortskundige Busfahrer haben mitgeholfen, die Haltestellen und Bahnhöfe der für das Projekt *NADINE* relevanten Pilotregionen Nürnberg und Erfurt zu modellieren.

Die Generierung von Routen unter Beachtung verschiedener Nutzervorlieben anhand der zuvor erstellten Umgebungsmodelle ist Thema von Kapitel 3 „Präferenzbasierte Pfadplanung“. Einleitend wird dort in Abschnitt 3.1 „Forschungsstand“ mittels einschlägiger Forschungsarbeiten gezeigt, dass Personen kürzeste Routen im allgemeinen nicht bevorzugen und dass diese weiterhin für die Anzeige in Navigationssystemen nicht optimal geeignet sind. Folgend wird in diesem Abschnitt der Frage nachgegangen, wie sich die Idee, Pfade hinsichtlich verschiedener Nutzerpräferenzen zu planen, technisch realisieren lässt. Dabei wird im Speziellen die Schwierigkeit der Operationalisierung der Befriedigung von Nutzerbedürfnissen in Abhängigkeit verschiedener Pfadeigenschaften herausgearbeitet. Daraus resultierend wird auf die Notwendigkeit eines datengetriebenen Ansatzes hingewiesen, um erlernen zu können, welche Kriterien von NutzerInnen favorisierte Routen optimalerweise erfüllen. Um nun vorab die Sicherheit zu erhöhen, dass die unmittelbar in dem entwickelten Umgebungsmodell enthaltenen Eigenschaften der Umgebung geeignet sind, Pfadverläufe hinsichtlich etwaiger Nutzerpräferenzen gegenüber kürzesten Routen zu verbessern, werden zwei Nutzerstudien durchgeführt und in Abschnitt 3.2 „Nutzerstudien“ vorgestellt. Für den Rahmen dieser Arbeit wird daraufhin endgültig festgelegt, dass die Optimierung von Pfaden unter Beachtung der definierten Kategorien des semantischen Modells erfolgen soll. Auf die konkrete Umsetzung der Routenberechnung wird dann in Abschnitt 3.3 „Pfadplanung“ eingegangen. Dabei wird eine Heuristik definiert, die das Konstrukt der Unzufriedenheit allgemeiner NutzerInnen mit einem berechneten Pfad wiedergeben soll. Diese erlaubt es, jeder beliebigen Route eine Bewertung zuzuordnen, indem die einzelnen Bestandteile des Pfades in Abhängigkeit deren jeweiliger semantischer Kategorien gewichtet aufaddiert werden. Diese *Gewichtungsfaktoren* lassen sich als die Verhältnisse der Nutzerbestrebungen, bestimmte Pfadelemente zu vermeiden, betrachten. Indem diese Heuristik in einem A*-Algorithmus nun als Kostenfunktion verwendet wird, wird diese bei der Pfadplanung minimiert. Es wird somit eine Route ermittelt, die die operationalisierte Nutzerzufriedenheit maximiert. Da für die in diesem Kapitel vorgestellte Pfadplanung zahlreiche Festlegungen getroffen werden müssen, die den

Rahmen dieser vorliegenden Arbeit begrenzen, werden diese in Abschnitt 3.4 „Limitationen der präferenzbasierten Pfadplanung“ zusammengefasst, dabei wird auch auf mögliche zukünftige Erweiterungen eingegangen.

Die Verläufe der durch die vorgestellten Pfadplanung berechneten Routen hängen nun von der Wahl der *Gewichtungsfaktoren* ab, welche den einzelnen Pfadelementen zugeordnet werden. Die Ermittlung von *Gewichtungsfaktoren*, die dazu führen, dass die vom System berechneten Routen den favorisierten Routen von NutzerInnen ähnlich sind, wird in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ beschrieben. Zunächst ist es zur Berechnung einer solchen Ähnlichkeit notwendig, Pfade zu sammeln und zu digitalisieren, welche von realen Personen gegenüber anderen Routen favorisiert werden. Diese manuelle Erhebung wird in Abschnitt 4.1 „Erstellung eines Referenzstandards“ beschrieben. Abschnitt 4.2 „Analyse der gesammelten Daten“ gibt dann einen Überblick über die favorisierten Routen und zeigt vorab auf, wie sich diese Pfade von kürzesten Routen unterscheiden. Diese Sammlung von 221 Nutzer routen kann nun zur Messung der Qualität eines Systems zur Routenberechnung verwendet werden, indem vom System 221 Routen berechnet werden, die jeweils denselben Start- und Zielpunkt haben wie die präferierten Routen. Es kann dann bestimmt werden, wie ähnlich die Routen des Systems zu den Nutzer routen sind, ein System ist insbesondere geeignet, Nutzerpräferenzen zu erfüllen, wenn die Ähnlichkeit der Routen hoch ist. Die sich dabei zunächst ergebende Aufgabe liegt in der Operationalisierung der Ähnlichkeit zweier Routen bzw. der Routen des Systems zu den favorisierten Routen des Referenzstandards. Ein solches Ähnlichkeitsmaß wird in Abschnitt 4.3 „Qualitätsmaß“ festgelegt. Die Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* wird dann in Abschnitt 4.4 „Optimierung“ beschrieben. Ziel der Optimierung ist es, die *Gewichte* so zu wählen, dass das Qualitäts- bzw. das Ähnlichkeitsmaß ein möglichst globales Maximum annimmt. Die Optimierung erfolgt mittels einer Evolutionsstrategie, dabei werden verschiedene Ansätze miteinander verglichen. Das Resultat dieses Verfahrens stellt ein aus *Gewichtungsfaktoren* bestehender Vektor dar. In Abschnitt 4.5 „Evaluation und Interpretation der Ergebnisse“ wird abschließend bestätigt, dass die damit berechneten Routen den präferierten Routen realer NutzerInnen mehr ähneln als die kürzesten. Weiterhin wird aufgezeigt, wie sich die optimierten *Gewichtungsfaktoren* auf die Eigenschaften berechneter Routen am Gelände der Universität und durch das Areal eines Einkaufszentrums auswirken.

5.2 Wissenschaftliche Verwertbarkeit der Arbeit

Der Schwerpunkt dieser Dissertation liegt zunächst in der datengetriebenen Adaption von Fußwegrouten an Nutzerpräferenzen. Aus den notwendigen Vorarbeiten ergeben sich jedoch weitere kleinere Beiträge zu aktuellen Forschungsthemen.

Bereits in der Einleitung dieser Arbeit ist kurz darauf eingegangen worden, dass, wie T. Becker et al. (2008) schreiben, eine Schwierigkeit, die es zu überwinden gelte, damit Fußgängernavigationssysteme weitere Verbreitung finden, in der fehlenden Verfügbarkeit flächendeckender Umgebungsmodelle in Innenbereichen liege. Um im Rahmen der Dissertation dennoch Fußwegrouten analysieren zu können, ist abseits dieser grundsätzlichen Problemstellung ein lokales Umgebungsmodell erstellt worden, das lediglich die für die Forschungsarbeit relevanten Regionen umfasst.

Wie in Abschnitt 2.1 „Anforderungen an das Umgebungsmodell“ beschrieben, umfassen das Außengelände und die digitalisierten Stockwerke aller Gebäude der Universität Regensburg mehr als 4 km^2 , die Pläne der Haltestellen in Nürnberg können insgesamt zu über 10 km^2 aufaddiert werden. Es ist dadurch notwendig gewesen, bei der Spezifikation des Umgebungsmodells zu beachten, dass dieses mit möglichst geringem Aufwand erstellt werden kann. Bei der Spezifikation des Modells ist deshalb auf Informationen zu den Umrissen der Gebäude und Räume verzichtet worden. Ein gegenteiliger Ansatz wird beispielsweise von verschiedenen Forschergruppen verfolgt, die Modelle erzeugen, indem sie die Umgebung mit Laser-Scannern genaus- tens vermessen. Eine Übersicht solcher Arbeiten findet sich in Lehtola et al. (2017). Ein Vorteil dieser detaillierten Erfassung für Navigationsanwendungen besteht unter anderem darin, dass NutzerInnen kontinuierlich dreidimensionale Modelle der Umgebung angezeigt werden können. Im Projekt *URwalking* werden den NutzerInnen des Navigationssystems hingegen abstrahierte Versionen der Architekturpläne präsentiert (siehe Bauer, 2018). Eine Stärke des Projektes *URwalking* ergibt sich nun gerade aus der Simplizität der Modelle, da es somit möglich ist, Teile der Datenerhebung an die NutzerInnen auszulagern. So können diese während der Navigation Fotos aufnehmen, die dann, sofern sie in einem Kontrollverfahren als geeignet eingestuft werden, in die Modelle integriert werden. Auch Fehler in den Modellen können von NutzerInnen während der Navigation gemeldet werden. Die entwickelte Modellierungsapplikation bietet Funktionen, die die Fotos und Rückmeldungen der NutzerInnen an den richtigen Stellen der Karten einblenden und dadurch die Integration erleichtern. Dennoch entsteht kontinuierlicher Aufwand, da es neben der Kontrolle der Fotos und der Bearbeitung der Rückmeldungen notwendig ist, die Modelle an die anhaltenden Umbaumaßnahmen der Universität anzupassen. Um deshalb Gebäudemodelle wirklich flächendeckend erheben zu können, sind vermutlich Ansätze wegweisend, die die Datenakquise durch Crowdsourcing-Verfahren gänzlich auslagern. Solche Bestrebungen werden durch die Arbeiten von Marcus Goetz und Alexander Zipf aufgezeigt, die beispielsweise in Goetz und Zipf (2013) ein System zur Routenberechnung in Innenbereichen auf Grundlage von „OpenStreetMap“-Modellen (OpenStreetMap contributors, 2017) demonstrieren. Zusammenfassend ist ein Beitrag dieser Dissertation, anhand des praktischen Einsatzes an der Universität Regensburg mit durchschnittlich fast 100 Besuchern pro Tag unter Beweis

zu stellen, dass die vorgestellte minimale Datengrundlage geeignet ist, die Berechnung von Fußwegrouten zu ermöglichen. Das semantische Modell zeigt zahlreiche Entitäten auf, die sich im praktischen Einsatz am Campus, an Haltestellen und in einem Einkaufszentrum als sinnvoll erwiesen haben und die anhand vorliegender Architekturpläne erhoben werden können. Weiterhin werden in Abschnitt 2.4 „Technische Umsetzung“ verschiedene technische Details zusammengetragen, die es zur praktischen Realisierung eines solch minimal gehaltenen Modells zu beachten gilt, wie beispielsweise die Transformation lokaler Geokoordinaten in ein globales Bezugssystem (siehe Unterabschnitt 2.4.5 „Transformation lokaler Koordinaten in ein globales Referenzsystem“) oder die Kennzeichnung frei begehbarer Flächen (siehe Unterabschnitt 2.4.4 „Areanodes“).

Auch stellt die Planung kürzester Pfade durch Minimierung einer Kostenfunktion, die im Rahmen dieser Arbeit beschrieben wird, kein neuartiges Verfahren dar. Vielmehr wird dieses in Abschnitt 3.1 „Forschungsstand“ auf Grundlage zahlreicher Publikation unterschiedlicher Forschergruppen erarbeitet. Erneut besteht der Beitrag dieses Vorgehens zur aktuellen Forschung darin, aufzuzeigen, dass sich dieses verbreitete Verfahren im praktischen Einsatz bewährt hat und dass das spezifizierte hybride Modell die notwendige Datengrundlage bietet, eine verzögerungsfreie Pfadplanung bereitstellen zu können. Durch die abschließende Evaluation der Arbeit wird weiterhin die Eignung des Verfahrens zur Pfadplanung gezeigt, Routen zu berechnen, die von NutzerInnen favorisierten ähnlicher sind als kürzeste.

Den Schwerpunkt dieser Dissertation bildet die auf diesen Vorarbeiten aufbauende datengetriebene Optimierung der Routenberechnung. Ein dem geschilderten Vorgehen ähnliches Verfahren hat sich im Zuge der Literaturrecherche finden lassen: Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015) passen den Verlauf von Routen für die Fahrzeugnavigation datengetrieben an Nutzerpräferenzen an. Die Optimierung von Fußwegrouten mittels eines Referenzstandards stellt jedoch, soweit dies im Rahmen der vorliegenden Arbeit recherchiert worden ist, einen neuartigen Ansatz dar. Dabei sollen nicht die ermittelten Ausprägungen der *Gewichtungsfaktoren* ins Zentrum der Forschung gerückt und als wesentlicher Beitrag angesehen werden. Diese mögen zwar in hinreichend großen Gebäudekomplexen eine Grundlage zur Berechnung von Routen bilden, vielmehr lässt sich aber das aufgezeigte Verfahren leicht auf verschiedene Areale übertragen und soll dazu anregen, Kostenfunktionen bei der Routenberechnung aus von NutzerInnen in der Praxis gewählten Pfaden abzuleiten. Die Ähnlichkeit zu von NutzerInnen favorisierten Routen als Optimierungsproblem zu formulieren und ein Maximum anhand einer Evolutionsstrategie zu ermitteln, ist hierfür eine mögliche Vorgehensweise und somit ein Beitrag zur aktuellen Forschung. Weiterhin kann das erarbeitete Verfahren als Werkzeug genutzt werden, um zu prüfen, welche Pfadeigenschaften insbesondere geeignet sind, Pfadverläufe zu optimieren. So ist durch die Betrachtung der einzelnen *Gewichtungsfaktoren* in Abschnitt 4.5

„Evaluation und Interpretation der Ergebnisse“ aufgezeigt worden, dass selbst die Vermeidung einfacher und gewöhnlicher Objekte, wie Türen, die Ähnlichkeit zu realen Nutzer routen gegenüber kürzesten Pfaden erhöhen kann.

5.3 Ausblick

Am Ziel dieser Dissertation angekommen, lässt sich der Weg dorthin zurückblickend an zahlreichen Stellen optimieren – ganz wie bei einem Fußweg. Auf verschiedene Beschränkungen des Umfangs dieser Arbeit ist zuvor bereits in Abschnitt 3.4 „Limitationen der präferenzbasierten Pfadplanung“ eingegangen worden, diese sollen an dieser Stelle deshalb nur kurz angerissen werden.

So lässt sich das entwickelte System weiter ausbauen, indem die Präferenzen unterschiedlicher Nutzergruppen oder sogar individueller NutzerInnen berücksichtigt werden. Weiterhin könnten über die simplen Kategorien des semantischen Modells, die der Pfadplanung zugrunde liegen, hinaus weitere Aspekte in das datengetriebene Verfahren einfließen. Neben aufwändig zu erhebenden Pfadeigenschaften, wie beispielsweise der für Rollstuhlfahrer wichtigen Aufzugsbreite oder der Bepflanzung von Außenbereichen, könnten dabei auch durch einfach zu berechnende Merkmale Verbesserungen erzielt werden. So würde sich die Komplexität von Abbiegungen auf verschiedene Weise operationalisieren lassen, beispielsweise anhand des Verzweigungsgrads oder des Winkels von Abbiegungen. Durch die Berechnung von Routen mit zufällig gewählten Start- und Zielpunkten könnte ermittelt werden, welche Gänge auf speziell vielen Routen liegen. Diese wären möglicherweise geeignet, um stark frequentierte Korridore zu vermeiden oder hingegen, um Wege, die NutzerInnen zu hoher Wahrscheinlichkeit schon bekannt sind, zu bevorzugen.

Wie in Unterabschnitt 4.5.2 „Interpretation“ gezeigt worden ist, lässt sich die Eignung beliebiger weiterer interessanter erscheinender Kriterien anhand des vorgestellten Verfahrens prüfen. Einerseits kann hierfür der optimale Grad der Vermeidung ermittelt werden – ein hoher Wert indiziert, dass größere Umwege in Kauf genommen werden, um diese Bereiche zu umgehen. Weiterhin sind verschiedene Ansätze beschrieben worden, um festzustellen, wie geeignet ein bestimmtes Merkmal ist, um die Ähnlichkeit berechneter Routen zu den präferierten Routen des Referenzstandards zu erhöhen. Im Rahmen dieser Arbeit ist dazu das definierte Ähnlichkeitsmaß, das bei optimaler Gewichtung aller *Faktoren* erreicht wird, verglichen worden mit der quantifizierten Ähnlichkeit, wenn jeweils das zu untersuchende Kriterium neutral gewichtet wird. Dieses Verfahren ist gewählt worden, da der Vergleich mit geringem Zeitaufwand durchgeführt werden kann und grundsätzlich einen besseren Einblick erlaubt, anhand welcher Pfadeigenschaften die Routenanpassung erfolgt.

Bei dieser Untersuchung wird die gegenseitige Abhängigkeit der Auswirkungen verschiedener Kriterien jedoch vernachlässigt. Die Problematik dieser Vereinfachung

soll durch ein konkretes Beispiel veranschaulicht werden: So könnten beispielsweise gleichzeitig die beiden Pfadeigenschaften „Baustelle“ und „hoher Lärmpegel“ berücksichtigt werden. Es liegt nahe, dass durch eine Vermeidung von Baustellen auch Abschnitte mit hohem Lärmpegel reduziert werden. Eine Optimierung könnte deshalb zu einem hohen *Gewichtungsfaktor* für Baustellen und einem niedrigen für Lärmpegel führen. Wird nun der Einfluss von Baustellen gemessen, indem die definierte Routenqualität bei neutraler und bei optimaler Gewichtung verglichen wird, zeigt sich, dass die Berücksichtigung von Baustellen zu einer großen Verbesserung führt. Tatsächlich hätte sich diese Verbesserung allerdings auch durch das Lärmpegel-Kriterium erzielen lassen können, wenn dieses entsprechend anders gewichtet worden wäre.

Eine alternative Möglichkeit der Eignungsprüfung verschiedener Kriterien ist deshalb, die Optimierung der *Gewichtungsfaktoren* sowohl unter Einbezug als auch unter Ausschluss eines oder auch mehrerer zu untersuchender Pfadkriterien durchzuführen. Dieser Vergleich braucht aufgrund der langwierigen Optimierung mehr Zeit, die Unabhängigkeit wird jedoch nicht vorausgesetzt. Es könnte somit festgestellt werden, dass eine Berücksichtigung von Baustellen unnötig ist, wenn bereits der Lärmpegel entlang verschiedener Wege bekannt ist. Die Durchführung des geschilderten Vergleichs bietet sich in zukünftigen Arbeiten an, um Systeme, die weitere potentiell sinnvolle Pfadeigenschaften berücksichtigen, mit dem im Rahmen dieser Dissertation erarbeiteten System zu vergleichen.

Wie in Unterabschnitt 4.5.1 „Evaluation“ beschrieben worden ist, lässt sich durch einen direkten Vergleich generierter Routen mit realen Nutzer routen jedoch nicht die Zufriedenheit der NutzerInnen mit den vom System vorgeschlagenen Routen messen. Verwendet man die direkte, prozentuale Übereinstimmung zum Vergleich der Routen, wie in Delling, Goldberg, Goldszmidt et al. (2015), wird dabei möglicherweise außer acht gelassen, dass es Routen gibt, die räumlich zwar gänzlich anders verlaufen, aber dennoch sehr ähnliche Eigenschaften haben und deshalb NutzerInnen durchaus zufrieden stellen würden. zieht man zum Vergleich, wie in dieser Arbeit, die zur Optimierung verwendeten Kriterien heran, lässt sich zwar bestätigen, dass die Routen hinsichtlich dieser erfolgreich optimiert worden sind, dies beweist aber nicht, dass die NutzerInnen insgesamt wirklich zufrieden mit den generierten Routen sind. Eine zusätzliche Nutzerstudie verbleibt deshalb aufgrund des damit verbundenen Aufwands als Ausblick.

Eine mögliche Erweiterung der durch die Evolutionsstrategie optimierten Ähnlichkeitsfunktion, die in Abschnitt 4.3 „Qualitätsmaß“ beschrieben worden ist, besteht in einer Regulierung der *Gewichtungsfaktoren*. So könnten die *Gewichtungsfaktoren* mit einem konstanten Faktor multipliziert auf das bestehende Qualitätsmaß addiert werden. Dadurch wird die Bestrebung, insgesamt möglichst kleine Gewichtungsfaktoren zu erhalten, Teil des Optimierungsziels. Dies würde die Performanz des zur

Pfadsuche verwendeten A*-Algorithmus steigern, da die realen Kosten die Luftlinie als genutzte Restkostenheuristik weniger stark überschreiten würden. Idealerweise sollten dabei keine Einbußen hinsichtlich der Ähnlichkeit der Routen des Systems zu den präferierten Routen in Kauf genommen werden, weshalb der konstante Faktor hinreichend klein (unterhalb der kleinstmöglichen Änderung des Ähnlichkeitsmaßes) gewählt werden müsste.

Eine interessante Fragestellung ergibt sich anhand der in Unterabschnitt 4.5.3 „Übertragbarkeit“ geschilderten Berechnung von Routen in der Umgebung eines Einkaufszentrums. Zusammenfassend ist darauf hingewiesen worden, dass die Suche nach einem kostenminimalen Pfad möglicherweise nicht geeignet ist, die Präferenzen der Kunden des Einkaufszentrums wiederzugeben. Die Bestrebung, möglichst viele unterschiedliche Schaufenster zu betrachten, ist möglicherweise wichtiger als die Erreichung eines bestimmten Zielpunktes. Gänzlich abweichende Optimierungsverfahren könnten deshalb in verschiedenen Kontexten sinnvoll sein. Beispielsweise ließen sich, wie in den in Unterabschnitt 3.1.4 „Fußgängernavigation“ beschriebenen Arbeiten von Kikiras et al. (2006) und Anagnostopoulos et al. (2005), vorab alle potentiell möglichen Pfade, gegebenenfalls bis zu einer gewissen Maximallänge, berechnen. Mittels eines Regressionsverfahrens könnte dann aus den Merkmalen jeweils jeder gefundenen Route die voraussichtliche Nutzerzufriedenheit berechnet werden. Hierfür würde sich möglicherweise der Einsatz eines neuronalen Netzes anbieten. Dadurch wäre weiterhin die Ermittlung sehr viel komplexerer Zusammenhänge möglich, die Gesamtbewertung einer Route wäre nicht mehr auf eine lineare Abhängigkeit jeder Eingangsgröße beschränkt.

Eine wichtige Voraussetzung zur weiteren Optimierung von Fußwegrouten anhand datengetriebener Verfahren ist sicherlich die Verfügbarkeit favorisierter Nutzerrouten. Wie an mehreren Stellen dieser Arbeit erörtert worden ist, bildet die Positionsbestimmung in Innenbereichen die wohl wichtigste Grundlage zur Erhebung eines weit umfangreicheren Referenzstandards, der nicht zuletzt zum Trainieren eines neuronalen Netzes unabdingbar wäre. Ein System zur Routenberechnung könnte bei einer Datensammlung entsprechender Größe möglicherweise eher wie ein Empfehlungssystem für Musik oder Filme funktionieren. Zur Navigation in neuen Umgebungen könnten ortskundige NutzerInnen mit ähnlichen Verhaltensweisen ermittelt werden, anhand favorisierter Routen dieser vergleichbaren NutzerInnen könnten dann neue Routen generiert werden. Auf lange Sicht lässt sich möglicherweise sogar die manuelle Erhebung der Topologie von Gebäuden durch eine automatisierte Erfassung von Nutzerpfaden ersetzen.

Ein Arbeitsschritt, der sich im Gegensatz zu diesen langfristig umsetzbaren Möglichkeiten unmittelbar an diese Dissertation anschließen wird, ist die Durchführung einer Optimierung unter Einbezug des kompletten Referenzstandards, die zwar keine Evaluation der Ergebnisse ermöglicht, die NutzerInnen des implementierten Navi-

gationssystems aber hoffentlich dennoch zufriedener an Ihren Zielorten ankommen lässt.

A. Anhang

A.1 XML Schema Definition des Umgebungsmodells

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <xs:element name="graph">
    <xs:complexType>
      <xs:choice maxOccurs="unbounded">
        <xs:element name="level" minOccurs="1"
          ↪ maxOccurs="unbounded">
          <xs:complexType>
            <xs:choice maxOccurs="unbounded">
              <xs:element name="node" minOccurs="0"
                ↪ maxOccurs="unbounded">
                <xs:complexType>
                  <xs:attribute name="id" type="xs:string" />
                  <xs:attribute name="x" type="xs:integer" />
                  <xs:attribute name="y" type="xs:integer" />
                  <xs:attribute name="type" type="xs:string" />
                  <xs:attribute name="name" type="xs:string" />
                  <xs:attribute name="roomid" type="xs:string" />
                  <xs:attribute name="isdestination"
                    ↪ type="xs:string" />
                  <xs:attribute name="tags" type="xs:string" />
                  <xs:attribute name="description"
                    ↪ type="xs:string" />
                  <xs:attribute name="filename" type="xs:string"
                    ↪ />
                  <xs:attribute name="level" type="xs:string" />
                  <xs:attribute name="nodeid" type="xs:string" />
                  <xs:attribute name="imageid" type="xs:string" />
                  <xs:attribute name="lat" type="xs:double" />
                  <xs:attribute name="long" type="xs:double" />
                </xs:complexType>
              </xs:element>
            </xs:choice>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
      </xs:choice>
      <xs:element name="edge" minOccurs="0"
        ↪ maxOccurs="unbounded">
        <xs:complexType>
          <xs:attribute name="id" type="xs:string" />
```

```

<xs:attribute name="source" type="xs:string" />
<xs:attribute name="sink" type="xs:string" />
<xs:attribute name="type" type="xs:string" />
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="pixelToWGS84" minOccurs="1"
    ↪ maxOccurs="1">
<xs:complexType>
<xs:all>
    <xs:element name="xlat" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
    <xs:element name="ylat" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
    <xs:element name="wlat" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
    <xs:element name="xlon" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
    <xs:element name="ylon" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
    <xs:element name="wlon" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
</xs:all>
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="pixelToGK" minOccurs="1"
    ↪ maxOccurs="1">
<xs:complexType>
<xs:all>
    <xs:element name="xrw" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
    <xs:element name="yrw" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
    <xs:element name="wrw" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
    <xs:element name="xhw" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
    <xs:element name="yhw" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
    <xs:element name="whw" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />
</xs:all>
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="pixelToEPSG3857" minOccurs="1"
    ↪ maxOccurs="1">
<xs:complexType>
<xs:all>
    <xs:element name="xx" type="xs:double"
        ↪ minOccurs="1" />

```

```
<xs:element name="yx" type="xs:double"
    ↪ minOccurs="1" />
<xs:element name="wx" type="xs:double"
    ↪ minOccurs="1" />
<xs:element name="xy" type="xs:double"
    ↪ minOccurs="1" />
<xs:element name="yy" type="xs:double"
    ↪ minOccurs="1" />
<xs:element name="wy" type="xs:double"
    ↪ minOccurs="1" />
</xs:all>
</xs:complexType>
</xs:element>
</xs:choice>
<xs:attribute name="id" type="xs:string" />
<xs:attribute name="storey" type="xs:byte" />
<xs:attribute name="mapfile" type="xs:string" />
<xs:attribute name="width" type="xs:integer" />
<xs:attribute name="height" type="xs:integer" />
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="leveledge" minOccurs="0"
    ↪ maxOccurs="unbounded">
<xs:complexType>
    <xs:attribute name="id" type="xs:string" />
    <xs:attribute name="sourcelevel" type="xs:string" />
    <xs:attribute name="sinklevel" type="xs:string" />
    <xs:attribute name="sourcenode" type="xs:string" />
    <xs:attribute name="sinknode" type="xs:string" />
    <xs:attribute name="type" type="xs:string" />
</xs:complexType>
</xs:element>
</xs:choice>
<xs:attribute name="name" type="xs:string" />
<xs:attribute name="territory" type="xs:string" />
</xs:complexType>
</xs:element>
</xs:schema>
```

A.2 Technische Spezifikation möglicher Nutzerprofile

Festlegung konkreter Gewichtungsausprägungen im XML-Format

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<preferences>
<preference name="default" nameen="default" id="0">
<modifier type="nodeSummand" attribute="type" value="doorway"
    ↳ factor="10.0" />
<modifier type="edgeSummand" attribute="type" value="1"
    ↳ factor="9.0" />
<modifier type="edgeFactor" attribute="type" value="0"
    ↳ factor="1.0" />
<modifier type="levelEdgeSummand" attribute="type"
    ↳ value="Elevator" factor="20.0" />
<modifier type="levelEdgeFactor" attribute="type"
    ↳ value="Elevator" factor="5.0" />
</preference>
<preference name="barrierefrei" nameen="accessible" id="1">
<modifier type="nodeSummand" attribute="type"
    ↳ value="Revolvingdoor" factor="5000" />
</preference>
</preferences>
```

Glossar

Attribut

Einem *Knoten* innerhalb einer XML-Datei können verschiedene Eigenschaften zugeordnet werden. Der offiziellen Spezifikation der „Extensible Markup Language (XML)“ (siehe W3C, 2008) folgend, in der diese Eigenschaften als „Attributes“ bezeichnet werden, wird im Rahmen dieser Arbeit die deutsche Übersetzung „Attribute“ verwendet (siehe dazu Unterabschnitt 2.4.1 „XML-Format“). 40–46, 49, 55

Edge

Eine Kante in einem Graphen, die *Nodes* paarweise verbindet, wird in dieser Arbeit als „Edge“ bezeichnet. In der Literatur findet sich auch der Begriff „Link“ (vergleiche Hoffman & Pavley, 1959) und „Arc“ (vergleiche Preiss, 2008). Die Begriffe „Edge“, „Link“ und „Arc“ sind im Kontext dieser Arbeit austauschbar. 20, 21, 23, 26–28, 32–36, 38, 43–48, 51, 54–56, 63, 66, 67, 70, 77, 78, 89, 90, 92, 93, 99–102, 104, 109, 113, 115, 117, 120, 122, 139, 140, 146, 147, 165, 172, 173, 190

Fitness

Die Qualität eines Systems zur Routenberechnung, die von einem Vektor aus Faktoren zur Gewichtung verschiedener Routeneigenschaften abhängt (siehe Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“), wird als Fitness, Fitnessfunktion oder Qualitätsbewertung bezeichnet. 119–133, 135, 136, 138, 140, 150, 151

Gewichtungsfaktor

Wie in Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“ beschrieben, werden *Nodes*, *Edges* und *Leveledges* bei der Pfadplanung abhängig von der jeweils zugeordneten semantischen Kategorie (siehe Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“) mit unterschiedlichen Faktoren s, t, u, v und w gewichtet. Die in Kapitel 4 „Erlernen der Nutzerpräferenzen“ durchgeführte Anpassung an Nutzerbedürfnisse erfolgt anhand einer Optimierung dieser Faktoren. Ausprägungen der Gewichtungen lassen sich zu

einem Gewichtungsvektor $(s_{\text{Flurtür}}, s_{\text{Raumtür}}, \dots, w_{\text{Aufzug}})^T$ zusammenfassen. 18, 21, 63–67, 70, 71, 73–81, 83, 89, 90, 92, 95–105, 107, 108, 111, 112, 114–126, 129, 131, 133, 135, 136, 138–143, 145–148, 150, 151, 161, 162, 164–166, 191–193

Knoten

Da „Knotenpunkte“ sowohl Bestandteile des graphbasierten Umgebungsmodells als auch jeder XML-Datei sind, werden die Knotenpunkte innerhalb einer XML-Datei zur eindeutigen Unterscheidung im Rahmen dieser Arbeit als „Knoten“ bezeichnet (siehe dazu Unterabschnitt 2.4.1 „XML-Format“). Im Gegensatz dazu wird für einen Knotenpunkt im Graphen des spezifizierten Umgebungsmodells der Begriff *Node* verwendet. 41–45, 52, 55, 172

Leveledge

In der hier vorliegenden Arbeit werden *Edges* unterscheiden, die *Nodes* auf derselben Etage und *Nodes* auf unterschiedlichen Etagen verbinden (siehe Unterabschnitt 2.3.3 „Semantisches Modell“). Um begrifflich hervorzuheben, dass eine *Edge* einen Stockwerksübergang repräsentiert, somit also der zweiten Kategorie angehört, wird diese als „Leveledge“ bezeichnet. 27, 28, 30, 33, 38, 39, 45, 46, 51, 54, 56, 89, 91, 92, 99, 104, 115, 117, 118, 120, 139, 146, 147, 165, 172

NADINE

Ziel des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Drittmittelprojektes NADINE (Navigation im öffentlichen Personenverkehr mit modularer Dienste-Architektur zur Einbindung in externe Applikationen) war es, NutzerInnen bei der Navigation im öffentlichen Nahverkehr zu unterstützen. Als Projektpartner war der Lehrstuhl für Informationswissenschaft der Universität Regensburg unter anderem für die Fußgängernavigation beim Umstieg an Haltestellen der Pilotregionen Nürnberg und Erfurt verantwortlich. Dieses Ziel des Projektes nahm somit Einfluss auf die Gestaltung des im Rahmen dieser Forschungsarbeit erstellten Navigationssystems. 1, 8, 9, 12, 13, 20, 22, 24, 25, 28, 32, 35–40, 42, 84, 92, 94, 161

Node

Ein Knotenpunkt in einem Graphen, der durch *Edges* mit anderen Knotenpunkten verbunden ist, wird in dieser Arbeit als „Node“ bezeichnet. In der Literatur findet sich auch der Begriff „Vertex“ (vergleiche C. Becker & Dürr, 2005; Preiss, 2008). Die Begriffe „Node“ und „Vertex“ sind im Kontext dieser Arbeit austauschbar. 20, 21, 25–36, 39, 41, 43–47, 49, 51, 54–56, 63, 64, 67,

70, 77, 78, 83, 88–90, 92, 93, 99–102, 104, 112, 115, 117, 120, 122, 139, 140, 144, 146, 147, 165, 172, 173, 190, 191

Parameter

In Übereinstimmung mit Eiben und Smit (2011) werden die Charakteristika eines evolutionären Algorithmus und im Speziellen der verwendeten Evolutionsstrategie als Parameter bezeichnet. Beispiele hierfür sind die Art der Rekombination oder die Mutationswahrscheinlichkeit. Eine genauere Erläuterung findet sich in Unterabschnitt 4.4.3 „Festlegung eines Vokabulars“. Die Ausprägungen der Parameter lassen sich zu einem Parametervektor zusammenfassen. 2, 125–129, 132, 133, 135, 136, 138, 174, 192

URwalking

Der Projektname des Fußgängernavigationssystems, das am Lehrstuhl für Informationswissenschaft an der Universität Regensburg entwickelt wurde. 1, 8, 9, 12, 28, 32, 35, 163, 190

Utility

Die Eignung bestimmter *Parameter* eines evolutionären Algorithmus wird als Utility bezeichnet, um diese von der Fitness, welche die *Parameter* der Routenberechnung bewertet, unterscheiden zu können (siehe Unterabschnitt 3.3.1 „Einfluss von Nutzerpräferenzen auf die Pfadplanung“). 125, 126, 128–130, 133, 135, 136

Literaturverzeichnis

- Abraham, I., Delling, D., Goldberg, A. V. & Werneck, R. F. (2012). Hierarchical Hub Labelings for Shortest Paths. In *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)* (Bd. 7501 LNCS, S. 24–35). doi: 10.1007/978-3-642-33090-2_4
- Afyouni, I., Ray, C. & Claramunt, C. (2012). Spatial models for context-aware indoor navigation systems: A survey. *Journal of Spatial Information Science* (4). doi: 10.5311/JOSIS.2012.4.73
- Agrawal, A. W., Schlossberg, M. & Irvin, K. (2008). How far, by which route and why? A spatial analysis of pedestrian preference. *Journal of Urban Design*, 13 (1), 81–98. doi: 10.1080/13574800701804074
- Anagnostopoulos, C., Tsetsos, V., Kikiras, P. & Hadjiefthymiades, S. P. (2005). OntoNav: A semantic indoor navigation system. In *1st workshop on semantics in mobile environments (sme05), ayia*.
- Arabas, J., Szczepankiewicz, A. & Wroniak, T. (2010). Experimental Comparison of Methods to Handle Boundary Constraints in Differential Evolution. In *International conference on parallel problem solving from nature* (S. 411–420). Springer. doi: 10.1007/978-3-642-15871-1_42
- Armeni, I. & Chorianopoulos, K. (2013). Pedestrian navigation and shortest path: Preference versus distance. In *Workshop proceedings of the 9th international conference on intelligent environments ie'13, july 16-19, 2013, athens, greece* (S. 647–652). doi: 10.3233/978-1-61499-286-8-647
- Arun, K., Huang, T. & Blostein, S. (1987). Least-Squares Fitting of Two 3-D Point Sets. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, PAMI-9* (5), 698–700. doi: 10.1109/TPAMI.1987.4767965
- Bäck, T., Hoffmeister, F. & Schwefel, H.-P. (1991). A survey of evolution strategies. In *Proceedings of the fourth international conference on genetic algorithms* (Bd. 2). Morgan Kaufmann Publishers San Mateo, CA.
- Bäck, T. & Schwefel, H.-P. (1993, mar). An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization. *Evolutionary Computation*, 1 (1), 1–23. doi: 10.1162/evco.1993.1.1.1
- Bast, H., Funke, S., Sanders, P. & Schultes, D. (2007, apr). Fast Routing in

- Road Networks with Transit Nodes. *Science*, 316 (5824), 566–566. doi: 10.1126/science.1137521
- Bauer, C. (2018). *Unterstützung der Orientierung im Innenbereich: Analyse landmarkenbasierter Karten-Interfaces anhand des Blickverhaltens der Nutzer* (Dissertation, Universität Regensburg). Zugriff auf <https://epub.uni-regensburg.de/37666>
- Baus, J., Krüger, A. & Wahlster, W. (2002). A resource-adaptive mobile navigation system. In *Proceedings of the 7th international conference on intelligent user interfaces - iui '02* (S. 15). doi: 10.1145/502721.502723
- Beale, L., Field, K., Briggs, D., Picton, P. & Matthews, H. (2006, mar). Mapping for Wheelchair Users: Route Navigation in Urban Spaces. *The Cartographic Journal*, 43 (1), 68–81. doi: 10.1179/000870406X93517
- Becker, C. & Dürr, F. (2005). On location models for ubiquitous computing. *Personal and Ubiquitous Computing*, 9 (1), 20–31. doi: 10.1007/s00779-004-0270-2
- Becker, T., Nagel, C. & Kolbe, T. H. (2008). A Multilayered Space-Event Model for Navigation in Indoor Spaces. In *3d geo-information sciences* (S. 61–77). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-87395-2_5
- Berger, A., Grimmer, M. & Müller-Hannemann, M. (2010). Fully dynamic speed-up techniques for multi-criteria shortest path searches in time-dependent networks. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6049 LNCS, 35–46. doi: 10.1007/978-3-642-13193-6_4
- Beyer, H.-G., Beyer, H.-G., Schwefel, H.-P. & Schwefel, H.-P. (2002). Evolution strategies – A comprehensive introduction. *Natural Computing*, 1 (1), 3 – 52. doi: 10.1023/A:1015059928466
- Beyer, H. G. & Sendhoff, B. (2008). Covariance matrix adaptation revisited - The CMSA evolution strategy. In *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)* (Bd. 5199 LNCS, S. 123–132). doi: 10.1007/978-3-540-87700-4_13
- Butler, D. L., Acquino, A. L., Hissong, A. A. & Scott, P. A. (1993). Wayfinding by newcomers in a complex building. *Human Factors*, 35 (1), 159–173. doi: 10.1177/001872089303500109
- Caduff, D. & Timpf, S. (2005a). The Landmark Spider: Representing Landmark Knowledge for Wayfinding Tasks. In *Aaai spring symposium: Reasoning with mental and external diagrams: Computational modeling and spatial assistance* (S. 30–35). doi: citeulike-article-id:7753893
- Caduff, D. & Timpf, S. (2005b). The Landmark Spider: Weaving the Landmark Web. *5th Swiss Transport Research Conference*.
- Caldwell, T. (1961, feb). On finding minimum routes in a network with turn penalties.

- Communications of the ACM*, 4 (2), 107–108. doi: 10.1145/366105.366184
- Carlson, L. A., Hölscher, C., Shipley, T. F. & Dalton, R. C. (2010, oct). Getting Lost in Buildings. *Current Directions in Psychological Science*, 19 (5), 284–289. doi: 10.1177/0963721410383243
- Chang, K.-P., Wei, L.-Y., Yeh, M.-Y. & Peng, W.-C. (2011). Discovering personalized routes from trajectories. In *Proceedings of the 3rd acm sigspatial international workshop on location-based social networks - lbsn '11* (Bd. 1, S. 1). New York, New York, USA: ACM Press. doi: 10.1145/2063212.2063218
- Connors, D. A. (1983). The School Environment: A Link to Understanding Stress. *Theory Into Practice*, 22 (1), 15–20. doi: 10.1080/00405848309543032
- Crockford, D. (2006, jul). *The application/json Media Type for JavaScript Object Notation (JSON)* (Bericht). doi: 10.17487/rfc4627
- Da Silva, E. R., De Souza Baptista, C., De Menezes, L. C. & De Paiva, A. C. (2008). Personalized path finding in road networks. *Proceedings - 4th International Conference on Networked Computing and Advanced Information Management, NCM 2008*, 2, 586–591. doi: 10.1109/NCM.2008.211
- Dalton, R. C. (2003). The Secret Is To Follow Your Nose. *Environment and Behavior*, 35 (1), 107–131. doi: 10.1177/0013916502238867
- Delling, D., Goldberg, A. V., Goldszmidt, M., Krumm, J., Talwar, K. & Werneck, R. F. (2015). Navigation made personal: inferring driving preferences from GPS traces. *Proceedings of the 23rd SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems - GIS '15*, 1–9. doi: 10.1145/2820783.2820808
- Delling, D., Goldberg, A. V., Pajor, T. & Werneck, R. F. (2011). Customizable Route Planning. In *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)* (Bd. 6630 LNCS, S. 376–387). doi: 10.1007/978-3-642-20662-7_32
- Delling, D., Goldberg, A. V., Pajor, T. & Werneck, R. F. (2015). Customizable Route Planning in Road Networks. *Transportation Science*, 51 (2), 566–591. doi: 10.1287/trsc.2014.0579
- Delling, D. & Werneck, R. F. (2013). Faster Customization of Road Networks. In *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)* (Bd. 7933 LNCS, S. 30–42). doi: 10.1007/978-3-642-38527-8_5
- Disser, Y., Müller-Hannemann, M. & Schnee, M. (2008). Multi-criteria shortest paths in time-dependent train networks. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5038 LNCS, 347–361. doi: 10.1007/978-3-540-68552-4_26
- Dogu, U. & Erkip, F. (2000, nov). Spatial Factors Affecting Wayfinding and

- Orientation. *Environment and Behavior*, 32 (6), 731–755. doi: 10.1177/00139160021972775
- Domnitcheva, S. (2001). Location Modeling: State of the Art and Challenges. In *Proceedings of the workshop on location modeling for ubiquitous computing, in ubicomp2001* (S. 13–19).
- Duckham, M. & Kulik, L. (2003). SSimplest"Paths: Automated Route Selection for Navigation. In *Spatial information theory, proceedings* (S. 169–185). doi: 10.1007/978-3-540-39923-0_12
- Dudas, P. M., Ghafourian, M. & Karimi, H. A. (2009). ONALIN: Ontology and algorithm for indoor routing. *Proceedings - IEEE International Conference on Mobile Data Management*, 720–725. doi: 10.1109/MDM.2009.123
- Eiben, A. E., Michalewicz, Z., Schoenauer, M. & Smith, J. (2007). Parameter Control in Evolutionary Algorithms. *Parameter setting in evolutionary algorithms*, 19-46., 54 (54), Parameter setting in evolutionary algorithms, 19–4. doi: 10.1007/978-3-540-69432-8>
- Eiben, A. E. & Smit, S. K. (2011). Evolutionary Algorithm Parameters and Methods to Tune Them. In Y. Hamadi, E. Monfroy & F. Saubion (Hrsg.), *Autonomous search* (Bd. 9783642214, S. 15–36). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201
- Eiben, A. E. & Smith, J. E. (2003). *Introduction to Evolutionary Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-44874-8
- Elias, B. B. (2007). Pedestrian Navigation-Creating a tailored geodatabase for routing. In *4th workshop on positioning, navigation and communication, wpnc '07* (S. 41–47). doi: 10.1109/WPNC.2007.353611
- Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I. & Tutz, G. (2006). *Statistik* (6. Auflage Aufl.). Springer Berlin Heidelberg.
- Fallah, N., Apostolopoulos, I., Bekris, K. & Folmer, E. (2013). Indoor human navigation systems: A survey. *Interacting with Computers*, 25 (1), 21–33. doi: 10.1093/iwc/iws010
- Fewings, R. (2001, may). Wayfinding and Airport Terminal Design. *Journal of Navigation*, 54 (2), 177–184. doi: 10.1017/S0373463301001369
- Frenzel, J. (1993, oct). Genetic algorithms. *IEEE Potentials*, 12 (3), 21–24. doi: 10.1109/45.282292
- Goetz, M. & Zipf, A. (2013). Indoor Route Planning with Volunteered Geographic Information on a (Mobile) Web-Based Platform. In J. M. Krisp (Hrsg.), (S. 211–231). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-34203-5_12
- Golledge, R. & Gärling, T. (2002, dec). Spatial Behavior in Transportation Modeling and Planning.. doi: 10.1201/9781420042283.ch3
- Golledge, R. G. (1995). Defining the Criteria Used in Path Selection. *Activity-Based*

- Approaches to Travel Analysis (278), 151.
- Grum, E. (2005). Danger of getting lost: Optimize a path to minimize risk. In *10th international conference on information & communication technologies (ict) in urban planning and spatial development and impacts of ict on physical space* (S. 709–715).
- Hansen, N., Akimoto, Y., Brockhoff, D. & Chan, M. (2019). *Python implementation of CMA-ES/pycma*. Zugriff auf <https://github.com/CMA-ES/pycma> doi: 10.5281/zenodo.2651072
- Hansen, N., Müller, S. D. & Koumoutsakos, P. (2003, mar). Reducing the Time Complexity of the Derandomized Evolution Strategy with Covariance Matrix Adaptation (CMA-ES). *Evolutionary Computation*, 11 (1), 1–18. doi: 10.1162/106365603321828970
- Hansen, N. & Ostermeier, A. (2001, jun). Completely Derandomized Self-Adaptation in Evolution Strategies. *Evolutionary Computation*, 9 (2), 159–195. doi: 10.1162/106365601750190398
- Haque, S., Kulik, L. & Klippel, A. (2007). Algorithms for Reliable Navigation and Wayfinding. In T. Barkowsky, M. Knauff, G. Ligozat & D. R. Montello (Hrsg.), *Spatial cognition v reasoning, action, interaction* (S. 308–326). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-75666-8_18
- Hart, P. E., Nilsson, N. J. & Raphael, B. (1968). the Heuristic Determination. *IEEE Transactions of systems science and cybernetics* (2), 100–107.
- Heye, C. & Timpf, S. (2003). Factors influencing the physical complexity of routes in public transportation networks. In *10th international conference on travel behaviour research*. Lucerne.
- Hoffman, W. & Pavley, R. (1959, oct). A Method for the Solution of the Nth Best Path Problem. *Journal of the ACM*, 6 (4), 506–514. doi: 10.1145/320998.321004
- Hoffmeister, F. & Bäck, T. (1991). Genetic Algorithms and evolution strategies: Similarities and differences. In *Parallel problem solving from nature* (Bd. 496 LNCS, S. 455–469). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. doi: 10.1007/BFb0029787
- Holm, S. (1979). *A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure* (Bd. 6). WileyBoard of the Foundation of the Scandinavian Journal of Statistics. doi: 10.2307/4615733
- Hölscher, C., Meilinger, T., Vrachliotis, G., Brösamle, M. & Knauff, M. (2006). Up the down staircase: Wayfinding strategies in multi-level buildings. *Journal of Environmental Psychology*, 26 (4), 284–299. doi: 10.1016/j.jenvp.2006.09.002
- Hölscher, C., Tenbrink, T. & Wiener, J. M. (2011, nov). Would you follow your own route description? Cognitive strategies in urban route planning. *Cognition*, 121 (2), 228–247. doi: 10.1016/j.cognition.2011.06.005

- Hölscher, C., Vrachliotis, G. & Meilinger, T. (2006). The floor strategy: wayfinding cognition in a multi-level building. In *Proceedings of 5th international space syntax symposium* (Bd. 2, S. 823–824).
- Intellingence Agency of EUA, N. N. G. (1984). World Geodetic System 1984. *Wgs-84, 1984*, 3.
- Jackermeier, R. & Ludwig, B. (2018a, oct). Exploring the limits of PDR-based indoor localisation systems under realistic conditions. *Journal of Location Based Services*, 12 (3-4), 231–272. doi: 10.1080/17489725.2018.1541330
- Jackermeier, R. & Ludwig, B. (2018b). Task-Oriented Evaluation of Indoor Positioning Systems. In *Lbs 2018: 14th international conference on location based services* (S. 25–47). doi: 10.1007/978-3-319-71470-7_2
- Jan, O., Horowitz, A. J. & Peng, Z.-R. (2000, jan). Using Global Positioning System Data to Understand Variations in Path Choice. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1725 (00), 37–44. doi: 10.3141/1725-06
- Jiang, B. & Liu, X. (2011, jul). Computing the fewest-turn map directions based on the connectivity of natural roads. *International Journal of Geographical Information Science*, 25 (7), 1069–1082. doi: 10.1080/13658816.2010.510799
- Julia Letchner, John Krumm, E. H. (2006). Trip Router with Individualized Preferences (TRIP): Incorporating Personalization into Route Planning. *IAAI'06 Proceedings of the 18th conference on Innovative applications of artificial intelligence*, 2, 1795–1800.
- Karimi, H. A. & Ghafourian, M. (2010). Indoor routing for individuals with special needs and preferences. *Transactions in GIS*, 14 (3), 299–329. doi: 10.1111/j.1467-9671.2010.01198.x
- Kasemsuppakorn, P. & Karimi, H. A. (2008). Data Requirements and a Spatial Database for Personalized Wheelchair Navigation. *Proceedings of the 2nd International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology*, 31–34.
- Kasemsuppakorn, P. & Karimi, H. A. (2009, mar). Personalised routing for wheelchair navigation. *Journal of Location Based Services*, 3 (1), 24–54. doi: 10.1080/17489720902837936
- Kattenbeck, M. (2016). *Empirically Measuring Salience of Objects for Use in Pedestrian Navigation* (Dissertation, Universität Regensburg). Zugriff auf <http://epub.uni-regensburg.de/34145>
- Kattenbeck, M., Ullmann (geb. Müller), M., Ohm, C. & Ludwig, B. (2015, feb). Der Weg ist das Ziel – Fußgängernavigation ist Forschung zu Information Behavior. *Information - Wissenschaft & Praxis*, 66 (1), 45–55. doi: 10.1515/iwp-2015-0012
- Keler, A. & Mazimpaka, J. D. (2016, jan). Safety-aware routing for motorised

- tourists based on open data and VGI. *Journal of Location Based Services*, 10 (1), 64–77. doi: 10.1080/17489725.2016.1170216
- Kikiras, P., Tsetsos, V. & Hadjiefthymiades, S. (2006). Ontology-based user modeling for pedestrian navigation systems. *ECAI 2006 Workshop on Ubiquitous User Modeling (UbiqUM)*, Riva del Garda, Italy, 1–6.
- Kilday, P. (1979). *Travellers go crazy in big Dallas-Fort Worth airport*.
- Kramer, O. (2010). Evolutionary self-adaptation: A survey of operators and strategy parameters. *Evolutionary Intelligence*, 3 (2), 51–65. doi: 10.1007/s12065-010-0035-y
- Krisp, J. M. & Keler, A. (2015, nov). Car navigation – computing routes that avoid complicated crossings. *International Journal of Geographical Information Science*, 29 (11), 1988–2000. doi: 10.1080/13658816.2015.1053485
- Krisp, J. M., Keler, A. & Karrais, N. (2014). Personalized Routing for Car Navigation Systems. In *Proceedings of the 11th international symposium on location-based services* (S. 51—53).
- Krüger, A., Butz, A., Müller, C., Stahl, C., Wasinger, R., Steinberg, K.-E. & Dirschl, A. (2004). The connected user interface: Realizing a personal situated navigation service. *IUI '04 Proceedings of the 9th international conference on Intelligent user interfaces*, 161–168. doi: 10.1145/964442.964473
- Küpper, A. (2005). *Location-Based Services: Fundamentals and Operation* (Bd. 51) (Nr. 3). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/0470092335
- Lehtola, V. V., Kaartinen, H., Nüchter, A., Kaijaluoto, R., Kukko, A., Litkey, P., ... Hyppä, J. (2017). Comparison of the selected state-of-the-art 3D indoor scanning and point cloud generation methods. *Remote Sensing*, 9 (8), 1–26. doi: 10.3390/rs9080796
- Li, K.-J., Lee, J., Kolbe, T. H., Zlatanova, S., Morley, J., Nagel, C. & Becker, T. (2014). Open Geospatial Consortium IndoorGML. *OGC Member approved international standard, Version 1*, 1–94.
- Lorenz, B. & Ohlbach, H. (2006). A hybrid model for indoor spatial reasoning. In *Proc. 1st int. workshop on mobile* (S. 2–7).
- Lorenz, B., Ohlbach, H. J. & Stoffel, E. P. (2006). A hybrid spatial model for representing indoor environments. In *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)* (Bd. 4295 LNCS, S. 102–112). doi: 10.1007/11935148_10
- Luce, R. D. & Perry, A. D. (1949). A method of matrix analysis of group structure. *Psychometrika*, 14 (2), 95–116. doi: 10.1007/BF02289146
- Ludwig, B., Zenker, B. & Schrader, J. (2009). Recommendation of personalized routes with public transport connections. In *Communications in computer and information science* (Bd. 53 CCIS, S. 97–107). doi: 10.1007/978-3-642-10263-9_9

- Lyardet, F., Szeto, D. W. & Aitenbichler, E. (2008). Context-Aware Indoor Navigation. In *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)* (Bd. 5355 LNCS, S. 290–307). doi: 10.1007/978-3-540-89617-3_19
- Malaka, R. & Zipf, A. (2000). *Information and Communication Technologies in Tourism 2000* (D. R. Fesenmaier, S. Klein & D. Buhalis, Hrsg.). Vienna: Springer Vienna. doi: 10.1007/978-3-7091-6291-0
- Mann, H. B. & Whitney, D. R. (1947, mar). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18 (1), 50–60. doi: 10.1214/aoms/1177730491
- Mark, D. M. (1985). Finding simple routes: 'ease of description' as an objective function in automated route selection. In *Second symposium on artificial\intelligence applications (ieee)* (S. 577–581).
- Mark, D. M. (1986, sep). Automated route selection for navigation. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1 (9), 2–5. doi: 10.1109/MAES.1986.5005198
- Maron, O. & Moore, A. W. (1997). The Racing Algorithm: Model Selection for Lazy Learners. *Artificial Intelligence Review*, 11 (1-5), 193–225. doi: 10.1023/A:1006556606079
- Millonig, A. & Schechtner, K. (2007, mar). Developing Landmark-Based Pedestrian-Navigation Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8 (1), 43–49. doi: 10.1109/TITS.2006.889439
- Münzer, S. & Hölscher, C. (2011, jul). Entwicklung und Validierung eines Fragebogens zu räumlichen Strategien. *Diagnostica*, 57 (3), 111–125. doi: 10.1026/0012-1924/a000040
- Ohm, C., Ullmann (geb. Müller), M. & Ludwig, B. (2015, sep). Displaying landmarks and the user's surroundings in indoor pedestrian navigation systems. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 7 (5), 635–657. doi: 10.3233/AIS-150335
- OpenStreetMap contributors. (2017). *Planet dump retrieved from https://planet.osm.org*. Zugriff auf <https://www.openstreetmap.org>
- Papinski, D. & Scott, D. M. (2011, may). A GIS-based toolkit for route choice analysis. *Journal of Transport Geography*, 19 (3), 434–442. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2010.09.009
- Parzen, E. (1962, sep). On Estimation of a Probability Density Function and Mode. *The Annals of Mathematical Statistics*, 33 (3), 1065–1076. doi: 10.1214/aoms/1177704472
- 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*, 187. doi: 10.1145/1166253.1166282

- Peponis, J., Zimring, C. & Choi, Y. K. (1990, sep). Finding the Building in Wayfinding. *Environment and Behavior*, 22 (5), 555–590. doi: 10.1177/0013916590225001
- Petrie, H., Johnson, V., Strothotte, T., Raab, A., Fritz, S. & Michel, R. (1996). MOBIC: Designing a Travel Aid for Blind and Elderly People. *Journal of Navigation*, 49 (01), 45. doi: 10.1017/S0373463300013084
- Preiss, B. R. (2008). *Data structures and algorithms with object-oriented design patterns in C++*. John Wiley & Sons.
- Quercia, D., Schifanella, R. & Aiello, L. M. (2014). The shortest path to happiness. In *Proceedings of the 25th acm conference on hypertext and social media - ht '14* (S. 116–125). New York, New York, USA: ACM Press. doi: 10.1145/2631775.2631799
- Rechenberg, I. (1965). Cybernetic solution path of an experimental problem. *Royal Aircraft Establishment Library Translation 1122*.
- Rechenberg, I. (1971). *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. (Unveröffentlichte Dissertation). Technical University of Berlin.
- Rechenberg, I. (1973). *Evolutionsstrategie - Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Stuttgart, Germany: Frommann-Holzboog.
- Richter, K.-F. (2007). A Uniform Handling of Different Landmark Types in Route Directions. In *Spatial information theory* (S. 373–389). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-74788-8_23
- Richter, K.-F. & Duckham, M. (2008). Simplest Instructions: Finding Easy-to-Describe Routes for Navigation. In *Geographic information science* (S. 274–289). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-87473-7_18
- Richter, K.-F. & Klippel, A. (2005, oct). A Model for Context-Specific Route Directions. In (S. 58–78). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-32255-9_4
- Rogers, S., Langley, P., Johnson, B. & Liu, A. (1997). Personalization of the Automotive Information Environment. In *Proceedings of the workshop on machine learning in the real world; methodological aspects and implications* (S. 28–33).
- Sadalla, E. K. & Staplin, L. J. (1980, jun). The Perception of Traversed Distance: Intersections. *Environment and Behavior*, 12 (2), 167–182. doi: 10.1177/0013916580122003
- Salomon, R. (1998, jul). Evolutionary algorithms and gradient search: similarities and differences. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2 (2), 45–55. doi: 10.1109/4235.728207

- Schwefel, H.-P. (1965). *Kybernetische Evolution als Strategie der experimentellen Forschung in der Strömungstechnik*. (Dissertation, Technical University of Berlin). Zugriff auf <https://ci.nii.ac.jp/naid/10011278419/>
- Schwefel, H.-P. (1975). *Evolutionsstrategie und numerische Optimierung*. (Unveröffentlichte Dissertation). Technical University of Berlin.
- Sobek, A. D. & Miller, H. J. (2006). U-Access: A web-based system for routing pedestrians of differing abilities. *Journal of Geographical Systems*, 8 (3), 269–287. doi: 10.1007/s10109-006-0021-1
- Spearman, C. (1904, jan). The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*, 15 (1), 72. doi: 10.2307/1412159
- Stahl, C. & Haupert, J. (2006). Taking location modelling to new levels: A map modelling toolkit for intelligent environments. In *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)* (Bd. 3987 LNCS, S. 74–85). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/11752967_6
- Streeter, L. A. & Vitello, D. (1986, apr). A profile of drivers' map-reading abilities. *Human Factors*, 28 (2), 223–239. doi: 10.1177/001872088602800210
- Streeter, L. A., Vitello, D. & Wonsiewicz, S. A. (1985, may). How to tell people where to go: comparing navigational aids. *International Journal of Man-Machine Studies*, 22 (5), 549–562. doi: 10.1016/S0020-7373(85)80017-1
- Tsetsos, V., Anagnostopoulos, C., Kikiras, P. & Hadjiefthymiades, S. (2006). Semantically enriched navigation for indoor environments. *International Journal of Web and Grid Services*, 2 (4), 453. doi: 10.1504/IJWGS.2006.011714
- Turner, A. (2009). The Role of Angularity in Route Choice. In *Spatial information theory* (Bd. 5756, S. 489–504). doi: 10.1007/978-3-642-03832-7_30
- Ullmann (geb. Müller), M., Bauer, C., Jackermeier, R. & Ludwig, B. (2018, jan). Ain't short sweet, when walking down that street? In *Adjunct proceedings of the 14th international conference on location based services* (S. 223–224). ETH Zurich. doi: 10.3929/ETHZ-B-000225624
- Ullmann (geb. Müller), M., Ohm, C. & Ludwig, B. (2014). Path Network Modeling of Public Buildings. In *International workshop on interfacing indoor and outdoor spaces at giscience*. doi: 10.13140/2.1.1059.5845
- Ullmann (geb. Müller), M., Ohm, C., Schwappach, F. & Ludwig, B. (2016, may). The path of least resistance. *KI - Künstliche Intelligenz*, 31 (2), 125–134. doi: 10.1007/s13218-016-0472-6
- Vanclooster, A., De Maeyer, P., Fack, V. & Van de Weghe, N. (2013). Calculating Least Risk Paths in 3D Indoor Space. In *International-society-for-photogrammetry-and-remote-sensing 8th 3d geoinfo conference/wg ii/2 workshop* (S. 113–120). Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-319-00515-7_2

- Vanclooster, A., Ooms, K., Viaene, P., Fack, V., Van de Weghe, N. & De Maeyer, P. (2014). Evaluating suitability of the least risk path algorithm to support cognitive wayfinding in indoor spaces: An empirical study. *Applied Geography*, 53, 128–140. doi: 10.1016/j.apgeog.2014.06.009
- Vanclooster, A., Van de Weghe, N. & De Maeyer, P. (2016). *Integrating Indoor and Outdoor Spaces for Pedestrian Navigation Guidance: A Review* (Bd. 20) (Nr. 4). doi: 10.1111/tgis.12178
- W3C. (2008). *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition)*. Zugriff auf <https://www.w3.org/TR/REC-xml/>
- Weisman, J. (1981, mar). Evaluating Architectural Legibility. *Environment and Behavior*, 13 (2), 189–204. doi: 10.1177/0013916581132004
- Wener, R. E. & Kaminoff, R. D. (1983, jan). Improving Environmental Information. *Environment and Behavior*, 15 (1), 3–20. doi: 10.1177/0013916583151001
- Whitley, D. (1988). GENITOR: A different genetic algorithm. In *Proceedings of the rocky mountain conference on artificial intelligence, 1988* (S. 118–130).
- Wiener, J. M., Ehbauer, N. N. & Mallot, H. A. (2009). Planning paths to multiple targets: Memory involvement and planning heuristics in spatial problem solving. *Psychological Research*, 73 (5), 644–658. doi: 10.1007/s00426-008-0181-3
- Wilcoxon, F. (1945, dec). Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, 1 (6), 80. doi: 10.2307/3001968
- Winter, S. (2002). Modeling costs of turns in route planning. *GeoInformatica*, 6 (4), 345–361. doi: 10.1023/A:1020853410145
- Wolpert, D. H. & Macready, W. G. (1995). No Free Lunch Theorems for Search 1 Introduction. *Most*, 46 (3), 1–32.
- Worboys, M. (2003, jan). Communicating Geographic Information in Context. In *Foundations of geographic information science* (S. 33–45). CRC Press. doi: 10.1201/9780203009543.ch3
- Worboys, M. (2011). Modeling indoor space. *Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness* (January 2011), 1–6. doi: 10.1145/2077357.2077358
- Yang, L. & Worboys, M. (2011). A navigation ontology for outdoor-indoor space. In *Proceedings of the 3rd acm sigspatial international workshop on indoor spatial awareness - isa '11* (S. 31). New York, New York, USA: ACM Press. doi: 10.1145/2077357.2077364
- Yang, S. & Mackworth, A. K. (2007). Hierarchical Shortest Pathfinding Applied to Route-Planning for Wheelchair Users. *Advances in Artificial Intelligence*, 4509, 539–550.
- Yayan, U., Akar, B., Inan, F. & Yazici, A. (2014, jun). Development of indoor navigation software for intelligent wheelchair. In *Inista 2014 - ieee international symposium on innovations in intelligent systems and applications, proce-*

- dings* (S. 325–329). IEEE. Zugriff auf <http://ieeexplore.ieee.org/document/6873639/> doi: 10.1109/INISTA.2014.6873639
- Zenker, B. (2010). Decision Oriented Programming in HCI: The Multi-Attribute Decision Language MADL. In (S. 344–351). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-16239-8_45
- Zenker, B. & Ludwig, B. (2009a). ROSE – AN INTELLIGENT MOBILE ASSISTANT. In *Proceedings of the 6th international conference on mobile technology, application & systems - mobility '09* (S. 1–5). doi: 10.1145/1710035.1710051
- Zenker, B. & Ludwig, B. (2009b). ROSE - Assisting pedestrians to find preferred events and comfortable public transport connections. *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Technology, Application & Systems - Mobility '09*, 1–5. doi: 10.1145/1710035.1710051
- Zhu, S. & Levinson, D. (2015, aug). Do People Use the Shortest Path? An Empirical Test of Wardrop's First Principle. *PLOS ONE*, 10 (8), e0134322. doi: 10.1371/journal.pone.0134322
- Zimring, C. M. (1981, jan). Stress And The Designed Environment. *Journal of Social Issues*, 37 (1), 145–171. doi: 10.1111/j.1540-4560.1981.tb01061.x

Abbildungsverzeichnis

1.1	Gleich und doch verschieden: Zwanzig räumlich getrennt liegende, aber zum Verwechseln ähnliche Korridore an der Universität Regensburg	6
1.2	Besucher der <i>URwalking</i> -Navigationssysteme zum Start des Sommersemesters 2019	9
2.1	Beispielhafte Modellierung, in der verschiedene <i>Node</i> - und <i>Edge</i> -Kategorien zum Einsatz kommen	26
2.2	Da der Aufwand, die umständliche Wegführung (links) durch die Erstellung zusätzlicher <i>Edges</i> zu verhindern, quadratisch steigt (Mitte), werden spezielle „ <i>Arenanodes</i> “ zur Kennzeichnung von Cliques verwendet (rechts).	48
2.3	Die dreidimensionale Darstellung visualisiert die Transformation jeder Etage eines Gebäudes in ein globales gemeinsames Koordinatensystem (rechts). Durch systematische Versatzstücke bei der automatischen Generierung zusätzlicher Referenzpunkte anhand von Treppenhäusern kann es jedoch zu Verzerrungen kommen (links). Eine Transformation ohne Scherung führt zu Verbesserungen, dennoch kommt es bei der Rotation der oberen Etagen zu deutlich sichtbaren Fehlern (Mitte).	52
2.4	Die webbasierte Applikation zur Modellierung der Umgebung soll die Erstellung spezifikationskonformer Modelle erleichtern.	54
2.5	Jede Änderung anhand der visualisierten Darstellung wirkt sich unmittelbar auf die zugrunde liegende XML-Datei aus, die sich auch direkt editieren lässt (links). Weiterhin lässt sich zur dreidimensionalen Darstellung umschalten, die sich zur Kontrolle der Koordinatentransformation eignet (rechts).	55

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2.6 Im Physikgebäude (links) und am Campusplan (rechts) existiert jeweils ein <i>Node</i> der Kategorie „Verknüpfungspunkt“ (grün markiert), der die Elemente der zweiten Hierarchieebene verbindet. Um sicherzustellen, dass diese <i>Nodes</i> die gleiche Position im globalen Koordinatensystem aufweisen, können die Positionen automatisiert abgeglichen werden.	56
2.7 Zur Auswahl und Speicherung von Pfaden bietet die Applikation zahlreiche Funktionen.	56
3.1 Bildschirmfoto der erstellten Web-Umfrage zur Ermittlung möglicher Nutzerpräferenzen	85
3.2 Bildschirmfoto der zweiten Web-Umfrage zur Bewertung von Einflussfaktoren	87
3.3 Ergebnisse der zweiten Nutzerbefragung	88
3.4 Minimale Kosten durch Bereiche werden vorab berechnet.	95
3.5 Für die Routensuche werden zunächst Kosten von Start- und Zielpunkt zu den Gebäudezugängen berechnet.	95
3.6 Die speziellen Anforderungen an die zu berechnende Route werden im praktischen Einsatz der Web-Applikation kaum genutzt.	99
3.7 Die nach Winter (2002) erstellte Grafik veranschaulicht, dass eine Kostenfunktion bei entsprechend hoher Gewichtung von Linkskurven durch einen Pfad minimiert wird, in dem ein <i>Node</i> doppelt enthalten ist. Ein solcher Pfad lässt sich ohne weitere Anpassung nicht mittels Dijkstra- oder A*-Algorithmus berechnen.	102
3.8 Die nach Caldwell (1961) erstellte Abbildung veranschaulicht, wie sich ein Wege-Netzwerk (links) mit unterschiedlich zu gewichtenden Abbiegungen in ein Pseudo-Netzwerk (rechts) überführen lässt, sodass kostenoptimierte Pfade beispielsweise mittels Dijkstra-Algorithmus ermittelt werden können.	103
4.1 Überblick über die Längen der von NutzerInnen präferierten Routen sowie der jeweils berechneten kürzesten Routen	111
4.2 Vergleich der Längen der von NutzerInnen präferierten Routen mit den jeweils berechneten kürzesten Routen	112
4.3 Vergleich der Längen überdachter Wege in von NutzerInnen präferierten Routen mit denen in jeweils berechneten kürzesten Routen .	116
4.4 Vergleich der Längen unüberdachter Wege in von NutzerInnen präferierten Routen mit denen in jeweils berechneten kürzesten Routen bei unterschiedlichen Wetterverhältnissen	117
4.5 Querschnitt der <i>Fitnessfunktion</i> in Abhängigkeit einiger exemplarischer <i>Gewichtungen</i>	124

4.6	Zeitliche Änderung der <i>Fitness</i> von fünf Durchläufen mit einem beispielhaften <i>Parametervektor</i>	129
4.7	Ergebnisse des Racing-Verfahrens für verschiedene Parameter	136
4.8	Zeitlicher Verlauf des Racing-Verfahrens für verschiedene Parameter	139
4.9	Zeitlicher Verlauf der endgültigen Optimierung	139
4.10	Mittelwerte des zeitlichen Verlaufs der endgültigen Optimierung . .	140
4.11	Vergleich einer berechneten kürzesten Route (links) zu einer Route, die anhand optimierter <i>Gewichtungsfaktoren</i> berechnet worden ist (rechts) (Karte im Hintergrund übernommen von OpenStreetMap contributors (2017))	145
4.12	Relativer Umweg der optimierten Routen in Abhängigkeit der Länge der kürzesten Route	147
4.13	Überblick der durch die Optimierung hervorgerufenen Häufigkeitsdifferenzen verschiedener Pfadelemente gegenüber kürzesten Routen	149
4.14	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> $s_{\text{Flurtür}}$	152
4.15	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> $s_{\text{Raumtür}}$	154
4.16	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> $s_{\text{Karussell-Flurtür}}$. .	154
4.17	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> $t_{\text{überdachter Fußweg}}$.	155
4.18	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> $u_{\text{überdachter Fußweg}}$.	156
4.19	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> $t_{\text{unüberdachter Fußweg}}$.	157
4.20	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> $u_{\text{unüberdachter Fußweg}}$	157
4.21	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> $t_{\text{geschlossener Bereich}}$.	158
4.22	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> $u_{\text{geschlossener Bereich}}$.	158
4.23	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> t_{Stufen}	159
4.24	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> u_{Stufen}	159
4.25	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> t_{Rampe}	160
4.26	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> u_{Rampe}	160
4.27	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> $t_{\text{Unterführung}}$	161
4.28	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> $u_{\text{Unterführung}}$	161
4.29	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> v_{Aufzug}	162
4.30	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> w_{Aufzug}	163
4.31	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> v_{Treppe}	164
4.32	Änderung der <i>Fitness</i> in Abhängigkeit des <i>Faktors</i> w_{Treppe}	164
4.33	Relativer Umweg der optimierten Routen durch das Einkaufszentrum im Vergleich zur Universität Regensburg	168
4.34	Vergleich der durch die Optimierung hervorgerufenen Häufigkeitsdifferenzen verschiedener Pfadelemente gegenüber kürzesten Routen	169

Tabellenverzeichnis

3.1	Kriterien aus vorgestellten Arbeiten, die Einfluss auf Nutzerentscheidungen bei der Wahl einer Route nehmen können.	82
3.2	Ergebnisse des Onlinefragebogens	86
4.1	Übersicht über die acht nach p-Wert geordneten Signifikanztests . .	118
4.2	Quantitative Parameter der entwickelten Evolutionsstrategie, deren Ausprägungen mittels des Racing-Verfahrens verglichen werden . .	135
4.3	Die aufgelisteten <i>Gewichtungsfaktoren</i> stellen das Ergebnis der durchgeführten Optimierung dar	141
4.4	Rangkorrelationskoeffizienten der Häufigkeiten bzw. Längen der Pfadelemente Flurtür, Raumtür, Karussell-Flurtür, Aufzug, Treppe, überdachter Fußweg, unüberdachter Fußweg, geschlossener Bereich, Stufen, Rampe, Unterführung und Straßenübergang	150
4.5	Vergleich des Umgebungsmodells der Universität Regensburg mit einem Einkaufszentrum	166