



**Universität
Zürich** ^{UZH}

Geographisches Institut

Beurteilung von Netzwerkmodellen für die Indoor-Routenplanung

GEO 511 Masterarbeit

Eingereicht durch
Melanie Willimann
12-102-968

Betreut durch
Dr. Haosheng Huang

Fakultätsvertretung
Prof. Dr. Robert Weibel

30. Juni 2018
Geographisches Institut, Universität Zürich

Impressum

Melanie Willimann, Beurteilung von Netzwerkmodellen für die Indoor-Routenplanung

Universität Zürich
Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät
Geographisches Institut
Abteilung GIS
Leitung: Prof. Dr. Robert Weibel
Betreuung: Dr. Haosheng Huang
Layout: Corporate Design Universität Zürich

Melanie Willimann
Baldeggstrasse 36
CH-6280 Hochdorf
078 821 77 92
melanie@willimann.info

Vorwort

Bestimmt kennen Sie die Situation: Sie befinden sich in einem grossen Gebäude, in dem Sie noch nie vorher waren, z.B. an einem Flughafen in einer fremden Stadt, und müssen dringend zu einem bestimmten Schalter. Mühsam suchen Sie im Gebäude nach einem Übersichtsplan, auf dem alle Gebäudeteile mit den diversen Stockwerken und den vielen Zimmern und Abteilungen eingezeichnet sind. Haben Sie erst mal den Schalter, zu dem Sie müssen, auf dem Plan gefunden, folgt die Suche nach dem richtigen Weg durch den Dschungel des Gebäudekomplexes.

Stellen Sie sich nun eine ähnliche Situation im Strassenverkehr in einer fremden Stadt vor: Sie müssen etwas an einer bestimmten, Ihnen unbekanntem, Adresse abliefern. Heutzutage ist es selbstverständlich geworden, das Navigations-Gerät oder sogar das Mobiltelefon zur Hand zu nehmen, nach der Adresse zu suchen und dann zum Zielort zu navigieren. Je nach Situation wählen Sie die schnellste oder die spritsparende Route, oder Sie entscheiden sich für die Route „Für Entdecker“. Sie würden wohl nicht in Erwägung ziehen, einen Papierplan hervorzukramen, alle Strassennamen durchzuschauen um die gesuchte Adresse aufzuspüren und dann einfach mal in die Richtung des Ziels loszufahren.

Diese Diskrepanz zwischen der Strassen- und der Gebäude-Navigation ist heute noch selbstverständlich. Mit der Digitalisierung und der damit verbundenen wachsenden Menge an Daten, wird es in der Zukunft aber auch möglich sein, in einem Gebäude ein Navigationsgerät oder ein entsprechendes App auf dem Mobiltelefon zu nutzen. Dies dient in mancher Hinsicht einer effizienten Fortbewegung und Orientierung in einem grossen oder unbekanntem Gebäude. Je nach Art des Algorithmus, der die Route berechnet, kann aber ein Indoor-Navigationssystem auch als Hilfsmittel für Besucher mit besonderen Bedürfnissen dienen. Ein Rollstuhlfahrer sucht z.B. eine Route, welche Treppen vermeidet, während ein anderer Besucher, der das Gebäude zum ersten Mal betritt, eine Route sucht, die man ganz einfach befolgen kann, ohne dass man viele Anweisungen dazu braucht.

Eine Entwicklung Richtung Gebäude-Navigation macht also Sinn, und ich möchte mit dieser Arbeit meinen Teil dazu beisteuern, diese schon anrollende Entwicklung zu unterstützen. Mit der vorliegenden Arbeit soll die Ableitung des Netzwerkmodells anhand eines vorhandenen Plans des Gebäudes möglich gemacht werden. Dieses Netzwerkmodell soll die Berechnung von verschiedenen Routen unterstützen.

Diese Arbeit ist dank der Unterstützung von diversen Personen entstanden. In erster Linie möchte ich mich bei Dr. Haosheng Huang bedanken, welcher meine Arbeit betreut hat. Er hat sich regelmässig Zeit genommen, um über den Inhalt der Arbeit zu diskutieren und hat mir dabei immer wieder sehr wertvolle Rückmeldungen und Inputs gegeben. Seine Denkanstösse haben wesentlich dazu beigetragen, dass die Arbeit in der gegenwärtigen Form vorliegt.

Weiter bedanke ich mich bei Prof. Dr. Robert Weibel, der mich insbesondere in der Konzeptphase der Arbeit unterstützt hat und mit seiner Leitung der Abteilung GIS eine optimale Umgebung für das Schreiben einer Masterarbeit sicherstellt. Im Rahmen der Konzeptpräsentation und der Kolloquiums-Vorträgen durfte ich eine wertvolle Zusammenarbeit mit anderen Studierenden, Forschenden und Mitarbeitenden der Universität erfahren. Dabei gilt der Dank auch Anita Graser, Forschende am AIT (Austrian Institute of Technology), welche mir nach ihrem Kolloquium-Beitrag diverse Fragen zum Aufbau von Netzwerkmodellen und zur Routenberechnung beantwortete.

Die Daten, die ich für diese Arbeit brauchen durfte, stammen von der Universität Zürich. Die Abteilung „Infrastruktur“ hat mir freundlicherweise zahlreiche Pläne der Universitätsgebäude in Zürich digital zur Verfügung gestellt.

Zu guter Letzt gilt mein Dank Monique Felber, die viele Stunden dafür aufgewendet hat, meine Arbeit gegenzulesen und auf stilistische und inhaltliche Fehler zu prüfen.

Melanie Willimann
Hochdorf, Juni 2018

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Herleitung eines Netzwerkmodells für die Routenplanung in Gebäuden. Das Netzwerkmodell, auf dem der Netzwerkgraph basiert, soll optimal für diverse Routenberechnungs-Algorithmen sein.

In einem ersten Schritt wird das Verhalten bei der Routenwahl von Fussgängern im Indoor- und Outdoor-Bereich anhand von vorhandener Literatur untersucht und die daraus entstandenen Routenberechnungs-Algorithmen beleuchtet. Bei der Navigation in Gebäuden wird insbesondere darauf eingegangen, wo es noch Potenzial zur Entwicklung von weiteren Algorithmen gibt, da in diesem Bereich die Vielfalt der Algorithmen noch nicht gross ist. Des Weiteren werden die verschiedenen, schon realisierten, Daten- und Netzwerkmodelle für die Navigation in Gebäuden aufgezeigt.

Anschliessend werden das Zell-, das Korridor- und das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell in drei Testumgebungen auf modellorientierte und routingorientierte Anforderungen geprüft und ihre Eignung für die Indoor-Routenplanung beurteilt. Es resultiert die Erkenntnis, dass ein hybrides Netzwerkmodell die Entwicklung von weiteren Routenberechnungs-Algorithmen im Indoor-Bereich am besten unterstützt. Folglich wird die Erzeugung des Graphen auf der Basis des hybriden Netzwerkmodells erklärt. Das hybride Netzwerkmodell wird abschliessend ebenfalls auf die Anforderungen geprüft und beurteilt.

Summary

This work deals with the derivation of a network model for route-planning in buildings. The network model on which the network graph is based, should be optimal for various route calculation algorithms. In a first step, the behaviour of pedestrians in indoor and outdoor environments when choosing a route is investigated and the resulting route calculation algorithms are examined using existing literature. In the case of navigation in buildings, particular attention is paid to where there is still potential for the development of further algorithms, since the variety of algorithms in this field is not yet satisfying. Furthermore, the various data and network models already implemented for navigation in buildings are shown.

The cell, corridor and visibility network models are then tested in three test environments for model-oriented and route-oriented requirements and their suitability for indoor route planning is assessed. The result is the finding that a hybrid network model is the best support for the development of further route calculation algorithms in the indoor area. Consequently, the generation of the graph on the basis of the hybrid network model is explained. Finally, the hybrid network model is also tested and evaluated for its requirements.

Inhalt

Vorwort	2
Zusammenfassung	4
1 Problemstellung	7
1.1 Grundbegriffe in der vorliegenden Arbeit	8
1.2 Aufbau der Arbeit	9
2 Grundlagen der Indoor-Routenplanung	10
2.1 Verhalten bei der Routenwahl in der Outdoor-Navigation	10
2.2 Algorithmen für die Outdoor-Routenplanung	12
2.2.1 Einfachster-Weg-Algorithmus	12
2.2.2 Zuverlässigster-Weg-Algorithmus	14
2.2.3 Kleinster-Gesamtdrehwinkel-Algorithmus	16
2.2.4 Wenigste-Abbiegungen-Algorithmus	17
2.2.5 Weitere Algorithmen	18
2.3 Verhalten bei der Routenwahl in der Indoor-Navigation	18
2.4 Algorithmen für die Indoor-Routenplanung	20
2.5 Indoor-Netzwerkmodelle	21
2.5.1 Korridor-Herleitung: Korridor-Netzwerkmodell	24
2.5.2 Aufteilung in Zellen und Polygone: Zell-Netzwerkmodell	25
2.5.3 Aufteilung in Raster: Raster-Netzwerkmodell	28
2.5.4 Visuelle Aufteilung: Sichtbarkeits-Netzwerkmodell	30
2.5.5 Datenmodelle unabhängig der Link-Node-Struktur	31
2.6 Fazit	33
2.6.1 Zusammenfassung der Grundlagen	33
2.6.2 Forschungslücke	34
3 Vorgehensweise	35
3.1 Ziel der Arbeit	35
3.2 Methoden	35
3.3 Daten und Software	36
4 Beurteilung bestehender Indoor-Netzwerkmodelle	37
4.1 Untersuchungsgebiet	37
4.2 Anforderungen an das Netzwerkmodell	41
4.3 Vergleichene Indoor-Netzwerkmodelle	43
4.4 Beurteilung der Netzwerkmodelle anhand von modellorientierten Anforderungen	44

4.4.1 Modellierungsaufwand (A1)	48
4.4.2 Komplexität (A2)	51
4.4.3 Semantik (A3)	54
4.5 Beurteilung der Netzwerkmodelle anhand von routingorientierten Anforderungen	54
4.5.1 Realitätsbezug (A4)	56
4.5.2 Abbiegungserkennung (A5)	58
4.5.3 Abzweigungskategorisierung (A6)	59
4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse	60
5 Das hybride Netzwerkmodell	63
5.1 Der hybride Ansatz	63
5.2 Input für die Transformation	64
5.3 Transformation in das hybride Netzwerkmodell am Beispiel des Campus Irchel	66
5.4 Beurteilung des hybriden Netzwerkmodells	70
5.4.1 Beurteilung des Netzwerkmodells anhand von modellorientierten Anforderungen	70
5.4.2 Beurteilung des Netzwerkmodells anhand von routingorientierten Anforderungen	73
5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse	74
6 Diskussion der Ergebnisse	76
6.1 Zusammenfassung der Vorgehensweise	76
6.2 Ergebnisse in Bezug auf Z1	76
6.3 Ergebnisse in Bezug auf Z2	77
6.4 Kritische Reflexion der Vorgehensweise	78
7 Ausblick	80
7.1 Weitere Forschungsmöglichkeiten	80
7.2 Persönliches Schlusswort	80
I Verzeichnisse	i
I.a Literatur	i
I.b Abbildungen	v
I.c Tabellen	xi
II Anhang	xii
II.a Netzwerkmodell-Studie	xii
II.b Transformations-Workbench FME	xxv
II.c Netzwerkmodell-Studie des hybriden Ansatzes	xxxiii

1 Problemstellung

Um via Strassen von A nach B zu gelangen, nutzen wir heutzutage häufig ein Navigationsgerät, mit dem wir einen Weg berechnen und uns Anweisungen geben lassen. Diese Entwicklung hat in den letzten Jahren mit der Nutzung von Mobiltelefonen stark zugenommen, die automatischen Wegberechnungen werden immer populärer und erleichtern uns den Alltag.

Während es heutzutage auf der Strasse selbstverständlich ist, ein Navigationssystem zu nutzen, wird diese Technik innerhalb von Gebäuden noch wenig genutzt, weil die entsprechenden Systeme noch nicht verbreitet sind, beziehungsweise noch gar nicht existieren. In Gebäuden wird zur Orientierung immer noch häufig auf den altbewährten Plan zurückgegriffen, auf welchem man sich sein Ziel suchen kann. Systeme, welche das gewünschte Ziel orten und die Route zu diesem Ziel berechnen und Routenanweisungen geben, werden praktisch nicht genutzt.

Wie uns aber die Navigation in Strassennetzwerken aufzeigt, kann ein Navigationssystem die Effizienz extrem steigern und hat dadurch eine wirtschaftliche Wichtigkeit. Diese Effizienz soll auch in Gebäude geholt werden, in welchen die Orientierung durch die Grösse und die Komplexität des Gebäudes erschwert ist, oder in welchen sich der Nutzer des Systems nicht auskennt. Der Fokus dieser Arbeit liegt also auf grossen, öffentlichen Gebäuden, wie zum Beispiel Flughäfen, Spitäler oder Universitätsgebäuden mit komplexen Gebäudestrukturen über mehrere Stockwerke.

"There are many ways to walk."

Dieses Zitat von John Urry (Urry 2007:65) zeigt schön auf, dass es nicht nur den einen Weg von A nach B gibt. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Wegen und je nach Bedürfnis wird ein anderer Weg gewählt. In der Strassenavigation werden heute schon viele verschiedene Algorithmen angewandt, die unterschiedliche Ansprüche berücksichtigen. So kann man nicht nur Routen berechnen, die möglichst schnell oder spritsparend sind, sondern man kann auch Routen erzeugen, die eine schöne Landschaft bieten oder gewisse Elemente, wie z.B. starke Steigungen auf einer Fahrradrouten meiden. Bestehende Navigationssysteme für die Routenfindung in Gebäuden berücksichtigen meistens nur den kürzesten Weg, welcher jedoch gerade für Nutzer, die sich im Gebäude noch nicht auskennen, ungeeignet ist. Die Routenberechnungen für ein Indoor-Navigationssystem sollen die Tatsache berücksichtigen, dass ein Nutzer die Umgebung noch nicht gut kennt und die menschlichen Prinzipien der Routenwahl berücksichtigen. Dadurch soll auch eine Vielfalt an Routenberechnungs-Algorithmen entstehen, wie sie heute schon in der Outdoor-Navigation vorhanden ist.

Ein Navigationssystem ist ein sehr komplexes System, welches aus mehreren Komponenten besteht. Bevor verschiedene Routen, welche unterschiedliche Bedürfnisse berücksichtigen, berechnet werden können, muss das Gebäude in einem Netzwerkmodell modelliert und abstrahiert werden. Dieser Schritt stellt eine grosse Herausforderung dar, denn Gebäudekomplexe bestehen aus vielen verschiedenen Strukturen, welche berücksichtigt werden müssen.

Eine besondere Herausforderung ist dabei die dritte Dimension, welche durch die verschiedenen Stockwerke entsteht. Die Routing-Algorithmen im Outdoor-Bereich verarbeiten hauptsächlich Daten aus einem zweidimensionalen Netzwerkmodell. Durch den Schritt in die dritte Dimension sind Routen-Instruktionen und Darstellungen schwieriger.

Eine weitere Herausforderung ist die Struktur von Gebäuden. Während Strassen, Wege und Trottoirs grundsätzlich als Linien abstrahiert werden, gibt es in Gebäuden viele Strukturen, die nicht durch eine Linie dargestellt werden können. Beispiele dafür sind grosse Hallen oder Räume, auch Freiflächen genannt, welche ganz viele verschiedene Möglichkeiten bieten, die Fläche zu passieren.

Somit können Netzwerkmodelle und Routing-Algorithmen aus dem Outdoor-Bereich nicht Eins-zu-Eins für die Navigation in Gebäuden übernommen werden. Daher ist die Erarbeitung eines guten Netzwerkmodells als Grundlage für die Routing-Algorithmen von grosser Bedeutung. Die vorliegende Arbeit fokussiert somit auf das Netzwerkmodell, welches als Grundlage für die Erzeugung des Graphen dient, auf welchem anschliessend Routenberechnungen mit verschiedenen Algorithmen ausgeführt werden können und dadurch Routenbeschreibungen erzeugt werden sollen.

Diese Arbeit soll in einem ersten Schritt das bereits vorhandene Wissen der Indoor- und Outdoor-Navigation zusammentragen. Dabei wird auch schon auf das übergeordnete Ziel, die Vielfältigkeit der Routing-Algorithmen in der Gebäude-Navigation zu vergrössern, fokussiert. Es sollen verschiedene Algorithmen betrachtet werden, welche möglicherweise für ein Indoor-Navigationssystem eingesetzt werden können. Der Grund für diesen Vorgriff ist die Tatsache, dass diese Algorithmen Anforderungen an ein Netzwerkmodell stellen, welche berücksichtigt werden müssen, damit später die Routing-Algorithmen überhaupt funktionieren können.

1.1 Grundbegriffe in der vorliegenden Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird aufgrund der besseren Lesbarkeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermassen für beide Geschlechter.

Folglich werden einige Begriffe, die in der Arbeit oft verwendet werden und als Grundbegriffe einheitlich verstanden werden sollen, von der Autorin etwas umrissen und kurz erklärt.

Ein **Navigationssystem** besteht aus drei Elementen: der Lokalisation, der Routenplanung und der Zielführung auf der berechneten Route in Form eines Wegbeschreibers (Liu und Zlatanova 2012 und Hochmair und Frank 2000).

Das **Netzwerkmodell** stellt die Grundlage dar, wie ein Gebäude abstrahiert und modelliert werden soll. Es kann auch als eine leere Datenbank verstanden werden, in welcher Regeln definiert sind, aber noch keine Daten abgefüllt sind (Meijers et al. 2005).

Auf der Basis des Netzwerkmodells wird der **Graph**, auch Netzwerk genannt, eines Gebäudes erzeugt, welcher meistens aus Punkten und Linien besteht. Der Graph ist abhängig vom Gebäude und stellt das Äquivalent zu den Daten in der gefüllten Datenbank dar (ebd.).

Ein **Punkt** wird auch als Knoten(-Punkt), Ecken, Eckpunkt, Entscheidungspunkt, Node (engl.) oder Vertex (engl.) bezeichnet. Damit werden Verzweigungen dargestellt, welche Standorte repräsentieren, bei denen der Nutzer die Wahl zwischen mehreren Richtungen hat (Butler et al. 1993).

Eine **Linie** wird auch als Kante, Pfadsegment oder Edge (engl.) benannt. Damit sind die Verbindungen zwischen zwei Knotenpunkten gemeint. Eine Linie wird immer durch einen Start- und einen Endpunkt definiert.

Mit **Algorithmus** im Allgemeinen ist jeweils der Algorithmus gemeint, welcher eine mögliche Route berechnet und wird auch Routing-Algorithmus oder Routenberechnungs-Algorithmus genannt. Als Input nutzt der Algorithmus einen Graph und einen Start- & Zielpunkt und als Output resultiert eine Route.

Dem Algorithmus kann eine **Gewichtungsfunktion** zugrunde liegen. Diese Gewichtungsfunktion gewichtet verschiedene Faktoren unterschiedlich stark, wodurch je nach Wahl der Gewichte unterschiedliche Routen entstehen können.

Eine **Route** besteht aus einer Abfolge von Punkten und Linien aus dem Netzwerk. Diese Abfolge führt von einem definierten Start- zu einem definierten Zielpunkt (Hochmair und Frank 2000). Die Wahl und Abfolge dieser Punkte und Linien ist vom Algorithmus und den damit berücksichtigten Faktoren abhängig. Aufgrund der Route wird die Zielführung in Form eines Wegbeschriebs ausgeführt.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Kapitel 2 werden die Grundlagen für die Entwicklung eines Netzwerkmodells betrachtet. Dabei wird zuerst auf Outdoor-Routing-Algorithmen eingegangen, wobei einerseits das Verhalten bei der Routenwahl betrachtet wird und andererseits die unterschiedlichen Routing-Algorithmen im Outdoor-Bereich vorgestellt werden. Dann wird auf Indoor-Routing-Algorithmen eingegangen, wobei wiederum zuerst das Verhalten bei der Routenwahl betrachtet wird und dann die vorhandenen oder angedachten Routing-Algorithmen im Indoor-Bereich vorgestellt werden. Anschliessend werden die bereits existierenden Netzwerkmodelle für die Modellierung von Indoor-Umgebungen vorgestellt. Abschliessend wird die zu untersuchende Forschungslücke festgestellt.

Im Kapitel 3 wird die Vorgehensweise dieser Forschungsarbeit aufgezeigt. Nach der Definition der Ziele dieser Arbeit werden die Methoden, die zu den Zielen führen sollen, erklärt. Daraufhin werden noch die verwendeten Daten und Software vorgestellt.

Im 4. Kapitel werden nun drei der im Kapitel 2 vorgestellten Netzwerkmodelle beurteilt. Es sind dies das Korridor-Netzwerkmodell, das Zell-Netzwerkmodell und das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell. Die Beurteilung wird anhand von modellorientierten und routingorientierten Anforderungen durchgeführt.

Basierend auf dieser Beurteilung wird dann im 5. Kapitel ein neues, hybrides Netzwerkmodell eingeführt. Dabei wird der Aufbau dieses Netzwerkmodells aufgezeigt und auch die konkrete Transformation von Stockwerkplänen in ein Netzwerk, basierend auf dem hybriden Netzwerkmodell, vorgestellt. Schliesslich wird auch das hybride Netzwerkmodell anhand der modellorientierten und routingorientierten Anforderungen beurteilt und aufgezeigt, ob sich dieses Netzwerkmodell für die Indoor-Routenplanung eignet.

Im Kapitel 6 werden dann die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zusammengefasst, diskutiert und reflektiert. Abschliessend wird im Kapitel 7 auf weitere Forschungsmöglichkeiten hingewiesen und ein persönliches Fazit gezogen.

2 Grundlagen der Indoor-Routenplanung

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über die vorhandene Literatur gegeben. Dieses Kapitel dient anschliessend als Grundlage für die Beurteilung und Entwicklung von Netzwerkmodellen.

2.1 Verhalten bei der Routenwahl in der Outdoor-Navigation

Im Gegensatz zu Autofahrern, die sich an Spuren und Verkehrsregelungen halten müssen, haben Fussgänger mehr Möglichkeiten, ihre Routen zu wählen. Sie werden eher selten von Restriktionen eingeschränkt und haben eine grössere Auswahl an möglichen Routen. Von dieser grossen Auswahl an Routenoptionen können sie diejenige wählen, die ihnen am ehesten entspricht (Seneviratne und Morrall 1985).

Seneviratne und Morrall (1985) haben 2685 Fussgänger befragt, nach welchem Kriterium sie ihre Route, auf der sie sich gerade befinden, gewählt haben. In der Tabelle 1 sind die Resultate zu sehen. Die Kriterien sind rangiert nach der Anzahl der Personen, die dieses Kriterium als den wichtigsten Faktor für die Wahl der Route angesehen haben.

Tabelle 1: Rangliste von Faktoren, welche die Routenwahl beeinflussen (übernommen von Seneviratne und Morrall 1985).

RANG	ROUTENWAHLKRITERIUM
1	Schnellste Route
2	Gewohnheit
3	Einzig verfügbare Route
4	Schönste Route
5	Am wenigsten Strassenüberquerungen
6	Am wenigsten Leute
7	Bester Wetterschutz
8	Am wenigsten Lärm oder Luftverschmutzung
9	Sicherste Route
	Andere Kriterien (14.2%)

Auch Hill (1982) stellte fest, dass oft der kürzeste, beziehungsweise der schnellste Weg gewählt wird. Allerdings unter der entscheidenden Voraussetzung, dass sich die Probanden in der Umgebung gut auskennen.

Golledge (1995a) fragte seine Probanden, welches Kriterium sie für eine soeben getätigte Routenwahl in einem Experiment beachtet haben. Die Probanden gaben an, das Kriterium „kürzeste Distanz“ und kurz dahinter das Kriterium „kürzeste Dauer“ bei der Routenwahl im Experiment berücksichtigt zu haben. Als er sie allerdings nach den Kriterien fragte, welche sie üblicherweise berücksichtigen, wurden andere Kriterien genannt (siehe Tabelle 2). Die Routenwahl während dem Experiment wurde also nicht als „normale Tätigkeit“ wahrgenommen.

Tabelle 2: Rangfolge der Kriterien, die für eine Routenwahl berücksichtigt werden (Golledge 1995a).

	RANG	RANG
	Kriterium im Experiment berücksichtigt	Kriterium normalerweise berücksichtigt
Kürzeste Distanz	1	1
Kürzeste Dauer	2	6
Wenigste Abbiegungen	3	3
Ästhetische Route	4	9
Zuerst bemerkt	5	2
Lange Seite zuerst	6	7
Viele Kurven	7	10
Am meisten Abbiegungen	8	5
Anders als vorherige Route	9	8
Kürzeste Seite zuerst	10	4

Die Schlussfolgerung daraus ist, dass das Verständnis von räumlichen Informationen und räumlichen Beziehungen fehleranfällig, naiv und unvollständig ist. Die Menschen können schlecht einschätzen, was näher ist oder welcher Weg kürzer ist (Golledge 1995a). Dadurch ist es auch nicht einfach, die Umgebungsinformationen so bereitzustellen, dass ein Mensch anschliessend diese Informationen verarbeiten kann und seinen Weg zu Fuss findet (Golledge 1995).

Auch Gärling et al. (1992) belegten, dass für Fussgänger der kürzeste und der schnellste Weg oder die Anstrengung keine dominanten Kriterien im Weg-Wahl-Prozess sind.

Hoogendoorn und Bovy (2004) führten noch ein weiteres Kriterium auf, nach dem eine Route gewählt werden kann. Sie sehen das Kriterium „Direktheit“ als zentral an, wobei nicht nur die Länge der Route eine Rolle spielt, sondern auch deren Komplexität in Bezug auf Richtungsänderungen.

Hill (1982) untersuchte nicht nur die Routenwahl von Probanden in bekannten Umgebungen. Er stellte fest, dass sobald der Weg einer anderen Person beschrieben wird, nicht mehr der schnellste oder kürzeste Weg beschrieben wird, sondern die einfachste Route. Einfache Routen zeichneten sich durch eine räumlich einfache Struktur aus und gingen oft den Grenzen der Raumstruktur entlang und blieben innerhalb dieser Struktur (ebd.). Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass bei alltäglichen Aktivitäten in gewohnten Umgebungen der kürzeste oder schnellste Weg gewählt wird, hingegen Personen, die sich nicht gut auskennen in der Umgebung, der einfachste Weg vorgeschlagen wird. Es wird aber offen gelassen, wieso die einfachste Route für einen Routenbeschrieb gewählt wird.

Diese Feststellung untermauerte auch Golledge (1995a). Er stellte fest, dass je nach Umgebung (rasterähnliches Netzwerk oder Netzwerk mit Diagonalen oder Kurven) ein anderes Kriterium gewählt wird. In einer weiterführenden Arbeit zeigte er zudem, dass mit Zunahme der Komplexität der Umgebung die Routen-Kriterien immer weniger der schnellsten oder kürzesten Route entsprechen (Golledge 1995). Das menschliche Navigationssystem interagiert also mit der Umgebung, in welcher navigiert wird. In den meisten Navigationssystemen werden aber Routenwahl-Strategien verwendet, die nicht zwingend die Strategie von Reisenden widerspiegeln. Denn Reisende wählen immer wieder andere Routen, man kann diese Routenwahl nicht generalisieren (Golledge 1995a).

Basierend auf diesen vielfältigen Kriterien für die Routenwahl und der Erkenntnis, dass Fussgänger nicht immer die kürzeste oder schnellste Route wählen, wurden diverse Algorithmen für die Outdoor-

Navigation von Fussgängern entwickelt. Einige dieser Algorithmen werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

2.2 Algorithmen für die Outdoor-Routenplanung

Routenplanungs-Algorithmen basieren oft auf Graphen, da Graphen eine übliche Repräsentation von Netzwerken sind und dieses Raumkonzept die Wegführung unterstützt (Vancloster et al. 2016).

Ein Graph G besteht aus Eckpunkten E und Kanten K , $G = (E, K)$, welche die Eckpunkte verbinden, $K \subseteq E \times E$. Jede Kante hat einen Start- und einen Endknoten. Grob gesagt stellen die Eckpunkte Orte dar und die Kanten die Beziehungen zwischen diesen Orten (ebd.). Je nach Algorithmus gibt es jedoch mehr Anforderungen an den Graphen, welche für jeden spezifischen Algorithmus definiert werden müssen (Cormen et al. 2009).

Ein gewichteter Graph hat zusätzlich eine Gewichtungsfunktion $g : K \rightarrow \mathbb{R}^+$, welche jeder Kante ein Gewicht zuordnet (Duckham und Kulik 2003). Routenberechnungen brauchen nicht mehr als einen Graphen und eine Gewichtungsfunktion. Die einfachste Gewichtungsfunktion ist jene, welche die geometrische Distanz misst. Eine etwas anspruchsvollere Gewichtungsfunktion ist zum Beispiel eine Funktion, die Treppen "schwerer" gewichtet als Aufzüge. Für solche Funktionen sind aber semantische Informationen notwendig (Lorenz et al. 2006).

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass den meisten Algorithmen der Dijkstra-Algorithmus zugrunde liegt, die Gewichte jedoch variiert werden.

2.2.1 Einfachster-Weg-Algorithmus

Richter und Klippel (2002) weisen in ihrer Forschungsarbeit auf den Einfluss der Anzahl der passierenden Kreuzungen auf einer Route hin. Doch nicht nur die Anzahl Kreuzungen, sondern auch die Anzahl der Abbiegungsmöglichkeiten an einer Kreuzung ist von grosser Bedeutung. Diese Faktoren spielen neben der Länge der Route eine wichtige Rolle bei der Routenwahl. Aufgrund dieser Erkenntnis entwickelten Duckham und Kulik (2003) wie auch Richter und Duckham (2008) einen Einfachster-Weg-Algorithmus. Duckham und Kulik (2003) zeigten, dass der einfachste Weg nur wenig länger ist als der kürzeste Weg, der mit dem Dijkstra-Algorithmus berechnet wird.

Das Ziel des Einfachster-Weg-Algorithmus ist es, die Komplexität einer Routenbeschreibung zu minimieren. Man soll einer Route mit möglichst wenigen Informationen folgen können. Je weniger Informationen für eine Route gebraucht werden, umso einfacher ist es, sich an die Beschreibung zu erinnern und umso wahrscheinlicher ist es, an einer Verzweigung den richtigen Weg zu wählen. Die Komplexität einer Routenbeschreibung wird minimiert, indem man die Anzahl und die Komplexität der passierenden Entscheidungspunkte minimiert (Duckham und Kulik 2003). Der Algorithmus von Richter und Duckham (2008) modelliert zusätzlich die Instruktionen für die berechnete Route und fasst diese zugleich zusammen (Richter und Duckham 2008).

Dem Einfachsten-Weg-Algorithmus liegt der Dijkstra-Algorithmus (Dijkstra 1959) zugrunde. Der Dijkstra-Algorithmus berechnet den kürzesten Weg. Beim kürzesten Weg dient grundsätzlich die euklidische Distanz als Gewichtungsfunktion, wohingegen beim einfachsten Weg die Gewichtungsfunktion an die Netzwerkstruktur gekoppelt ist und abhängig ist von der Komplexität der passierten Entscheidungspunkten. Die Anzahl Lücken in den Instruktionen, die für die Routenbeschreibung benötigt werden, dienen als Gewichtungsfunktion für den Algorithmus (Duckham und Kulik 2003).

Dazu wird jede Verzweigung kategorisiert und bekommt eine spezifische Anweisung mit Lücken. Diese Lücken können mit Informationen, die von der Route abhängig sind, gefüllt werden. Je komplexer die Verzweigung, desto mehr Instruktionen werden benötigt und umso höher ist das Gewicht dieser Verzweigung (siehe Abbildung 1). Die Anzahl Lücken, die mit Informationen gefüllt werden müssen, ist somit das Gewicht eines Kanten-Paars. Diese Gewichtungsfunktion ist übernommen von Mark (1986). Anders als beim Dijkstra-Algorithmus sind also beim Einfachster-Weg-Algorithmus die Gewichte mit Kantenpaaren assoziiert und nicht mit Kanten.

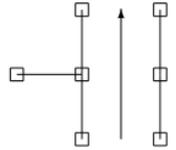
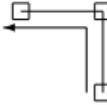
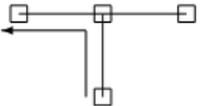
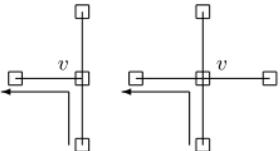
Gerade aus		1 Lücke
Krümmung (keine Kreuzung)		4 Lücken
Rechts- oder Links-Abbiegung bei einer T-Verzweigung		6 Lücken
Rechts- oder Links-Abbiegung bei einer anderen Verzweigung		5 + Anzahl(Kanten) Lücken

Abbildung 1: Gewichtung der verschiedenen Verzweigungstypen (übernommen von Mark 1986).

Der Algorithmus funktioniert mit einem Graphen, der die folgenden Eigenschaften aufweist (Duckham und Kulik 2003):

- Gerichtet (die Richtung der Kante ist massgeblich)
- Verbunden (von jedem Punkt aus existiert eine Verbindung zu jedem beliebigen Punkt im Graphen)
- Einfach (keine Kante, die als Start- und Endpunkt den gleichen Punkt hat und höchstens eine Kante zwischen zwei verschiedenen Knoten)

Funktionsweise des Algorithmus

Der Algorithmus 1 (siehe Abbildung 2) initialisiert zuerst für jede Kante, die mit dem Startpunkt verbunden ist, das Gewicht Null, da die Orientierung der ersten Kante keine Rolle spielen soll. Der Algorithmus iteriert nun durch alle Kanten und hält dabei die kumulative Instruktions-Komplexität möglichst tief. Bei jeder Iteration wird die Kante mit dem kleinsten Gewicht ausgewählt und die kumulative Instruktions-Komplexität von dieser Kante zu allen verbundenen Kanten erneut berechnet. Der Algorithmus iteriert so lange durch alle Kanten, bis alle Kanten besucht wurden (Duckham und Kulik 2003).

Die Funktion c_s im Algorithmus 1 speichert die Gewichte des Pfades von s zu jedem Zielpunkt. Um den einfachsten Pfad zu finden, muss nun die Kante mit dem kleinsten Gewicht gefunden werden. Der Einfachste-Weg wird dann durch Rückwärtsiteration durch die Kanten gefunden. Dabei wird bei jeder Iteration die Kante mit dem kleinsten Gewicht gewählt (Algorithmus 2 in Abbildung 3) (ebd.).

Als Input braucht der Algorithmus neben dem Graphen einen Startpunkt. Der Dijkstra-Algorithmus findet für jeden Eckpunkt im Graph den kürzesten Weg von diesem gegebenen Startpunkt, welcher auch als Ursprung bezeichnet werden kann. Des Weiteren braucht der Algorithmus eine Gewichtungsfunktion, welche die Kosten für das Passieren einer Kante berechnet und diese berechneten Kosten der entsprechenden Kante zuweist. Startend vom Ursprung wird nun jeweils diejenige Kante mit dem tiefsten Gewicht gewählt. Diese Kante wird dann als „besucht“ markiert. Dann wird überprüft, ob der neu gefundene Weg vom Ursprung zu dieser Kante „leichter“ ist als der vorherig berechnete (Richter und Duckham 2008).

Algorithm 1: Simplest path algorithm

Initial conditions: $G = (V, E)$ is a connected, simple, directed graph; $s \in V$ is the starting vertex; \mathcal{E} is the set of pairs of (directed) edges that share their “middle” vertex, $\mathcal{E} = \{(v_i, v_j), (v_j, v_k)\} \in E \times E$; $w : \mathcal{E} \rightarrow \mathbb{R}^+$ is the graph weighting function; $c_s : E \rightarrow \mathbb{R}^+$ stores the weights of the simplest path from s ; $S = \{\}$ is a set of visited edges.

```

Initialize  $c_s(e) = \infty$  for all  $e \in E$ 
for all  $(s, v_i) \in E$  do
  | set  $c_s(s, v_i) = 0$ 
while  $|E \setminus S| > 0$  do
  | Find  $e \in E \setminus S$  such that  $c_s(e)$  is minimized
  | Add  $e$  to  $S$ 
  | for all  $e' \in E \setminus S$  do
  |   | if  $(e, e') \in \mathcal{E}$  then
  |     | | set  $c_s(e') = \min(c_s(e'), c_s(e) + w(e, e'))$ 

```

Abbildung 2: Algorithmus 1 von Duckham und Kulik (2003).

Algorithm 2: Retrieving the simplest path using c_s (see also Algorithm 1)

Initial conditions: Weights c_s from simplest path algorithm (see Algorithm 1), starting vertex $s \in V$ and destination vertex $d \in V$.

```

Initialize  $t = d$ , path  $p = (t)$ 
while  $t \neq s$  do
  | Find  $(v_1, t) \in E$  such that  $c_s(v_1, t)$  is minimized
  | Prepend vertex  $v_1$  to path  $p$ 
  | Set  $t = v_1$ 

```

Abbildung 3: Algorithmus 2 von Duckham und Kulik (2003).

2.2.2 Zuverlässigster-Weg-Algorithmus

Navigationsgeräte sind mit GPS ausgestattet und erkennen daher relativ schnell, wenn der Nutzer auf dem falschen Weg ist und berechnen eine neue Route. Trotzdem wird relativ viel Zeit verloren, wenn man mal vom Weg abkommt und unnötige Strecken zurückgelegt.

In Gebäuden ist man hingegen seltener mit einem Navigationsgerät unterwegs, bzw. ist die GPS-Ortung im Gebäude ungenauer als die Ortung im freien Gelände. Daher ist eine zuverlässige Routenbeschreibung für die Indoor-Navigation umso wichtiger. Diese Routenbeschreibung soll möglichst wenig Fehler zulassen, wodurch sich der Nutzer weniger verläuft und daher weniger Zeit für die zurückgelegte Strecke braucht.

Einen zuverlässigen Routenbeschrieb kann praktisch nicht erreicht werden, denn die Sprache ist von sich aus schon ungenau und Aussagen können unterschiedlich interpretiert werden.

Betrachten wir die Aussage "biegen Sie bei der nächsten Kreuzung rechts ab". Diese Anweisung kann auf verschiedene Arten zu einer falschen Abzweigung führen (Westphal und Renz 2011):

- 1.) Bei der nächsten Abzweigung gibt es mehrere Strassen, welche rechts abbiegen. Der Nutzer weiss nicht, welche er nun wählen soll.
- 2.) Die Strasse macht eine Biegung nach rechts und der Nutzer interpretiert diese Kurve nicht als Abzweigung.
- 3.) Der Nutzer weiss nicht genau, welches die nächste Abzweigung ist. Vielleicht gibt es noch eine kleinere Abzweigung, die vorher kommt oder möglicherweise übersieht der Nutzer die Verzweigung.

Die Anweisungen „geradeaus“, „rechts“ und „links“ genügen nicht für eine gute Routenbeschreibung, diese Anweisungen müssen aufgrund von komplexen Verzweigungen präzisiert werden. Personen zeigen linguistische und konzeptionelle Probleme speziell mit Verzweigungen, die von der Norm abweichen. Je komplexer eine Verzweigung ist, desto ausführlicher muss eine entsprechende Beschreibung für das Passieren des Entscheidungspunktes sein. Bezieht man sich in der Routenbeschreibung auf die Strukturen der Umgebung oder modifiziert man die Beschreibung, um Zweideutigkeiten zu vermeiden, kann die Interpretationsgenauigkeit gesteigert werden. Somit nimmt der Umgang der Routenbeschreibung mit der Komplexität der Verzweigung zu (Haque et al. 2007).

Nutzer assoziieren zudem die Richtungen zwischen den Hauptachsen nicht mit einem einfachen linguistischen Ausdruck wie „rechts“ oder „links“. Daher lassen Beschreibungen von Richtungen, die nicht den Hauptachsen entsprechen einen grossen Spielraum offen. Der konzeptuelle Sektor für die beschriebene Richtung ist relativ gross (ebd).

Die Autoren Westphal und Renz (2011) gehen davon aus, dass das zuverlässige Erreichen des Ziels wichtiger ist als eine möglichst kurze Route zum Ziel. Zudem nehmen sie an, dass der Nutzer das Ziel mit einer zuverlässigen Routenbeschreibung schneller erreicht als mit der kürzesten Route, da sich der Nutzer weniger verläuft. Daher macht es Sinn, Routen zu berechnen, die einfach zu beschreiben sind (z.B. die gestrichelte Route in Abbildung 4) und dadurch eine grosse Zuverlässigkeit für das richtige Befolgen dieser Routenbeschreibungen gegeben ist.

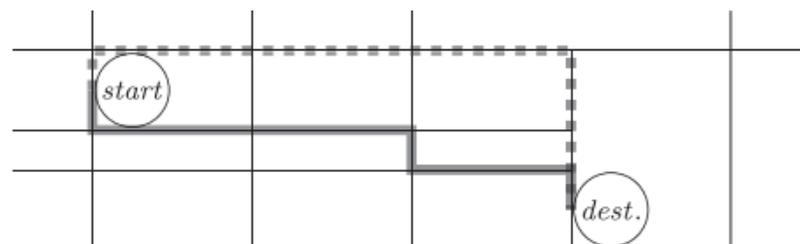


Abbildung 4: Ein Beispiel von zwei Routen mit den gleichen Start- und Endpunkten. Die gestrichelte Route ist einfacher zum Beschreiben und Befolgen, da weniger Anweisungen für Abzweigungen vorkommen (Westphal et al. 2011).

Der Algorithmus für den zuverlässigsten Weg fundiert auf dem Einfachsten-Weg-Algorithmus von Duckham und Kulik. Der Einfachste-Weg-Algorithmus basiert auf einer Klassifikation von Verzweigungen anhand von deren Komplexität, wobei jeder Verzweigung je ein Gewicht zugeordnet wurde (Haque et al. 2007). Beim Zuverlässigsten-Weg-Algorithmus hingegen berücksichtigt das Gewicht die Zweideutigkeit bei jeder Abzweigung. Das Gewicht r misst, wie viele weitere Linien als äquivalent zur Beschreibung betrachtet werden können e). Da es viele gleich zuverlässige Wege zwischen zwei Eckpunkten gibt, kann die metrische Länge eines Weges hinzugezogen werden (ebd).

Die Routen mit dem Zuverlässigsten-Weg-Algorithmus werden in 50% der Fälle mehr als 1.4 Mal so lang wie die kürzeste Route. Bei diesen Resultaten ging man jedoch davon aus, dass nur

Abbiegungswinkel von 0° als "geradeaus" wahrgenommen werden. Mit einer Lockerung dieses Grenzwertes auf einen Sektor von 26° (Abbildung 5) konnten die Resultate deutlich verbessert werden (Haque et al. 2007). Jemand, der dem zuverlässigsten Weg folgt, hat zwar eine kleinere Wahrscheinlichkeit, eine falsche Abzweigung zu nehmen, allerdings legt er im Schnitt einen längeren Weg zurück. Gemäss Golledge (1995) gehören jedoch die Faktoren Gesamtdistanz und Zeitaufwand zu den wichtigsten Faktoren für die Routenwahl. Daher macht es Sinn, beide Komponenten, diejenige der zuverlässigsten und diejenige der kürzesten Route zu kombinieren, um einen guten Algorithmus zu entwickeln (Haque et al. 2007).

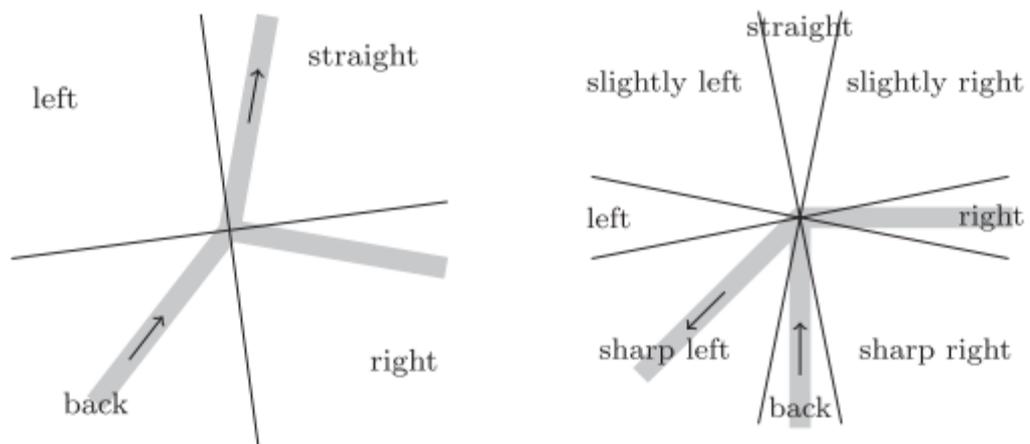


Abbildung 5: Relativ zur Bewegungsrichtung werden die abzweigenden Strassen anhand dieses Star-Schemas qualitativen Richtungsbeschreibungen zugeordnet (Westphal et al., 2011). Es können weniger detaillierte Schemen (links) oder detailliertere Schemen (rechts) verwendet werden.

Funktionsweise des Algorithmus

Der kürzeste Zuverlässigste-Weg-Algorithmus ist grundsätzlich eine Adaption von Dijkstras Kürzestem-Weg-Algorithmus. Somit muss der Graph, der als Input vorhanden sein muss, den gleichen Voraussetzungen entsprechen.

Der Algorithmus iteriert durch alle Linien, wobei die aufsummierte Unzuverlässigkeit vom Start minimal bleiben sollen. Die Unzuverlässigkeit einer Route ist die Summe der Unzuverlässigkeit aller Abzweigungen (Haque et al. 2007), wobei die Gewichtungsfunktion die Unzuverlässigkeit einer Abzweigung von einer Linie e auf die Linie e' folgendermassen berechnet:

$$r(e,e') = (\text{Anzahl Abzweigungen, die der gleichen Anweisung wie } e' \text{ folgt}) - 1$$

Das Gewicht wird also nicht einer Kante zugeordnet, sondern einer Abfolge von zwei Kanten.

Bei jeder Iteration wird jeder Linie die vorherige Linie als Vorgänger hinzugefügt. Diese Kette von Vorgängern lässt am Schluss den Pfad rekonstruieren. Der Algorithmus iteriert, bis eine Linie gewählt wird, die als Endpunkt das Ziel enthält (ebd.).

2.2.3 Kleinster-Gesamtdrehwinkel-Algorithmus

Winter (2002) beschreibt mehrere Algorithmen, die unter der Berücksichtigung von Abzweigungswinkeln Routen berechnen. Er betrachtet nicht nur verschiedene Abbiegungskonzepte von Fussgängern, sondern auch Einschränkungen im Fussgängerverkehr. Dabei hält er als eine wichtige Erkenntnis fest, dass für jede Abzweigung eine Anweisung gegeben werden muss und dadurch die Komplexität des Routenbeschreibs mit jeder Abzweigung zunimmt. Dadurch will der

Autor eine Route berechnen, die möglichst wenige Abzweigungen enthält, unabhängig davon, wie komplex die Abzweigung ist.

Winter hat mehrere Algorithmen entwickelt, die den Abbiegungswinkel berücksichtigen. Der relevanteste Algorithmus von Winter ist derjenige, der eine Route berechnet mit dem kleinsten Gesamtdrehwinkel, wobei alle Abbiegungswinkel auf einer Route aufsummiert werden. Es werden gerade Strecken bevorzugt, auch wenn dabei Abzweigungen passiert werden, denn ein Eckpunkt auf einer geraden Strecke wird nicht als Abzweigung wahrgenommen.

Somit würde der Algorithmus in einem rasterähnlichen Netzwerk, wie man es in grossen amerikanischen Städten kennt, eine Route wählen, die aus zwei langen Strecken besteht (Abbildung 6).

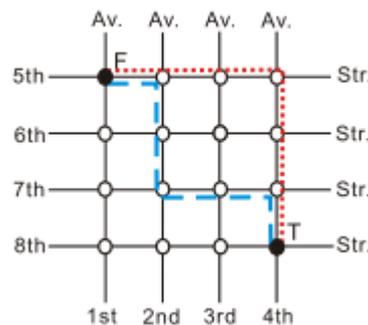


Abbildung 6: Die rote Route hat nur eine Abzweigung und einen totalen Abbiegungswinkel von 90° , während die blaue Route genau gleich lang ist, aber einen deutlich grösseren Gesamtdrehwinkel hat (Jiang und Liu 2010).

Dieser Algorithmus darf nicht mit dem Kompass-Routing, welches sich nicht durchgesetzt hat, verwechselt werden. Beim Kompass-Routing wird jeweils diejenige Kante gewählt, die den kleinsten Abweichungswinkel zum Ziel hat (Bose und Morin 1999). Diese Strategie wird auch Kleinst-Winkel-Algorithmus genannt und ist relativ anfällig für Fehler durch Anwender (Hochmair und Frank 2000). Der Kleinste-Gesamtdrehwinkel-Algorithmus betrachtet immer die Drehwinkel über die gesamte Route.

Funktionsweise des Algorithmus

Der Algorithmus iteriert durch alle Linien, wobei der aufsummierte Abbiegungswinkel minimal bleiben soll. Das Gewicht entspricht also dem Winkel einer Abzweigung und bezieht sich ebenfalls auf eine Abfolge von zwei Kanten und nicht nur auf eine Kante, wie es beim kürzesten Weg der Fall ist. Beim Passieren eines Punktes auf einer Geraden erhält der Entscheidungspunkt durch die Gewichtungsfunktion das Gewicht Null. Bei allen anderen Entscheidungspunkten, die auf der Route nicht auf einem geraden Abschnitt liegen, wird als Gewicht der Winkel zwischen der aktuellen Route und der geraden Linie betrachtet. Der Algorithmus versucht, die Summe all dieser Winkel so klein wie möglich zu halten (Winter 2002).

Bei jeder Iteration wird jeder Linie die vorherige Linie als Vorgänger hinzugefügt, was schlussendlich eine Kette von Pfadsegmenten ergibt, die den Pfad widerspiegeln.

2.2.4 Wenigste-Abbiegungen-Algorithmus

Der wenigste-Abbiegungen-Algorithmus von Jiang und Liu (2011) bezieht sich auf den Zusammenhang von natürlichen Strassen. Nicht jede Abzweigung wird auch als Entscheidungspunkt wahrgenommen, da die Route der vorhandenen Strasse folgt. In der Realität zusammenhängende Strassen können im Datensatz jedoch nicht einfach so erkannt werden. Es wird davon ausgegangen, dass Strassen durch einen Biegungswinkel von über 45° beendet werden. Solange also auf einer Route

die Biegungswinkel unter 45° liegen, wird davon ausgegangen, dass man sich weiterhin auf der aktuellen Strasse befindet. Die „natürlich“ vorhandene Strasse endet, sobald eine Wendung von über 45° ausgeführt werden muss und dieses Manöver somit mit einer Beschreibung angekündigt werden muss. Der Algorithmus versucht, in einem ersten Schritt die natürlich vorhandenen Strassen anhand von Abzweigungen mit einem Biegungswinkel von über 45° zu erkennen. Auf dieser Grundlage wird dann die kürzeste topologische Strecke gesucht. Es wird also angestrebt, dass der Fussgänger möglichst lange einer bestimmten Strasse folgt.

Bei rasterähnlichen Strassennetzwerken ist der Pfad, der mit dem Wenigste-Abbiegungen Algorithmus berechnet wurde, meistens relativ nahe am kürzesten Pfad. Je weiter jedoch das Netzwerk von diesem perfekten Raster abweicht, desto grösser wird der Längenunterschied zwischen dem kürzesten Pfad und dem Pfad mit den wenigsten Abbiegungen (Jiang und Liu 2010).

Winter (2002) hat ein ähnliches Konzept entwickelt. In einem ersten Versuch, zählte er alle Eckpunkte, die von einer Route passiert werden. Diese Anzahl Eckpunkte widerspiegeln das Gewicht der Route. Doch da nicht jeder Eckpunkt zwischen zwei Kanten als Abzweigung wahrgenommen wird, hat er sein Konzept verbessert. Der verbesserte Algorithmus zählt die Eckpunkte nur, falls der Winkel zwischen den beiden Strassensegmenten über einem bestimmten Schwellenwert liegt und somit die natürliche Strassenführung endet. Der Algorithmus versucht also die Anzahl Abzweigungen mit einem Winkel über dem Schwellenwert minimal zu halten. Dieser Schwellenwert muss jedoch für jedes Netzwerk neu eruiert werden.

Funktionsweise des Algorithmus

Der Algorithmus besteht aus drei sequentiell ablaufenden Funktionen. Die erste Funktion betrachtet ein Konnektivitätsdiagramm, um zu untersuchen, welche Strassen miteinander verbunden sind. Auf dieser Grundlage wird die kürzeste topologische Distanz berechnet, welche als Variable für die zweite Funktion dient. Die zweite Funktion eruiert nämlich alle Pfade mit der kürzesten topologischen Distanz. Normalerweise gibt es mehrere Wege mit der gleichen kürzesten Distanz. Deshalb wird abschliessend noch die dritte Funktion angewandt, welche aus den Pfaden mit den kürzesten topologischen Distanzen denjenigen Pfad mit der kürzesten geometrischen Länge auswählt (Jiang und Liu 2010).

2.2.5 Weitere Algorithmen

Es gibt weitere Algorithmen, die Routen für die Outdoor-Navigation berechnen. Diese werden hier jedoch nicht weiter beschrieben.

Ein Beispiel für einen weiteren Algorithmus ist derjenige von Huang et al. (2014) und Schmid (2008). Beide entwickelten Algorithmen, die personalisierte Routen berechnen. Dabei werden die zuvor aufgezeichneten Gefühle gegenüber gewissen Umgebungen miteinbezogen. Die Ermittlung dieser affektbetonten Reaktionen ist jedoch sehr aufwändig und zeitintensiv. Somit ist die Gewichtungsfunktion nicht auf objektiven Faktoren basierend, sondern muss für jede neue Umgebung neu bestimmt werden. Deshalb wird dieser Algorithmus nicht weiter betrachtet.

2.3 Verhalten bei der Routenwahl in der Indoor-Navigation

Aktuelle Indoor-Navigationssysteme bieten den Nutzern die schnellsten oder die kürzesten Routen an. Doch wie mehrere Autoren gezeigt haben, werden in Gebäuden selten diese Strategien angewandt.

Butler et al. (1993) haben untersucht, wie man Personen, die zum ersten Mal in einem bestimmten komplexen Gebäude sind, dabei unterstützen kann, Räume zu finden. Sie untersuchten verschiedene Routen, die sich anhand der folgenden Variablen unterscheiden: Distanz, Anzahl Treppen, Liftbenutzung, Route führt nicht nach draussen, Anzahl Abzweigungen, Anzahl Entscheidungspunkte und benötigte Infos für die Wegbeschreibung (Butler et al. 1993). Sie stellten fest, dass die Probanden Routen mit kurzer Distanz und solche mit Fahrstühlen bevorzugen. Hingegen werden Routen, die nach draussen führen, vermieden (ebd.).

Hölscher et al. (2005, 2006) erforschten die Strategien zur Routenwahl in dreidimensionalen Umgebungen wie Gebäuden. Basierend auf Strategien von der Outdoor-Routenfindung haben sie drei verschiedene Strategien für Indoor-Umgebungen beschrieben:

- Zentrums-Strategie (den bekannten Teilen des Gebäudes folgen)
- Richtungs-Strategie (direkt Richtung Ziel steuern, wobei horizontale Routen gewählt werden)
- Stockwerk-Strategie (zuerst das richtige Stockwerk finden und erst dann auf das Ziel fokussieren).

Diese Strategien gehen davon aus, dass man sich im Gebäude bereits ein wenig auskennt. Zudem ist die gewählte Strategie abhängig von der Art des Gebäudes, der Aufgabe und der Instruktionen für die Routenfindung (Hölscher et al. 2009).

Bei der Zentrums-Strategie folgen die Probanden ihnen bekannten Subrouten. Dadurch haben sie eine hohe Laufgeschwindigkeit und verlaufen sich selten. Doch diese Routen sind einiges länger als die Routen mit anderen Strategien und es dauert dadurch länger, bis die Probanden am Ziel ankommen (Hölscher et al. 2006). Personen, die sich noch nicht oft in einem bestimmten Gebäude aufgehalten haben, wählen meistens die Zentrums-Strategie (Hölscher et al. 2005).

Die Richtungs-Strategie ist mit der Least-Angle-Strategie der Outdoor-Navigation verwandt (Hölscher et al. 2005 und Hölscher et al. 2006). Hochmair und Frank (2000) und Conroy Dalton (2003) haben die Least-Angle-Strategie folgendermassen umschrieben: Menschen versuchen, die globale Abweichung von der Richtung zum Zielpunkt zu minimieren und gleichzeitig vermeiden sie lokale Richtungsabweichungen bei Verzweigungen. Dadurch wird, wo immer möglich, ein direkter Kurs Richtung Ziel beibehalten und eine horizontale Route gewählt.

Mit der Richtungs-Strategie verlaufen sich die Probanden öfters, wobei die Neuorientierung viel Zeit kostet. Die zurückgelegten Distanzen mit der Richtungs-Strategie sind allerdings kürzer als die zurückgelegten Distanzen mit der Zentrums-Strategie (Hölscher et al. 2006).

Die Strategie wird sowohl von Personen, die sich noch nicht oft in einem bestimmten Gebäude aufgehalten haben, wie auch von Personen, die sich gut auskennen im Gebäude, gewählt (Hölscher et al. 2005). Bei einer Studie von Conroy Dalton (2003) wählten Probanden die Richtungs-Strategie am häufigsten. Dies stützt auch die Hypothese von Hillier (1997), in welcher er behauptet, dass man der längsten Blicklinie, die ungefähr Richtung Ziel zeigt, wählt.

Menschen speichern die verschiedenen Stockwerke eines Gebäudes separat im Gedächtnis und konstruieren nicht ein 3D-Modell des Gebäudes. Dies erschwert die Navigation in Gebäuden, welche die vertikalen und die horizontalen Aspekte berücksichtigt. Die Stockwerk-Strategie umgeht dieses Problem mit einer hierarchischen Routenplanungsheuristik: Zuerst wechselt man in das Stockwerk des Zielpunktes und sobald man sich dort befindet, wird die weitere Routenplanung auf einen zweidimensionalen Raum reduziert (Hölscher et al. 2005).

Die Personen, die ein Gebäude schon sehr gut kennen, wählen eine schon bekannte schnelle oder kurze Route oder bevorzugen die Stockwerk-Strategie. Die Stockwerk-Strategie, die aber nicht nur von „Experten“ genutzt wird, zeigte bei Hölscher et al. (2006) die beste Performance in Bezug auf Dauer und Routenlänge.

Im Falle eines Gebäudekomplexes mit mehreren Gebäuden zahlt es sich aus, zuerst in den richtigen Teil des Gebäudekomplexes zu gehen, bevor man in das richtige Stockwerk wechselt. Dies entspricht nicht ganz der Stockwerkstrategie, wobei aber ebenfalls eine hierarchische Herangehensweise angewandt wird (Hölscher et al. 2009).

Bei der Outdoor-Navigation spielen Orientierungspunkte eine wichtige Rolle. Diese wichtige Rolle konnte bei der Indoor-Navigation nicht nachgewiesen werden (Lorenz et al. 2006). Orientierungspunkte werden bei der Indoor-Navigation zudem wenig gebraucht, da die Nutzung in Gebäuden oft wechselt und die Daten der Orientierungspunkte ständig aktuell gehalten werden müssten (Schougaard et al. 2012).

2.4 Algorithmen für die Indoor-Routenplanung

In der Indoor-Navigation gibt es schon einige wenige Routenplanungs-Algorithmen, welche Routen generieren. Die populärsten Algorithmen sind diejenigen, welche die kürzeste oder die schnellste Route berechnen. Allerdings sind diese berechneten Routen nicht optimal für die Wegfindung (Yuan und Schneider 2010), es gibt da also noch Verbesserungspotential.

Ein wichtiger, schon implementierter Algorithmus für die Indoor-Navigation ist derjenige, der barrierefreie Routen für Menschen mit besonderen Bedürfnissen berechnet (Karimi & Ghafourian 2010 und Dudas et al. 2009). Dieser Routing-Algorithmus bereinigt zuerst den Graphen des Netzwerkes in Abhängigkeit von der Art der Beeinträchtigung. Sind vorerst alle Segmente und Punkte gelöscht, die der Nutzer nicht passieren kann, wird mithilfe von Dijkstras Algorithmus der komfortabelste Weg berechnet. Die Gewichtungsfunktion ist abhängig von den Vorlieben des Nutzers und weist jeder einzelnen Linie ein Gewicht zu (Dudas et al. 2009). Der Ansatz von Karimi und Ghafourian (2010) ist relativ ähnlich. Falls sich der Start- und der Zielpunkt auf der gleichen Etage befinden, wird mit dem Dijkstra-Algorithmus der Pfad berechnet. Ansonsten wird ein vertikales Element gesucht, das für den Nutzer zugänglich ist und die verschiedenen Stockwerke verbindet. Es werden dann zwei Sub-Pfade berechnet, ein Pfad vom Startpunkt bis zum vertikalen Pfadsegment und ein Pfad vom vertikalen Pfadsegment bis zum Zielpunkt. Diese Segmente werden dann verbunden (Karimi und Ghafourian 2010).

Ein weiterer Algorithmus im Indoor-Bereich ist der Door-to-Door-Ansatz, welcher das natürliche Gehverhalten berücksichtigt und keine unnatürlichen Routen generiert. Unnatürliche Routen werden oft auf grossen Plätzen oder Räumen generiert, wobei die Route z.B. entlang den Wänden geht, was nicht dem natürlichen Verhalten von Fussgängern entspricht. Der Door-to-Door-Algorithmus generiert Routen-Segmente von einer Tür zur nächsten sichtbaren Türe. Dadurch entstehen sehr effiziente Routen für Evakuationsszenarien (Liu & Zlatanova 2011).

Wie man sehen kann, gibt es für die Outdoor-Navigation viel mehr verschiedene Algorithmen, die verschiedene Routen berechnen als für die Indoor-Navigation. Mit den aktuell vorhandenen Indoor-Algorithmen werden die verschiedenen Kriterien, nach denen die Nutzer eine Route wählen, nicht abgedeckt. Das zeigt den Bedarf an Forschung zur Entwicklung einer breiteren Auswahl an Indoor-Routenplanungsalgorithmen.

2.5 Indoor-Netzwerkmodelle

Die meisten Routenberechnungs-Algorithmen brauchen als Input einen Graphen des Netzwerkes des Gebäudes, wobei alle vorgestellten Algorithmen auf einen Graphen zurückgreifen, welcher auf dem Link-Node-Modell basiert, was in der Navigation das meistverbreitete Modell ist (Gilliéron et al. 2004). Daher fokussieren die nachfolgend vorgestellten Netzwerkmodelle auf einer Link-Node-Struktur und sind an sich verschiedene Repräsentationen eines Netzwerkes (Li et al. 2010). Wie genau aber die Elemente des Gebäudes abgebildet werden und wo die Punkte und die Kanten gesetzt werden, ist abhängig vom Netzwerkmodell. Einige Beispiele davon werden im Folgenden nach der Einführung in die Grundlagen vorgestellt.

Äquivalenzen Outdoor- und Indoor-Netzwerke

Fussgänger können sich innerhalb von Gebäuden frei bewegen. Die Bewegungen sind weniger eingeschränkt als die Bewegungen von Fahrzeugen auf Strassen (Stoffel et al. 2007). Es gibt vergleichbare Konzepte im Indoor- und Outdoor-Bereich, z.B. sind Korridore mit Strassen vergleichbar. Doch im Indoor-Bereich gibt es Räume, die im Outdoor-Bereich kein Äquivalent haben, wie z.B. grosse offene Räume. Es ist schwer, Netzwerke für Indoor-Pfade zu generieren, da die Routenwahl einer Person in einem grossen Raum nicht an eine einzige Linie festgemacht werden kann (Yuan und Schneider 2010).

Eine "Laufzone" oder Freifläche ist ein Gebiet, in dem Fussgänger freien Zugang haben und nicht bestimmten Pfaden folgen. Beispiele dafür sind grosse Eingangshallen, Treffpunkte, Foyers oder grosse Säale. Diese Eigenschaft unterscheidet ein Fussgängernetzwerk von einem Strassennetzwerk (Zheng et al. 2009).

Die Link-Node-Struktur (LNS) als Grundlage

Mehrere Autoren brauchen die Link-Node-Struktur als Grundlage ihres Netzwerkmodells, da es sehr gut geeignet ist für die Navigation (z.B. Gilliéron et al. 2004, Li et al. 2010, Becker et al. 2009, Lee und Kwan 2005). Grundsätzlich kann die Link-Node-Struktur folgendermassen zusammengefasst werden: Räume werden als Punkte dargestellt und Beziehungen zwischen den Räumen als Kanten (Liu und Zlatanov 2012).

Normalerweise wird die Link-Node-Struktur für Netzwerke in der Ebene (2D) verwendet. Doch durch das Hinzufügen der Höhe als dritte Dimension zu den Punkten, kann diese Struktur auch in 3D-Umgebungen gebraucht werden. Die dritte Koordinate jedes Punktes ist die Höhe des Stockwerkes, auf dem sich der Punkt befindet. Aufzüge und Treppen werden durch vertikale Kanten dargestellt (Gilliéron et al. 2004 und Meijers et al. 2005).

Jede Kante hat zwei Punkte (Start- und Endpunkt), welche Koordinaten und eine Höhe haben. Die Punkte und auch die Kanten können weitere Attribute wie die Art des repräsentierten Objektes, die Zugangsberechtigung oder die Länge enthalten (Gilliéron et al. 2004).

Kombinatorisches vs. geometrisches Netzwerk

Eine Netzwerkstruktur heisst Link-Node-Struktur (LNS). Es ist die Basis des 3D-Topologischen-Datenmodells, das auch kombinatorisches Datenmodell (CDM) genannt wird.

Es gibt 3 Basiselemente, die es für die Herleitung des LNS braucht (Lee und Kwan 2005):

- Poincare
- Graphentheoretischer Formalismus
- Hierarchische Netzwerkstruktur

Das kombinatorische Datenmodell in Abbildung 7 repräsentiert die topografische Beziehung zwischen 3D-Objekten mithilfe eines dualen Graphen. Das Modell basiert auf einer LNS. LNS-Modelle und 3D-Netzwerkmodelle sind CDMs und definieren die räumliche Organisation von Gebäuden.

Das CDM ist ein logisches Datenmodell, welches als reiner Graph betrachtet werden kann, welcher aber nur Beziehungen der Raumelemente repräsentiert, ohne etwas über die geometrischen Eigenschaften dieser Objekte auszusagen. Für viele Aufgaben wird jedoch ein geometrisches Netzwerkmodell gebraucht (GNM), welches die geometrischen Eigenschaften beinhaltet (Lee 2004).

Das geometrische Netzwerkmodell, zu sehen in Abbildung 7, ist eine Transformation des kombinatorischen Datenmodells. Das GNM repräsentiert die Konnektivitätsbeziehung zwischen 3D-Objekten unter Verwendung eines dualen Graphen (ebd.).

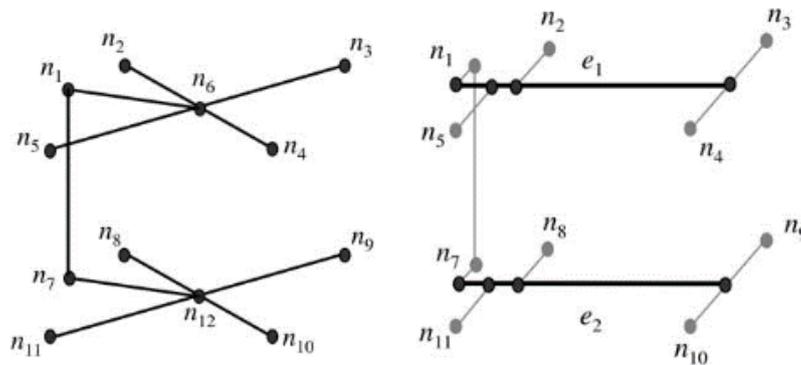


Abbildung 7: Kombinatorisches Netzwerk (links) und geometrisches Netzwerk (rechts) (Lee 2004).

Poincaré-Dualität

Für die Transformation von 3D- oder 2D-Objekten in topologische Beziehungen wird die Poincaré-Dualität gebraucht. Dabei wird jedem Polygon ein dualer Punkt zugeordnet. Falls die Polygone nebeneinanderliegen, das heisst, sie teilen sich eine Kante, dann werden die entsprechenden Punkte mit einer dualen Kante verbunden. Das Ganze funktioniert auch im dreidimensionalen Raum. Dort wird für ein 3D-Objekt ein Punkt gesetzt. Die topologischen Beziehungen zwischen den 3D-Objekten werden ebenfalls durch Kanten dargestellt (Lee und Kwan 2005).

Es gibt folgende Vorteile beim Gebrauch der Poincaré-Dualität:

- alle topologischen Eigenschaften werden unter der Dualitäts-Transformation gewahrt
- die topologische Konsistenz im 3D-Datenmodell wird effektiv beibehalten
- topologische Beziehungen unter 3D-Objekten können im dualen Raum mit Ecken und Kanten dargestellt werden

Zudem wird die Recheneffizienz und der benötigte Speicherplatz verbessert, da nicht direkt mit 3D-Objekten hantiert wird und somit keine komplexen geometrischen Berechnungen ausgeführt werden müssen (ebd.).

Hierarchische Netzwerkstruktur

Eine hierarchische Netzwerkstruktur wird oft in Transportnetzwerken verwendet. Dabei gehören z.B. Autobahnen zu Strassen einer höheren Ebene und Quartierstrassen zu einer tieferen Ebene.

Ähnlich kann auch ein Netzwerk in einem Gebäude dargestellt werden. Auf der höchsten Ebene befinden sich die Stockwerke, welche durch Punkte des ersten Levels dargestellt werden und Verbindungen wie z.B. Treppen zwischen den Stockwerken durch Kanten der ersten Ebene repräsentiert werden.

Zu einem Eckpunkt der ersten Ebene, welche ein Stockwerk repräsentiert, wird ein Netzwerk der zweiten Ebene zugeordnet. In diesem Netzwerk der zweiten Ebene wird das Stockwerk mit den Korridoren und Räumen repräsentiert. Das Netzwerk der dritten Ebene kann dann eine Raumeinheit repräsentieren und ist an einen Punkt der zweiten Ebene geknüpft. Diese Struktur macht Abfragen in einem Gebäude-Modell einiges schneller (Lee und Kwan 2005).

Für einen hierarchischen Graph werden gewisse Punkte des Graphs auf dem Level n als Schnittstellenknoten zu einem Graphen des Levels $n+1$ klassifiziert. Tatsächlich sind diese Schnittstellenknoten Zugangspunkte zu Treppen, Türen und Aufzügen. Jedem Graph wird also ein Level in der Hierarchie und ein Identifikator zugeordnet. Punkte eines Graphen des Levels n haben nun als Punkt-Label den Identifikator des Graphen des Levels $n-1$. An einer Universität kann es z.B. die Levels Gebäude, Stockwerk und Flügel geben (Lorenz et al. 2006).

Gebäude sind natürlicherweise in Stockwerke, Sektionen, Räume, usw. gegliedert. Diese Semantik und die daraus abzuleitende Relation kann zusätzlich abgespeichert werden, um einen planaren Graphen in einen hierarchischen Graphen zu erweitern (Stoffel et al. 2007).

Semantik

Neben dem räumlichen Netzwerkmodell können semantische Informationen, welche in Attributen gespeichert werden können, als Metadaten zum Netzwerkmodell hinzugefügt werden. Diese Informationen sind je nach Applikation, die anschliessend die Daten verwertet, sehr wichtig und hilfreich.

Beispiele dafür sind die Folgenden:

- Türen: Zugang (Zugang benötigt Rechte, Zugang gesperrt, Zugang offen), Zugangszeiten (Öffnungszeiten, immer offen, unbestimmte Öffnungszeiten)
- Zugangsrechte für Räume (Staff only, Labormitarbeiter, ...)
- Notausgänge

Solche semantischen Informationen sind wichtig für personenbezogene Routenberechnungen. Ein Rollstuhlfahrer nutzt beispielsweise nur Aufzüge, aber keine Treppen (Stoffel et al. 2007). Zudem kann man dadurch Beschreibungen generieren, die gut verstanden werden (Lorenz et al. 2006).

Jedem Pfadsegment und Zugangspunkt kann das Attribut "Zugänglichkeit" zugewiesen werden. Denn auch wenn ein Pfadsegment möglicherweise nicht zugänglich ist, können die Zugangspunkte zum Segment trotzdem zugänglich sein (Yuan und Schneider 2010). Es gibt zwei Arten von Objekten, die den Zugang regeln. Die eine Art ist diejenige, die keinen Zugang gewähren (z.B. Wände). Die andere Art gewährt Zugänge auf verschiedenen Stufen: Voll (Türen), semi (mit Einschränkung, z.B. Schlüssel) oder limitiert (normalerweise nicht als Durchgang gebraucht, z.B. Notausgänge oder Fenster) (Meijers et al. 2005). Zusätzlich zu diesem Attribut der Zugänglichkeit kann auch noch ein Zeitstempel gespeichert, falls die Zugänglichkeit nur zu gewissen Zeiten gilt (Yuan und Schneider 2010).

Kombinationen von Netzwerkmodellen

Es ist möglich, verschiedene Modelle miteinander zu kombinieren (Meijers et al. 2005 und Zheng et al. 2009).

Für das Netzwerkmodell für Evakuierungsroutenberechnungen von Meijers et al. (2005) wurden zwei verschiedene Strukturen verwendet, ein geometrisches Modell und ein Graphen-Modell. Das geometrische Modell wurde genutzt, um Koordinaten der Polygone zu extrahieren für die 3D-Visualisierung. Das Graphen-Modell wurde für den Routen-Algorithmus gebraucht. Des Weiteren haben die Autoren auch noch eine semantische Klassifikationen für die Routenberechnung gebraucht (Meijers et al. 2005).

2.5.1 Korridor-Herleitung: Korridor-Netzwerkmodell

Grundidee

Korridore sind wichtige Elemente einer Gebäudestruktur. Das breit akzeptierte IndoorGML-Modell basiert auf einem Netzwerkmodell, das auf der Korridor-Herleitung basiert (Vanloooster et al. 2016), was der Korridor-Herleitung eine besondere Wichtigkeit gibt.

Die Korridor-Herleitung bezieht sich auf das Strassennetzwerk, was eine realistische Navigation ermöglicht. Bei einem Strassennetzwerk werden die Verzweigungen als Punkte dargestellt und die Strassen dazwischen als Kanten. Beim Korridor-Modell werden nun die Korridore als Kanten und Verzweigungen als Punkte dargestellt. Daher handelt es sich bei diesem Netzwerkmodell um ein geometrisches Netzwerk-Modell. Zusätzlich werden die Türen senkrecht auf die Korridorlinie projiziert und ebenfalls als Punkte dargestellt (Sato et al. 2009 und Lee 2004). Eine Skizze dieses Modells ist in der Abbildung 8 zu sehen.

Auch wenn mathematische Algorithmen für die Berechnung der Korridore existieren (Lee 2004), ist es sehr schwierig zu definieren, was ein Korridor ist. Meistens müssen sogar die Korridore manuell gewählt werden. Vor allem in komplexen Gebäuden, in welchen es gerade von Vorteil ist, ein Indoor-Navigationssystem zu haben, ist es sehr schwierig, Korridore zu definieren. Sobald aber ein Korridor definiert ist, können weit verbreitete Algorithmen verwendet werden, um die Mittelachsen zu generieren.

Es ist auch möglich, Räume und Korridore als Punkte darzustellen (auch mehrere Punkte pro Raum/Korridor möglich). Die Verbindungen zwischen diesen Einheiten werden als Kanten dargestellt. Dann ist das Modell allerdings kein geometrisches Netzwerk-Modell mehr (Lorenz et al. 2006).

Diese Darstellungsmethode, bei welcher der Korridor als Punkt dargestellt ist, ist allerdings etwas umstritten. Meijers et al. (2005) haben festgestellt, dass die Verbindungs-Sektion nicht als Punkt dargestellt werden sollte, sondern besser mit Kanten und Punkten. Denn die Kanten können sich mit Wänden schneiden und dadurch nicht den tatsächlichen Weg repräsentieren. Zudem ist es unwahrscheinlich, dass man zuerst ins Zentrum eines Korridors läuft und erst dann in den nächsten Raum geht. Deshalb wird die Darstellung von Korridoren durch Punkte nicht weiter beleuchtet.

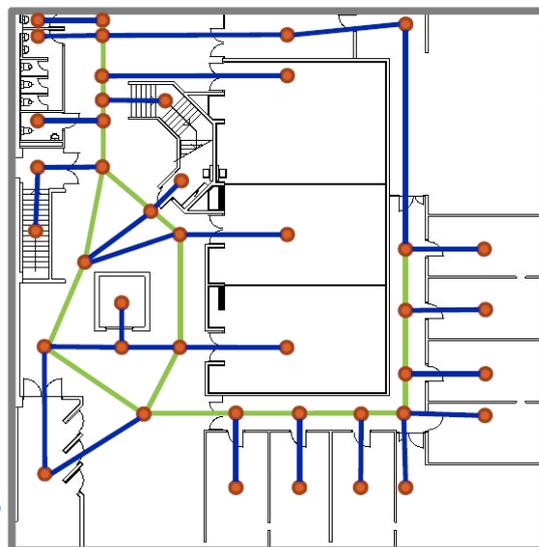


Abbildung 8: Die abstrahierte Darstellung eines Netzwerkes (blau, rot) basierend auf dem Korridor-Modell mit den verwendeten Korridoren (grün).

Erzeugung des Graphen

Es ist schwierig, die Korridore automatisch herzuleiten (Sato et al. 2009). Es gibt aber viele verschiedene Methoden, wie die Korridore abgeleitet werden können. Die Methode muss auch aufgrund der vorhandenen Daten ausgewählt werden.

Die erste Methode ist die Mittelachsentransformation (MAT), auch Skeletonisierung genannt, und eignet sich für alle Formen von Korridoren. Die Mittelachse eines Polygons $M(G)$ ist die Punktmenge innerhalb des Polygons, sodass es mindestens zwei Punkte auf dem Polygonrand gibt, welche die gleiche Distanz zur Punktmenge haben und die am nächsten zur Punktmenge sind (Lee 2004). Anders ausgedrückt ist die Mittelachse die Linie, die alle Punkte verbindet, welche einen Mittelpunkt von Kreisen, die vollständig innerhalb des Korridors liegen, repräsentieren. Dadurch wird gewährleistet, dass die Linie vollständig im Korridor liegt, auch wenn dieser z.B. konvex ist. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass die Kanten des Graphen generell eher "kurvig" sind und nicht gerade (Meijers et al. 2005).

Die zweite Methode berücksichtigt die Form von Korridoren und eignet sich besonders gut für typische Korridore. Korridore haben ein relativ grosses Seitenverhältnis, die Länge ist viel grösser als die Breite. Diese Methode besteht darin, die Mittelachse des Korridors abzuschätzen, wobei die Standorte von Türen ebenfalls berücksichtigt werden. Bei jeder Tür wird ein Punkt gesetzt. Dazu wird die Mitte der Tür bestimmt und dann senkrecht zur Tür einen Schritt in den Korridor gemacht (1 Meter), wo der Punkt abgesetzt wird. Die Punkte werden mit einer approximierten Linie annähernd verbunden. Die Punkte werden dann orthogonal auf diese Linie projiziert. Es kann sein, dass die so konstruierte Zentrumslinie ausserhalb des Korridors liegt (ebd.).

Die dritte Methode versichert, dass alle Kanten im Korridor sind. Dazu werden wieder Punkte einen Meter innerhalb des Korridors vor jeder Tür berechnet. Als nächstes wird die konvexe Hülle der Punkte berechnet. Die zwei Punkte, die am weitesten auseinander liegen, bilden die Mittellinie. Alle anderen Punkte werden auf die Zentrumslinie projiziert. Alternativ kann man auch den ganzen Graphen berechnen, in dem man jeden Punkt mit jedem Punkt verbindet. Somit ist jeder Punkt mit seinem nächsten Punkt verbunden (ebd.).

Handhabung von Korridoren, Freiflächen und Treppen

Korridore werden durch dieses Netzwerkmodell mit der Mittelachse sehr realistisch dargestellt, weshalb auch keine abweichenden Methoden für die Erzeugung des Netzwerkes genannt werden.

Auch auf Freiflächen kann die Mittelachsentransformation theoretisch angewandt werden. Allerdings ist die Mittelachsentransformation für die Erzeugung des Netzwerkes auf Freiflächen nicht geeignet (Xu et al. 2016), da nicht der ganze Raum erschlossen wird (Kruminaite 2014). Auf die Darstellung von Treppen wird nicht speziell eingegangen.

2.5.2 Aufteilung in Zellen und Polygone: Zell-Netzwerkmodell

Grundidee

Sato et al. (2009) und Lorenz et al. (2006) haben ein Netzwerkmodell entwickelt, in dem die kleinste Einheit eines Gebäudes als Zelle repräsentiert wird und der Graph auf den Zellen und ihrer relativen Lage basiert. Gerade bei grossen Räumen kann eine Einteilung in Zellen Sinn machen, da grosse Räume eine untergeordnete Struktur haben können, die sich z.B. durch die unterschiedliche Nutzung bemerkbar machen lässt. Ein Beispiel einer Freifläche mit unterschiedlichen Nutzungen ist in der Abbildung 9 zu sehen. Auf dem Plan in der Abbildung 10 sind diese unterschiedlichen Nutzungen in einem Plan dargestellt. Die Flächen zwischen diesen Nutzungen werden zum Transferieren genutzt.



Abbildung 9: Die Cafeteria mit den unterschiedlichen Nutzungen.

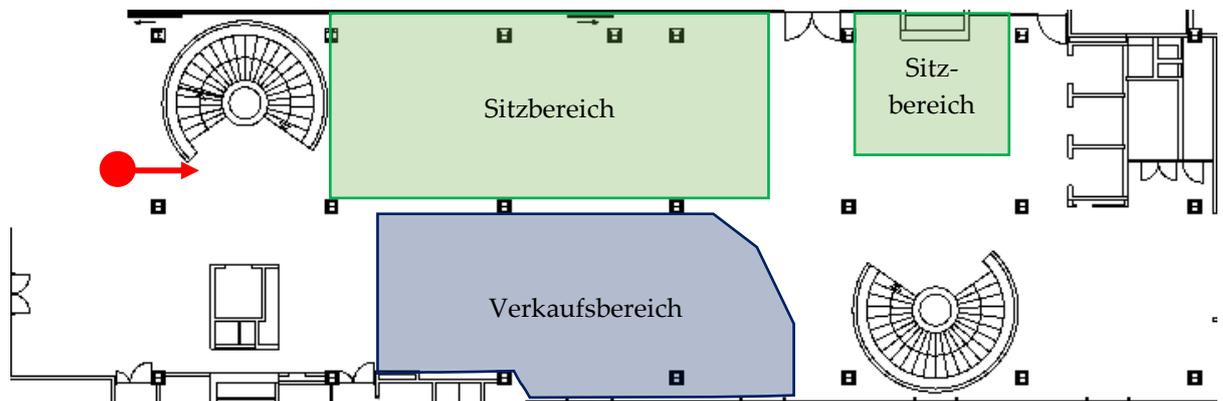


Abbildung 10: Unterschiedliche Nutzungen einer Freifläche, wie z.B. Flächen mit Sitzmöglichkeiten (grün) oder der Verkaufsbereich der Cafeteria (blau). Die restliche Fläche wird zum Transferieren gebraucht. In rot ist die Aufnahmeposition der Abbildung 9 zu sehen.

Grundsätzlich stellt jeder normale Raum eine Zelle dar. Eine einfache Zelle ist demnach durch Wände begrenzt und hat nur einen Zugangspunkt, wie z.B. eine Türe. Diese Zelle kann also nur als Start- oder Zielpunkt einer Route verwendet werden (Yuan und Schneider 2010).

Grössere Räume, wie Korridore, Freiflächen oder anders genutzte Räume können in Zellen unterteilt werden. Diese Zellen überlappen sich nicht und sind disjunkt. Die Zellen werden als Punkt dargestellt und mit einer Kante verbunden, falls sie nebeneinander liegen (Lorenz et al. 2006). Gründe für eine Aufteilung von grösseren Flächen in Zellen sind die Grösse des Raumes, Konkavität und Wölbung des Raumes oder verschiedene Funktionalitäten von bestimmten Bereichen auf einer grösseren Freifläche (ebd.). Es gibt aber keinen offensichtlichen Weg, um die Zellaufteilung zu automatisieren. Dazu muss man die Verwendung oder die semantische Bedeutung eines Bereiches der Freifläche kennen, was nicht immer aus Daten herauslesbar ist (ebd.).

Solche Zellen, die durch eine Unterteilung einer übergeordneten Raumstruktur entstehen, können in zwei Kategorien eingeteilt werden: Komplexe und offene Zellen. Eine komplexe Zelle ist eine Zelle, die durch Wände begrenzt ist und mehrere Zugangspunkte hat. Diese Zelle kann also als Start- oder Zielpunkt verwendet werden, kann aber auch Segmente eines Pfades enthalten (Yuan und Schneider 2010). Offene Zellen sind nicht explizit durch Wände abgegrenzt und haben grossräumige Zugänge (ebd.).

Erzeugung des Graphen

Es gibt verschiedene Arten, wo Punkte und Kanten gesetzt werden sollen:

Das Modell von Sato et al. (2009) fokussiert auf die Zentrumsunkte jedes Raumes. Knotenpunkte werden in allen Räumen im Zentrum gesetzt. Zudem gibt es weitere Knotenpunkte an Stellen, welche die Räume verbinden (Türen). Die Kanten verbinden die Punkte, welche topologisch miteinander zusammenhängen. Der Vorteil dieser Methode ist, dass praktisch alle Punkte und Kanten automatisch aus dem GIS extrahiert werden können, falls die Geometrien im GIS abgespeichert sind. Ein Nachteil dieses Modells ist die Einteilung von Freiflächen in Zellen, sowie die grosse Anzahl an Knotenpunkten und Kanten (Sato et al. 2009).

Lorenz et al. (2006) wendet eine andere Vorgehensweise an, deren Resultat in Abbildung 11 zu sehen ist. Bereiche in Gebäuden werden in Zellen unterteilt. Räume, die nicht weiter in Zellen unterteilt werden, werden als Punkte dargestellt. Türen und andere Durchgänge, welche die Möglichkeit bieten, von einer Zelle in eine andere zu transformieren, werden als Kante dargestellt (Lorenz et al. 2006).

Handhabung von Korridoren, Freiflächen und Treppen

Es gibt unterschiedliche Arten, wie die Korridore gehandhabt werden. Die erste Möglichkeit ist, Korridore so in Zellen zu unterteilen, dass jeder Zugang zum Korridor mit einer Zelle assoziiert werden kann. Nebeneinanderliegende Korridorzellen werden aufgrund der Topologie durch Kanten verbunden. Diese Handhabung genügt völlig für Routenberechnungen, allerdings ist die Datenstruktur speicherintensiv (Lorenz et al. 2006). Die andere Möglichkeit ist, einen Korridor durch eine einzige Zelle und damit durch einen Punkt darzustellen. Dabei muss aber gespeichert werden, welche Räume/Treppen sich links/rechts/hinten/vorne befinden, um geeignete Routenanweisungen zu generieren (ebd.).

Auch bei den Freiflächen gibt es keine allgemeingültige Regel, wie die Raumstruktur in das Netzwerkmodell übertragen wird.

Die erste Art der Zellerzeugung ist, eine grosse Fläche nach ihrer Nutzung in Zellen zu unterteilen. Dieser Vorgang kann jedoch nicht automatisiert werden, ausserdem muss der Ersteller der Zellunterteilung den Raum mit seinen Funktionalitäten gut kennen, um sinnvolle Zellen zu wählen.

Eine weitere Möglichkeit ist, die Anwendung der Constrained-Delaunay-Triangulationsmethode (CDT), welche aus einem Polygon Dreiecke erzeugt. Die CDT wird häufig verwendet, um Netzwerke zu erzeugen (Kruminaite 2014). CDT ist gut geeignet für Freiräume, da der ganze Raum trianguliert wird und so in viele kleine Zellen unterteilt wird (ebd.). Nach der Triangulation wird jedes Dreieck durch einen Punkt dargestellt (Xu et al. 2016 und Kruminaite 2014) und anschliessend werden alle Mittelpunkte, welche benachbarte Zellen repräsentieren, miteinander verbunden (Kruminaite 2014). Da Dreiecke sehr einfache Geometrien sind und die Berechnung und Speicherung nicht viel Kapazität beansprucht, ist CDT sehr schnell (ebd.). CDT erzeugt realistische Pfade und ist nah am natürlichen Bewegungsmuster von Menschen. Es kann aber vorkommen, dass teilweise etwas gezackte Pfade erzeugt werden (ebd.).

Treppen und Aufzüge werden im Zell-Netzwerkmodell einfach durch vertikale Kanten, sogenannte Verbindungen, dargestellt. Eine Verbindung wird also nicht durch eine Geometrie wie eine Zelle definiert, sondern durch die Funktion des Objektes (Yuan und Schneider 2010).

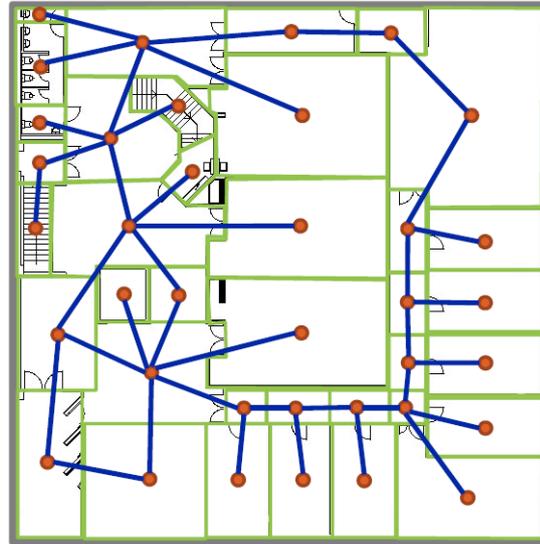


Abbildung 11: Die abstrahierte Darstellung eines Netzwerkes (blau, rot) basierend auf dem Zell-Modell mit den verwendeten Zellen (grün).

2.5.3 Aufteilung in Raster: Raster-Netzwerkmodell

Grundidee

In den bisher vorgestellten Netzwerkmodellen wird angenommen, dass es eine enge Beziehung zwischen dem Bewegungsmuster einer Person und der Raumaufteilung gibt. Allerdings ist der Raum ein Kontinuum, und man kann sich auf der ganzen Fläche des Raumes bewegen. Zudem ist das Verhalten von Menschen nicht deterministisch und die Fortbewegung kann nicht auf eine Linie reduziert werden (Li et al. 2010). Die Raster-Repräsentation ist vor allem in der Robotik sehr verbreitet, da sich ein Roboter nicht nur auf Linien, sondern im ganzen Raum bewegen soll (ebd.).

In einem ersten Schritt werden die räumlichen Einheiten aufgrund eines Plans identifiziert und digitalisiert. In einem zweiten Schritt wird ein Raster-Graph erzeugt und über die Raumeinheiten gelegt. Im letzten Schritt wird dann die Zugehörigkeit jedes Punktes und jeder Linie aufgrund von räumlichen Intersektionen/Schnittmengen zwischen dem Graphen und den Raumeinheiten bestimmt (ebd.). Eine Skizze dieses Netzwerkmodells ist in der Abbildung 12 zu sehen.

Das Modell kombiniert somit strukturelle und topologische Eigenschaften auf verschiedenen Abstraktionsebenen und basiert auf der Node-Edge-Struktur. Zudem bindet das Modell automatisch metrische Eigenschaften ein. Ein grosser Vorteil ist die Vielfalt von Modellierungs- und Simulationsmöglichkeiten (ebd.).

Die Aufteilung in ein Raster erlaubt eine automatische Transformation von den Plänen der Stockwerke in Zellen. Die Raster-Darstellung berücksichtigt die metrischen Distanzen implizit. Bei den meisten anderen Netzwerkmodellen gehen die metrischen Informationen verloren oder werden ungenau (ebd.). Ein Vorteil des Raster-Modells ist, dass das Modell mit gängigen GIS-Software erzeugt werden kann (ebd.).

Dafür braucht die Aufteilung in ein Raster wesentlich mehr Speicherkapazität und Berechnungszeit für die Route, da es viele Punkte und damit viele Routenoptionen gibt.

Erzeugung des Graphen

Als Input für die Erzeugung eines Graphen wird ein 2D-Plan des Stockwerkes benötigt. Über diesen Plan wird ein Raster aus gleich grossen Zellen gelegt. Dazu müssen zwei wichtige Parameter berücksichtigt werden: die Ausdehnung und die Auflösung des Rasters.

Meistens entspricht die Ausdehnung des Rasters der räumlichen Ausdehnung des Plans. Die Auflösung des Rasters legt die Zellengrösse fest und ist stark von der Verwendung des Rasters abhängig (Li et al. 2010). Häufig wird auch eine Auflösung, die der kleinsten Dicke der Wände entspricht, verwendet (ebd.). Für Navigationszwecke eignet sich eine Auflösung, die der Schrittlänge entspricht, also 60 bis 70 cm. Je kleiner jedoch die Auflösung ist, desto grösser ist das Datenvolumen. Will man das Datenvolumen minimieren, so kann die Auflösung soweit verschlechtert werden, bis eine Zelle die Breite einer Tür hat. Sobald die Zellenbreite grösser ist als die Türbreite, ist es möglich, dass Türen übersehen werden und dadurch Räume abgeschnitten werden. Die Auflösung des Rasters wird am besten durch eine visuelle Kontrolle überprüft (ebd.).

Nachfolgend wird jede durch das Raster erzeugte Zelle mit den acht Nachbarzellen verbunden, wobei jeder Zelle eine Wahrscheinlichkeit zugewiesen wird. Zellen, die nicht zugänglich sind oder von Objekten bedeckt werden, die den Weg versperren, werden kleine Wahrscheinlichkeiten zugewiesen, bzw. gelten die Zellen als besetzt und sind somit nicht zugänglich. Freie Zellen werden von besetzten Zellen umgeben (ebd.). Die Gewichtung einer Linie widerspiegelt den Bedeckungsgrad. Beinhaltet die Zugehörigkeit einer Linie eine Raumeinheit, die nicht zugänglich ist, wie z.B. eine Wand, so bekommt sie ein extrem hohes Gewicht und wird dadurch von einem Routenermittlungsalgorithmus nicht gewählt. Andernfalls entspricht das Gewicht der Linie der metrischen Distanz der Linie (ebd.).

Um die geometrischen Informationen zu wahren, wird zu jedem Punkt seine Zugehörigkeit zur unterliegenden Raumeinheit abgespeichert. Ein Punkt kann nur eine Zugehörigkeit haben, während eine Linie mehrere Zugehörigkeiten haben kann. Linien mit Zugehörigkeiten zu mehreren Raumeinheiten definieren die topologischen Beziehungen der Raumeinheiten (ebd.).

Handhabung von Korridoren, Freiflächen und Treppen

Korridore, Freiflächen und Treppen werden nicht speziell behandelt. Auch diese Raumeinheiten werden anhand des Rasters in einem 2D-Netzwerk modelliert. Die Verbindungen zwischen den verschiedenen Stockwerken können jedoch anhand von vertikalen Linien dargestellt werden, wodurch ein 3D-Netzwerkmodell erzeugt werden könnte (Li et al. 2010).

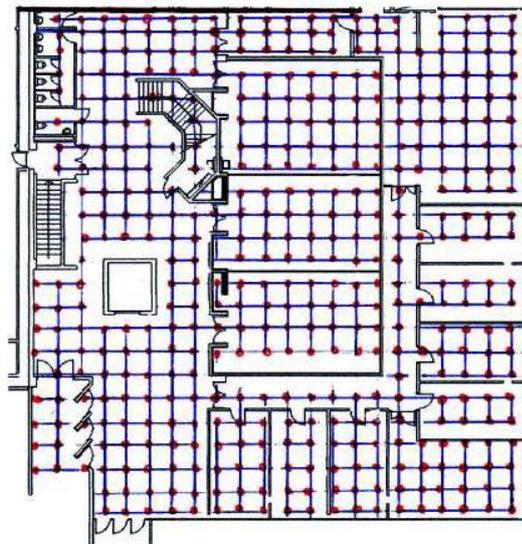


Abbildung 12: Die abstrahierte Darstellung eines Netzwerkes (blau, rot) basierend auf dem Raster-Modell.

2.5.4 Visuelle Aufteilung: Sichtbarkeits-Netzwerkmodell

Grundidee

Die visuelle Aufteilung ist ähnlich der Zell-Aufteilung. Die Zellen werden jedoch aufgrund der Sichtbarkeit erzeugt und nicht aufgrund der Grösse des Raumes oder der Nutzung der entsprechenden Raumstruktur, wie dies beim Zell-Netzwerkmodell gemacht wird. Die Grundlage des Sichtbarkeits-Netzwerkmodells ist die Geometrie der Räume und Objekte im Raum. Punkte verkörpern Zugänge zu einem Raum und die Linien repräsentieren die Sichtbarkeit zwischen den Punkten (Liu und Zlatanova 2012).

Dieses Netzwerkmodell ist gut geeignet für die Routenbeschreibung, da man die Beschreibung gut mit der aktuellen Position im Gebäude verlinken kann.

Erzeugung des Graphen

In einem ersten Schritt werden konvexe Zellen erzeugt (Abbildung 13), denn bei konkaven Zellen können nicht alle Eingangspunkte miteinander verbunden werden, da sie möglicherweise den Rand der Zelle schneiden. Einige Autoren lassen allerdings diesen Schritt aus und arbeiten auch mit konkaven Zellen.

Stoffel et al. (2007) haben einen Algorithmus entwickelt, der konkave Polygone in nicht überlappende konvexe Teilregionen aufteilt. Die Aufteilung erfolgt nach Sichtbarkeitskriterien, wobei die konkaven Ecken eine wichtige Rolle spielen. Der Algorithmus verbindet jeden konkaven Ecken mit dem nächsten konkaven Ecken und kreierte eine neue Grenzlinie und unterteilt so den Raum in zwei Polygone. Dies wird solange gemacht, bis keine konkaven Ecken mehr vorkommen (ebd.).

Eine andere Möglichkeit ist die Anwendung der Constrained-Delaunay-Triangulationsmethode (CDT) um aus konkaven Polygonen konvexe Dreiecke zu erzeugen (Xu et al. 2016 und Kruminaitė 2014). Diese Methode erzeugt allerdings eher kleinere Zellen als die Methode von Stoffel et al. (2007).

In einem zweiten Schritt werden bei Zugängen zu den erzeugten Zellen Punkte gesetzt. Die Wahl der Zugangspunkte ist nicht einfach und je nach Gebrauch des Graphen werden die Punkte anders gesetzt (Turner et al. 2001). Zheng et al. (2009) setzen bei jedem Eingang zu einer Zelle einen Punkt, wobei sie drei Zugangsmöglichkeiten von Zellen beschreiben: Fixierte Eingangspunkte, freie Eingänge (die Zelle ist rund herum zugänglich) und die gemischte Form. Bei fixierten Eingangspunkten wird der Punkt einfach beim Eingang, also z.B. bei der Türe, gesetzt. Bei einer frei zugänglichen Zelle wird die offene Grenze zur Nachbarzelle gesucht und der Punkt in der Mitte der offenen Grenze gesetzt (Yuan und Schneider 2010). Dieses Vorgehen vereinfacht zusätzlich die Navigation, wenn man in einem grossen Raum startet, der möglicherweise konkav ist. So startet die Routenberechnung nicht am Rande einer Freifläche, sondern kann bei einem Grenzpunkt zwischen den offenen Zellen starten (ebd.).

Bei konkaven Zellen werden die konkaven Ecken als Knotenpunkte betrachtet (Liu und Zlatanova 2012 und Yuan und Schneider 2010). Möglicherweise gibt es in gewissen Räumen Inseln oder andere Objekte, welche die Sichtbarkeit von einem Eingang zu einem anderen Eingang beeinträchtigen können (Zheng et al. 2009). Bei solchen Objekten wird jeweils an den Eckpunkten des Objektes ein Punkt platziert (Liu und Zlatanova 2012). Zheng et al. (2009), wie auch Xu et al. (2016) setzen zusätzlich in der Mitte der Zelle ebenfalls einen Punkt.

Diese Punkte dienen dann als Grundlage für die Linien des Graphen, welche auch als Isovisten bezeichnet werden können, da die Linien die Sichtbarkeit von einem Punkt zu einem anderen Punkt darstellen. Ein Isovist enthält die von einem gegebenen Erzeugungsort aus sichtbaren Orte. Ein Isovistendiagramm erster Ordnung (direkte Sichtverbindung) nennt man auch Sichtbarkeitsgraph (Turner et al. 2001).

Bei konvexen Zellen können also einfach alle Zugangspunkte miteinander verbunden werden. Bei konvexen Zellen oder Zellen mit Inseln werden die gesetzten Punkte miteinander verbunden, solange die Segmente keine Wände oder andere Objekte schneiden (Yuan und Schneider 2010). Auch bei konvexen Zellen können zusätzlich die Zugangspunkte einer Zelle mit Zugangspunkten von anderen Zellen verbunden werden, solange auch hier die Segmente keine Wände oder andere Objekte schneiden (Xu et al. 2016).

Handhabung von Korridoren, Freiflächen und Treppen

Korridore und Freiflächen sind meistens komplexe konkave Formen. Diese Formen werden durch den oben beschriebenen Prozess in konvexe Zellen unterteilt und der Graph aufgrund der Sichtbarkeit erzeugt. Die Handhabung von solchen Räumen ist somit klar beschrieben.

Durch die Aufteilung in Zellen, werden grosse Freiflächen in kleinere Zellen unterteilt und dadurch werden Punkte auf der Freifläche erzeugt. Dies dient der Routenberechnung und -beschreibung sowohl beim Traversieren von Freiflächen, wie auch beim Starten oder Beenden von Routen auf Freiflächen (Yuan und Schneider 2010).

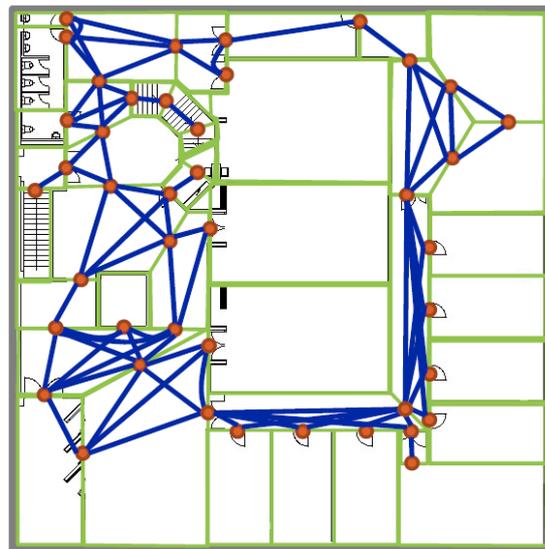


Abbildung 13: Die abstrahierte Darstellung eines Netzwerkes (blau, rot) basierend auf dem Sichtbarkeits-Modell mit den verwendeten konvexen Polygonen (grün).

2.5.5 Datenmodelle unabhängig der Link-Node-Struktur

Es gibt einige Datenmodelle, die nicht auf der Link-Node-Struktur basieren und daher eher ungeeignet sind für Routing-Algorithmen. Der Vollständigkeit halber werden sie aber hier ebenfalls aufgeführt und kurz erklärt.

Polygone

Normalerweise werden „Nodes“ mit Punkten assoziiert und „Links“ mit Linien. Beim Polygon-Modell sind die Links und Nodes unabhängig von Geometrien. Die Polygone, welche Räume und Korridore darstellen, werden in diesem Modell mit den Nodes assoziiert, währenddem die Verbindungen zwischen den Raumeinheiten (Türen) durch Linien dargestellt werden.

Dieses Modell beachtet nicht, wie sich der Nutzer im Raum bewegt, sondern nur, in welchem Raum er sich befindet. Dieses Modell ist einfach zu verstehen für Nutzer, obwohl es dem bekannten Strassennetzwerk nicht ähnlich ist (Sato et al. 2009).

Ein Vorteil des Polygon-Modells ist, dass die Position nicht an einen Graphen gebunden ist. Dies ist vor allem auf grossen Plätzen von Vorteil. Wenn man eine Navigation auf einem grossen Platz startet, so kann die tatsächliche Position übernommen werden und es muss keine Position auf einem "unnatürlichen" Graphen eingenommen werden (Schougaard et al. 2012). Ein Nachteil ist neben der ungewöhnlichen Struktur, die für viele Algorithmen nicht geeignet ist, auch die Tatsache, dass sich damit keine Abbiegungs-Winkel berechnen lassen.

3D Gebäudemodell (BIM) und City-GML

Mit Skelettierung und der Poincare-Dualität ist es möglich, einen Graphen aus einem vorbereiteten BIM oder CityGML-Modell zu extrahieren (Isikdag et al. 2013).

Das 4. Detaillevel des 3D-Stadtmodell-Standards CityGML bietet die Möglichkeit das Innere von Gebäuden mit Geometrien, Topologien und Semantiken zu repräsentieren. Diese Informationen sind auch in anderen BIMs vorhanden. Aus diesen Informationen können Graphen generiert werden, welche mit diversen Semantiken ausgeschmückt werden können. Diese Modelle dienen also dazu, Informationen zu liefern und daraus einen Graphen zu extrahieren, welcher anschliessend für die Routenberechnung gebraucht werden kann (Isikdag et al. 2013).

BIM eignet sich sehr gut als Quell-Modell, da alle Informationen für die Indoor-Navigation vorhanden sind und direkt aus dem Modell bezogen werden können. Ausserdem sind die Quellen für die semantischen Informationen sehr detailliert. CityGML ist hingegen weniger geeignet als Quell-Modell, da das Modell zuerst mit semantischen Informationen ergänzt werden muss, was sehr aufwändig sein kann (ebd.).

Die Autoren Isikdag et al. (2013) haben ein Indoor-Datenmodell entwickelt, das sich von einem BIM ableiten lässt. Mithilfe von Abfragen werden die Daten vom BIM in das sogenannte BO-IDM übertragen, welches eine weniger komplexe Struktur als ein BIM hat (Isikdag et al. 2013). Die technischen Anforderungen an das BO-IDM sind die folgenden (ebd.):

- Die Objektsemantik des BIMs soll erhalten bleiben
- BIM-Klassen, die leere Elemente (z.B. Löcher) repräsentieren, sollen eliminiert werden
- Die räumlichen Beziehungen zwischen den Objekten im BIM sollen erhalten bleiben
- Die Beziehungen im BIM sollen im Schema des Zielmodells implementiert werden
- 3D-BIM-Geometrien sollen in Zielmodelle konvertiert werden
- Es sollen nur die wichtigen Attribute im Zielmodell implementiert werden
- Ein geographisches Koordinatensystem soll eingeführt werden

Die Topologie wird durch das BO-IDM erzeugt, indem das BO-IDM mithilfe der Poincaré-Dualität oder der Skelettierung in einen Graphen umgewandelt wird. Im BO-IDM kann noch keine Route berechnet werden (ebd.).

Ein grosser Vorteil dieses Datenmodells ist die Verfügbarkeit von vielen Attributen mit topographischen und semantischen Informationen. Zudem sind schon 3D-Geometrien vorhanden und es muss nicht zusätzlich noch eine Transformation von einem 2D- in ein 3D-Modell durchgeführt werden (ebd.).

2.6 Fazit

Auf der Basis des Kapitels 2 werden nun kurz die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und daraus der Forschungsbedarf abgeleitet.

2.6.1 Zusammenfassung der Grundlagen

Zu Beginn des Kapitels wurde aufgezeigt, dass in der Outdoor-Fussgänger-Navigation nicht immer der kürzeste Weg gewählt wird. Es gibt noch viele andere Routenoptionen, die von Probanden berücksichtigt werden. Dieser Vielfalt von Routenwahlfaktoren wird in der Outdoor-Navigation durch viele verschiedene Routing-Algorithmen Rechnung getragen.

Die meisten dieser Algorithmen beruhen auf dem Dijkstra-Algorithmus, welcher den minimalsten Pfad (nicht im metrischen Sinne) zwischen einem Start- und einem Zielpunkt berechnet, wobei eine Gewichtungsfunktion berücksichtigt wird. Die Gewichtungsfunktion teilt einer Kante oder einem Paar von Kanten ein Gewicht zu, das von verschiedenen Faktoren, abhängig vom Prinzip des Routing-Algorithmus, bestimmt wird.

Mit diesen Grundlagen wurden in der Outdoor-Navigation diverse Algorithmen entwickelt. Die ersten zwei beschriebenen Beispiele befassen sich mit der Komplexität der generierten Route. Während der Einfachste-Weg-Algorithmus, Abzweigungen in Kategorien einteilt und danach gewichtet, fokussiert der Zuverlässigste-Weg-Algorithmus auf die Routenbeschreibung, die möglichst eindeutig sein soll. Es wurden noch zwei weitere Algorithmen vorgestellt, welche die Winkel der Abbiegungen berücksichtigen. Der Kleinster-Gesamtdrehwinkel-Algorithmus versucht die aufsummierten Abbiegungswinkel minimal zu halten, während der Wenigste-Abbiegungen-Algorithmus möglichst lange den natürlichen Strassen folgen will, indem Abbiegungen mit einem Abbiegungswinkel über einem vorher bestimmten Schwellenwert vermieden werden sollen.

In einem weiteren Schritt wurde dann der Fokus auf die Indoor-Navigation verlegt. Auch hier wurde aufgezeigt, dass es viele verschiedene Strategien gibt, die bei der Wegfindung berücksichtigt werden und nicht immer der kürzeste oder schnellste Weg gewählt wird.

Die Algorithmen-Auswahl für die Indoor-Navigation stellt jedoch einen grossen Kontrast zu der Auswahl in der Outdoor-Navigation dar. Meistens wird der Algorithmus, der den kürzesten oder schnellsten Weg eruiert, implementiert. Es gibt allerdings einen sehr gut erforschten Ansatz für die Routenberechnung von Menschen mit besonderen Bedürfnissen, der gut dokumentiert ist und bei dem auch schon ein passendes Netzwerkmodell entwickelt wurde.

Der zweite Fokus im Kapitel 2 liegt auf den Netzwerkmodellen. Denn bevor ein Algorithmus Routen auf der Grundlage eines Graphen generieren kann, muss das Netzwerk eines Gebäudes modelliert und abstrahiert werden. Es wurde festgestellt, dass die Netzwerkmodelle der Indoor- und Outdoor-Navigation nur wenige Äquivalenten aufzeigen, da eine Strassenumgebung ganz andere Eigenheiten aufweist, als eine Umgebung in einem Gebäude. Zudem spielen in der Indoor-Navigation die vielfältigen semantischen Informationen eine wichtige Rolle, da sie nicht nur für die Modellierung des Gebäudes gebraucht werden können, sondern auch für eine spätere Routenbeschreibung. Es wurden anschliessend einige Netzwerkmodelle, die auf der Node-Edge-Struktur basieren, vorgestellt.

Neben dem geometrischen Korridor-Netzwerkmodell, das einem Strassennetzwerk recht ähnlich ist, wurden auch zellbasierte Modelle vorgestellt. Dabei wurde das topologische Zell-Netzwerkmodell vorgestellt, bei dem die Zelleinteilung auf der Nutzung des entsprechenden Raumes basiert, und auch das Raster-Netzwerkmodell wurde beleuchtet, bei dem die Zelleinteilung auf einem regelmässigen Raster beruht. Zum Abschluss wurde neben Netzwerkmodellen, die nicht auf der Node-Edge-Struktur basieren, noch das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell betrachtet. Dieses Modell basiert ebenfalls auf Zellen,

die jedoch aufgrund der Konvexität eingeteilt werden, denn bei diesem Modell werden alle Zugangspunkte zu einer Raumeinheit durch die Sichtlinien verbunden und so die möglichen Pfade modelliert.

2.6.2 Forschungslücke

In den meisten Navigationssystemen werden Routenwahl-Strategien verwendet, die nicht zwingend die Strategie von Reisenden widerspiegeln, denn Reisende wählen eine Vielzahl von unterschiedlichen Routen (Golledge 1995a). Dadurch entsteht ein Bedarf an verschiedenen Routing-Optionen, welche sich in der Vielzahl an Algorithmen für die Outdoor-Navigation widerspiegelt.

Dieser Bedarf nach der Generierung von verschiedenen Routen gilt auch in der Indoor-Navigation. Zudem ist in Gebäuden die Routing-Strategie abhängig von der Art des Gebäudes, der Aufgabe und der Instruktionen. Im Indoor-Bereich ist das Bedürfnis nach Navigationsapplikationen also vorhanden, allerdings ist die Entwicklung noch nicht so weit wie in der Outdoor-Navigation. Dies ist auch gut an der Anzahl der ausgearbeiteten Routing-Algorithmen erkennbar. Das oberste Ziel soll somit die Vervielfachung der angebotenen Routing-Algorithmen sein, damit den Benutzern ein Pfad nach ihren Präferenzen angeboten werden kann. Doch um diesem Ziel zu folgen, muss zunächst mit einem geeigneten Netzwerkmodell eine gute Basis gelegt werden, denn das Netzwerk muss die verschiedenen Algorithmen unterstützen können.

Es sind zahlreiche Netzwerkmodelle für Gebäude vorhanden, allerdings sind diese Modelle sehr stark auf eine Gebäudestruktur fixiert und es weisen alle Modelle Vor- und Nachteile auf. Diese bestehenden Netzwerkmodelle sollen tiefgründig beurteilt werden um die Eignung der Modelle zu bewerten. Da ein Gebäude aus vielen verschiedenen Strukturen besteht, die berücksichtigt werden sollen, soll ein Modell gefunden werden, das universell für sehr komplexe und vielfältige Gebäude eingesetzt werden kann. Ein vielversprechender Ansatz ist die Entwicklung eines neuen Netzwerkmodells, das aus verschiedenen Netzwerkmodellen aufgebaut ist und so den Anforderungen der Routing-Algorithmen gerecht wird. Es gibt schon einige Autoren, welche aufgrund des Routing-Algorithmus verschiedene Netzwerkmodelle gemischt haben.

3 Vorgehensweise

3.1 Ziel der Arbeit

Die Lücke in den unterstützen Routing-Algorithmen in der Indoor-Routenplanung soll geschlossen werden. Es sollen Algorithmen entwickelt werden können, die einen Benutzer, der ein Gebäude zum ersten Mal betritt, bei der Wegfindung zu seinem Ziel unterstützen. Dazu soll ein fundiertes und gut ausgearbeitetes Netzwerkmodell entwickelt werden, das auf die Ansprüche von Routing-Algorithmen und Benutzer eingehen soll.

Einleitend sollen aber bestehende Netzwerkmodelle beurteilt werden und deren Eignung für die Weiterentwicklung von Algorithmen bewertet werden. Das Netzwerkmodell soll einerseits auf die Ansprüche von Routing-Algorithmen eingehen, die versuchen, einfache Routenbeschreibungen zu generieren. Zudem sollen Winkelberechnungen möglich sein, um Routing-Algorithmen zu unterstützen, welche die Abbiegungswinkel auf einer Route berücksichtigen. Andererseits soll das Netzwerk auch modellorientierten Anforderungen gerecht werden, die unabhängig von den Routing-Algorithmen sind. Denn der Aufwand für die Generierung eines Netzwerkes oder die Komplexität des Netzwerkes sind ebenso von Bedeutung.

Auf der Grundlage dieser und noch weiteren auszuarbeitenden Anforderungen und den bestehenden Netzwerkmodellen soll ein Netzwerkmodell entwickelt werden, das einen Graphen von einem komplexen Gebäude möglichst automatisch generieren kann, wobei der Gebädefokus auf Gebäudekomplexen mit vielen Stockwerken und einer Vielfalt an unterschiedlichen Raumstrukturen, wie es eine Universität aufweist, liegt. Diese Arbeit fokussiert somit auf der Herleitung eines Netzwerkmodells, das verschiedenen, noch nicht entwickelten, Routing-Algorithmen gerecht werden soll. Das Implementieren dieser Routing-Algorithmen und die Generierung von Wegbeschreibungen sind nicht Teil dieser Arbeit und könnten in einer weiterführenden Arbeit ausgeführt werden.

Somit kann das Forschungsfeld dieser Arbeit auf zwei Forschungsziele eingeschränkt werden:

- Z1:** Beurteilung der Eignung von existierenden Indoor-Netzwerkmodellen für verschiedene Routing-Algorithmen
- Z2:** Entwicklung eines Netzwerkmodells

Es wird bewusst auf die Formulierung „Forschungsfrage“ verzichtet, da die Arbeit nicht empirische Daten auswertet und dadurch eine Frage beantwortet wird. Stattdessen zielt die Arbeit auf eine Entwicklung ab, die der Weiterentwicklung der Indoor-Navigation dienen soll.

3.2 Methoden

In einem ersten Schritt werden auf der Grundlage der bereits zusammengetragenen Literatur, Anforderungen an ein Netzwerkmodell formuliert. Diese Anforderungen basieren nicht nur auf den zu berücksichtigenden Algorithmen, sondern sollen auch weitere Faktoren, welche allgemein für Navigations-Begehren gelten, beiziehen.

In einem weiteren Schritt werden drei verschiedene Netzwerkmodelle in drei unterschiedlichen Umgebungen, welche charakteristisch für ein Gebäude sind, nach den Angaben aus der Literatur modelliert. Für diesen, und auch den nächsten Schritt, wurden keine Codes geschrieben, denn diese Netzwerkmodelle sollen rein konzeptionell bewertet werden. Die mit den verschiedenen Netzwerkmodellen modellierten Umgebungen werden dann anhand von modellorientierten Anforderungen bewertet und Vor- und Nachteile bei der Modellierung eines Gebäudes nach den Prinzipien der drei Netzwerkmodelle eruiert.

Des Weiteren werden auf diesen modellierten Netzwerken wiederum auf einer konzeptionellen Ebene drei verschiedene Routing-Algorithmen getestet. Neben dem kürzesten Weg, der als Vergleichsobjekt für bestehende Routing-Algorithmen dienen soll, werden auch noch zwei weitere Algorithmen getestet, welche die Winkelberechnung und die Komplexität einer Route berücksichtigen sollen.

Dadurch werden die bestehenden Netzwerkmodelle verglichen und nach ihrer Eignung für die Implementierung von Algorithmen bewertet. Basierend auf diesen Erkenntnissen soll ein Vorschlag für ein geeignetes Netzwerkmodell formuliert werden.

Dieser Vorschlag wird dann soweit als möglich umgesetzt und umfassend umschrieben, damit er auch von anderen Forschenden genutzt werden kann. Dieser Teil der Thesis bezieht sich also auf eine praktische Arbeit, in der mit FME ein Skript geschrieben wird, das 2D-Pläne aufgrund des vorgeschlagenen Netzwerkmodells in einen Graphen transformiert.

In einem letzten Schritt soll der auf der Grundlage des vorgeschlagenen Netzwerkmodells erzeugten Graphs mit den Anforderungen abgeglichen werden. Zudem soll auch der bereits implementierte Routing-Algorithmus, welcher den kürzesten Weg berechnet, getestet werden.

3.3 Daten und Software

Beim Testgelände handelt es sich um den Campus Irchel der Universität Zürich. Es sind vom ganzen Gebäudekomplex digitale Pläne vorhanden. Dabei handelt es sich um DWG-Pläne, die von den Architekten stammen und welche pro Gebäude und Stockwerk erstellt wurden. Zudem stehen auch PDF-Pläne zur Verfügung, die jedoch nur zur Übersicht und nicht als Grundlage für die Netzwerkerzeugung dienen.

DWG ist ein Format, das in CADs erstellt wird und sehr weit verbreitet ist bei Planern. Es handelt sich bei diesem Dateiformat um einfache 2-D Zeichnungen mit begrenzten semantischen Informationen. Die DWGs bestehen allerdings aus mehreren Layern. Einzelne Layer können gut identifiziert werden, da sich auf diesen Layern zum Beispiel die Planköpfe der Pläne oder die Grundrisse von den verschiedenen Gebäuden befinden. Grundsätzlich wäre es möglich, dass je nach Layer andere Gebäude-Objekte darauf abgespeichert sind. In den vorhandenen Daten ist dies allerdings nicht konsequent umgesetzt worden, da die Pläne von unterschiedlichen Planern erstellt wurden. Dies zeigt sich nur schon an der Anzahl von den über 150 Layern und einer nicht vorhandenen Definition, auf welchem Layer welche Objekte eingezeichnet werden sollen. Teilweise befinden sich also zum Beispiel die Türen in der einen Datei auf dem Layer, auf welchem sich in einer anderen Datei Bodenkanten befinden. Zudem gibt es Layer, auf denen gleichzeitig mehrere unterschiedliche Objekte, wie zum Beispiel Türen, Wände und Balkone, abgespeichert werden.

Für die Visualisierung und die Abspeicherung von Daten werden ESRI-Produkte verwendet, welche von der Universität zur Verfügung gestellt werden. Für die Generierung des Graphen auf der Grundlage des zu entwickelnden Netzwerkmodells wird die Transformationssoftware FME von der Firma Safe beigezogen, welche für Studenten eine zeitlich begrenzte Lizenz zur Verfügung stellen. Neben persönlichen Gründen gibt es noch viele weitere Gründe, die für die Wahl von FME entscheidend waren. FME stellt schon viele Transformationswerkzeuge zur Verfügung und kann durch eigene Werkzeuge ergänzt werden, weshalb die Transformation eines 2D-Plans in einen Netzwerkgraphen ideologisch gut in eine solche Umgebung passt. Neben vielen schon implementierten Werkzeugen können auch ganz einfach eigene Transformatoren geschrieben werden, die entweder aus FME-Transformatoren oder aus Python- oder R-Skripten bestehen. Somit sind praktisch keine Grenzen gesetzt bei der Erstellung von Transformationstools. Zudem erleichtert die benutzerfreundliche Oberfläche von FME den Einstieg in diese Software.

4 Beurteilung bestehender Indoor-Netzwerkmodelle

In diesem Kapitel geht es um den Vergleich vorhandener Netzwerkmodelle und deren Bewertung aufgrund von unterschiedlichen Anforderungen, welche sich unter anderem auch auf später zu implementierenden Routing-Algorithmen beziehen. Es werden die Vor- und Nachteile des Korridor-, des Zell- und des Sichtbarkeits-Netzwerkmodells aufgezeigt und schlussendlich wird eine Empfehlung für die Entwicklung eines neuen Netzwerkmodells abgegeben. Damit soll ein solides Netzwerkmodell als eine Grundlage geschaffen werden für die Entwicklung von weiteren Routing-Algorithmen.

Da die meisten Routing-Algorithmen mit Link-Node-Datenmodellen arbeiten und dies, das am weitesten verbreitete Datenmodell ist, werden auch hier nur Netzwerkmodelle verglichen, die auf dem Link-Node-Datenmodell beruhen.

4.1 Untersuchungsgebiet

Die Netzwerkmodelle werden anhand von drei verschiedenen Untersuchungsgebieten auf dem Campus Irchel der Universität Zürich getestet. Die Universität Zürich hat mehrere Universitätsgebäude in der ganzen Stadt Zürich. Der Campus Irchel eignet sich gut als Untersuchungsgebiet, da der Campus aus mehreren Gebäuden besteht und sehr gross ist. Daher bietet der Standort vielfältige und abwechslungsreiche Gebäude- und Raumstrukturen.

Auf dem Campus Irchel wurden drei unterschiedliche Untersuchungsgebiete definiert. Diese Untersuchungsgebiete sollen typisch sein für Indoor-Umgebungen und spezifische Eigenschaften von Gebäuden wiedergeben. Speziell die Anforderung an den Modellierungsaufwand (A1) richtet sich an diese typischen Indoor-Umgebungen. Doch auch die routingorientierten Anforderungen werden in diesen drei Untersuchungsgebieten getestet.

Korridore (U1)

Die erste spezifische Eigenschaft von Indoor-Umgebungen ist das Vorhandensein von Korridoren. Korridore verbinden Räume miteinander und sind, neben Freiflächen und geschlossenen Räumen, ein zentrales Element in vielen Gebäuden. Korridore lassen sich durch langgezogene Gänge definieren, viele untergeordnete Raumeinheiten verbinden, wie gut auf dem Plan (Abbildung 14) und den dazugehörigen Fotos (Abbildung 15, Abbildung 16 und Abbildung 17) ersichtlich ist.

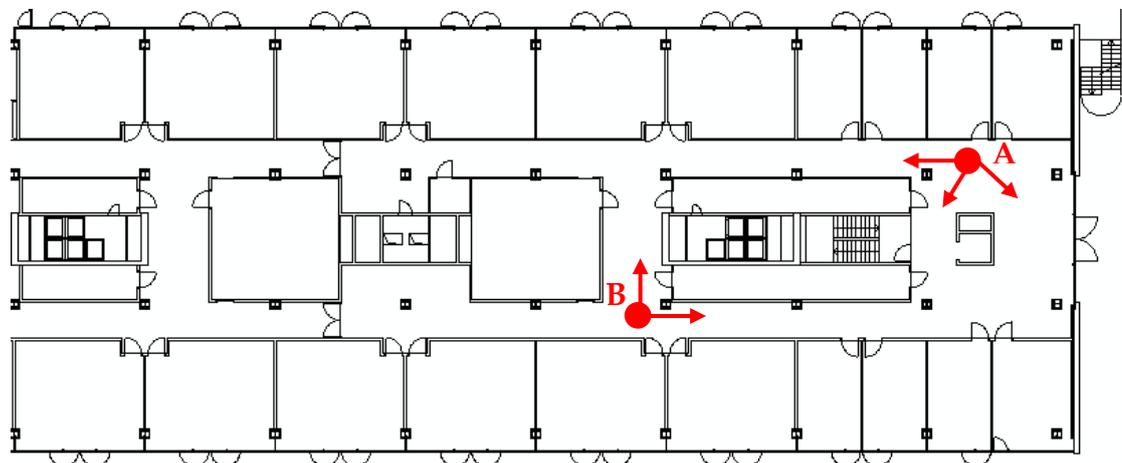


Abbildung 14: Plan im Untersuchungsgebiet "Korridore" (U1) mit den Standorten der Bildaufnahmen (rot).



Abbildung 15: Foto im Untersuchungsgebiet U1 vom Punkt A aus.



Abbildung 16.a und .b: Fotos der Testumgebung U1 vom Punkt A aus.

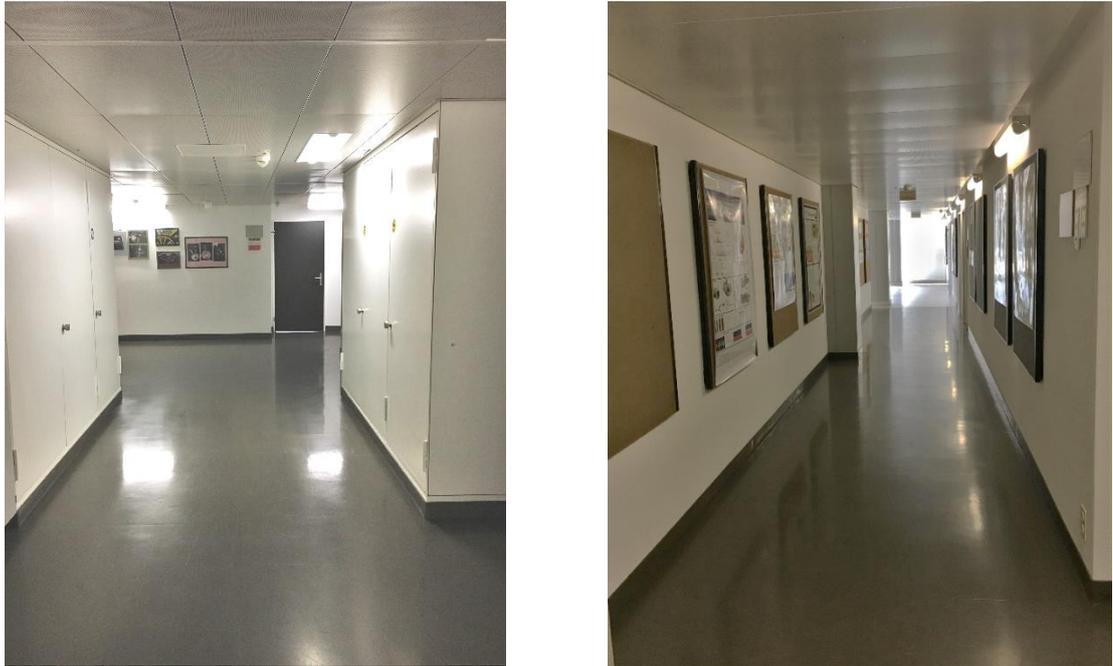


Abbildung 17.a und .b: Fotos der Testumgebung U2 vom Punkt B aus.

Freiflächen (U2)

Eine weitere charakteristische Situation, in der die Netzwerkmodelle getestet werden, sind offene Räume, auch Freiflächen genannt. Diese Räume sind sehr gross und werden nicht durch Wände abgegrenzt. Möglicherweise befinden sich sogar noch Objekte im Raum, die umgangen werden müssen oder der Raum wird in seiner Nutzung unterteilt, ohne dass diese Nutzung durch Wände abgetrennt wird. Ein Beispiel für eine solche Fläche ist als Plan in der Abbildung 18 zu sehen. Abbildung 19 und Abbildung 20 stellen ebendiese Freifläche vom Standort A bzw. Standort B aus dar.

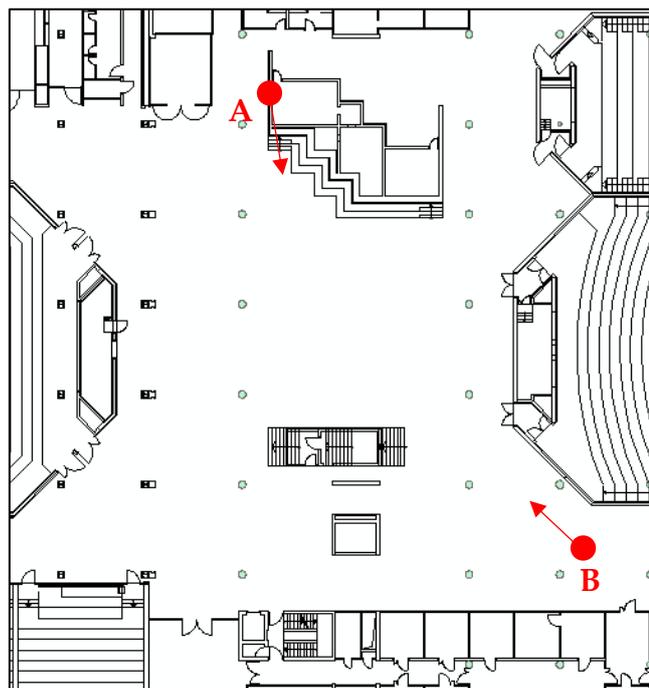


Abbildung 18: Plan im Untersuchungsgebiet "Freifläche" (U2) mit den Standorten der Bildaufnahmen (rot).



Abbildung 19: Foto von der Testumgebung U2 vom Standort A aus (Ansicht aus dem oberen Stockwerk).



Abbildung 20: Foto der Testumgebung U2 vom Standort B aus.

Treppen und Aufzüge (U3)

Der Wechsel der Stockwerke ist eine weitere Charaktereigenschaft von Bewegungen in Gebäuden (U3). Dabei gibt es drei verschiedene Arten, wie das Stockwerk gewechselt werden kann. Die häufigste Variante ist die Treppe (Abbildung 21 und Abbildung 22), gefolgt vom Aufzug und der Rampe. Diese Objekte müssen in einem Netzwerkmodell dargestellt werden können und vom Routenberechnungs-Algorithmus richtig interpretiert werden können.

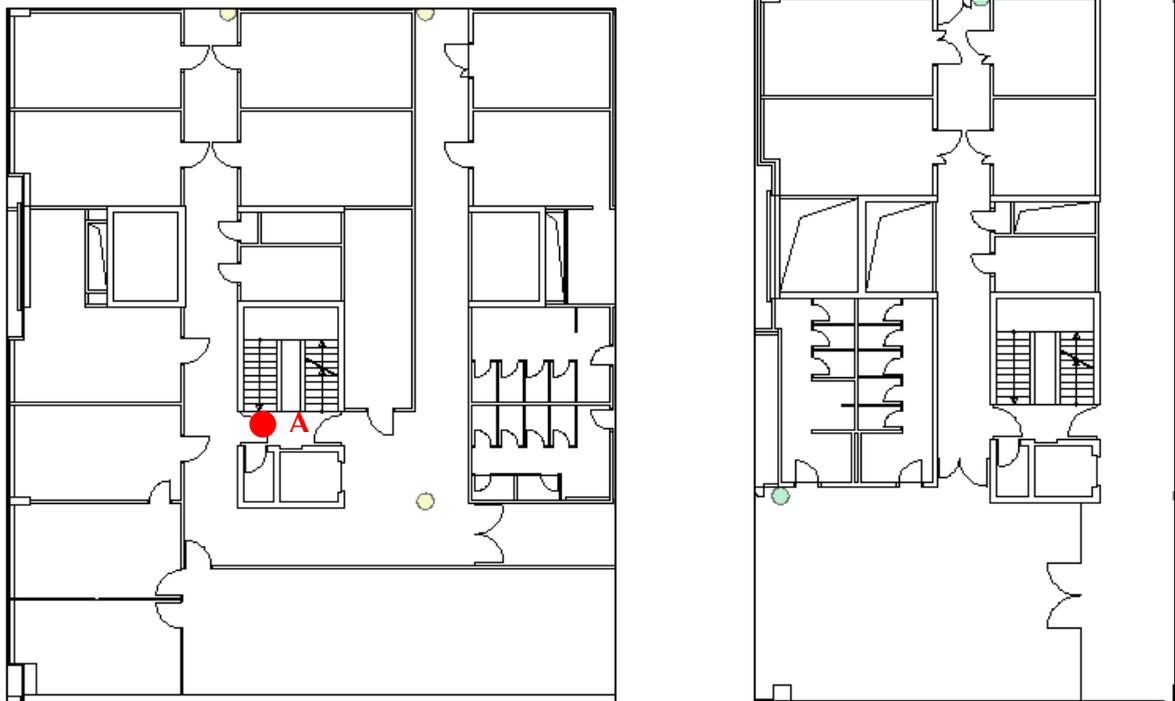


Abbildung 21: Plan im Untersuchungsgebiet "Treppen" (U3) mit dem Standort der Bildaufnahme (rot), unteres Stockwerk (links) und oberes Stockwerk (rechts).

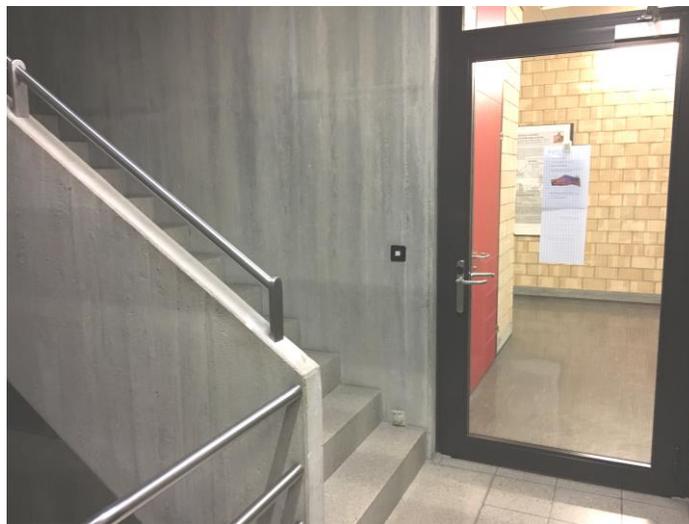


Abbildung 22: Testumgebung U3 vom Standort A aus.

4.2 Anforderungen an das Netzwerkmodell

Das Netzwerkmodell muss mehreren Anforderungen genügen, damit es geeignet ist für die Indoor-Navigation mit den hier spezifischen Routenberechnungs-Algorithmen. Es werden zwei Gruppen von Anforderungen unterschieden: modellorientierte Anforderungen und routingorientierte Anforderungen.

In der ersten Gruppe werden Anforderungen geprüft, welche die allgemeine Handhabung der Modelle und deren Effizienz anwendungsunabhängig betrachten. Es sind dies die folgenden Anforderungen: (A1) Modellierungsaufwand, (A2) Komplexität, (A3) Semantik.

In der zweiten Gruppe werden Anforderungen geprüft, die anwendungsbezogen sind. Dabei werden die Routenberechnungs-Algorithmen, welche die Komplexität von Verzweigungen und die Grösse von Abbiegungswinkeln einbeziehen, berücksichtigt. Es werden die folgenden Anforderungen geprüft: (A4) Realitätsbezug, (A5) Abbiegungserkennung, (A6) Abzweigungskategorisierung.

Modellorientierte Anforderungen

Der Modellierungsaufwand (A1) ist ein wichtiger Aspekt bei der Wahl eines Netzwerkmodells und wird anhand der Kosten und der Komplexität des Modellierungsaufwands qualitativ bewertet (Afyouni et al. 2012). Das Netzwerk soll mit wenig Aufwand und manuellen Eingriffen auf der Grundlage eines 2D-Planes („Floorplan“) generiert werden können. Einige Netzwerkmodelle erfordern von den Konstrukteuren Kenntnisse der Räumlichkeiten und manuelle Arbeitsschritte, die bei einer allfälligen Neugenerierung des Netzwerkes wiederholt werden müssten. Die Generierung des Netzwerkes soll also automatisch ablaufen, damit einfach und schnell Graphen von neuen Gebäuden erzeugt werden können. Des Weiteren sollen typische Indoor-Umgebungen wie Freiflächen, Korridore und Treppen bzw. Aufzüge adäquat dargestellt werden, sodass diese Objekte sowohl bei der Routenberechnung, wie auch schlussendlich beim tatsächlichen Navigieren mit ihren Eigenheiten berücksichtigt werden.

Die Komplexität (A2) berücksichtigt auch die Speicherkapazität des Netzwerkes, welche die Berechnungszeit einer allfälligen Anwendung beeinflusst. Bei einer Anwendung werden z.B. kürzeste Wege oder die Nachbarn eines Punktes abgefragt. Diese Abfragen müssen schnell ausgeführt werden können, da sonst die Bedienung der Anwendung eingeschränkt ist. Die Komplexität ergibt sich aus der Menge der Punkte und Linien mit denen eine Raumeinheit abgebildet wird.

Für eine spätere Generierung einer Routenbeschreibung ist die Einbindung der Semantik (A3) von grosser Bedeutung. Denn nur mit der Einbindung der semantischen Bedeutung der Umgebung kann dem Benutzer einen genauen Routenbeschrieb geboten werden, welchen er auch nachvollziehen kann.

Routingorientierte Anforderungen

Eine spätere Anwendung ist der Kürzeste-Weg-Algorithmus. Dafür muss das Netzwerk realistische Pfade generieren können (A4). Einige Netzwerkmodelle stellen Pfade sehr abstrakt dar, wodurch Umwege entstehen an Orten, wo ein Proband einen direkteren und somit kürzeren Weg wählen würde. Solche Diskrepanzen sollen vermieden werden. Die Anforderung wird auf Grundlage der Länge des generierten Pfades und der Anzahl Schnittpunkte des Pfades mit Wänden oder anderen Objekten bewertet.

Eine weitere Anwendung ist ein Abbiegungs-Algorithmus, bei dem Abbiegungen aus dem Graphen erkannt werden müssen (A5). Grundsätzlich ist es möglich, Abbiegungswinkel zu berechnen, sobald die Koordinaten der Routingpunkte bekannt sind. Allerdings ist es möglich, dass aufgrund des Netzwerkmodells ausserordentlich viele Abbiegungen erkannt werden. Dies kann auch umgekehrt der Fall sein, wenn im Netzwerkmodell nur ein kleiner Abbiegungswinkel dargestellt wird und der Richtungswechsel nicht als Abbiegung erkannt wird, werden möglicherweise zu wenige Abbiegungen gezählt. Für die Bewertung dieser Anforderung werden die Anzahl Abbiegungen auf den generierten Routen verglichen.

Die letzte Anwendung ist die Generierung des einfachsten Weges. Bei diesem Algorithmus werden die Abzweigungen kategorisiert (A6) und entsprechend ihrer Komplexität gewichtet. Das Netzwerkmodell muss daher Abzweigungen so abbilden, wie sie vom Nutzer wahrgenommen werden. Einige Netzwerkmodelle generieren sehr komplexe Verzweigungen aufgrund der Position und der Menge von Punkten und Linien. Dabei werden die Komplexitäten der berechneten Routen verglichen.

Die im Folgenden beurteilten Anforderungen an die Netzwerkmodelle sind in der Tabelle 3 nochmals kurz zusammengefasst.

Tabelle 3: Übersicht der beurteilten Anforderungen an ein Netzwerkmodell.

Modellorientierte Anforderungen	Modellierungsaufwand: Das Netzwerk soll mit wenig manuellem Aufwand modelliert werden.
	Komplexität: Das Netzwerk soll nicht zu komplex sein, um die Speicherkapazität zu minimieren.
	Semantik: Es sollen den Objekten semantische Informationen zugewiesen werden, die der Routenberechnung dienen können.
Routingorientierte Anforderungen	Realitätsbezug: Das Netzwerk soll realistisch dargestellt werden und die Längen der Wege annäherungsweise den tatsächlichen Wege entsprechen.
	Abbiegungserkennung: Es soll erkannt werden können, wann eine Abbiegung vorliegt, wobei die Anzahl der Abbiegungen realistisch sein soll.
	Abzweigungskategorisierung: Abzweigungen sollen im Netzwerk so dargestellt werden, wie sie vom Nutzer wahrgenommen werden.

4.3 Vergleichene Indoor-Netzwerkmodelle

Die Beurteilung der Netzwerkmodelle beschränkt sich auf die drei gängigsten Modelle, da davon ausgegangen werden kann, dass die unpopulären Modelle grosse Nachteile besitzen, weshalb sie seltener angewandt werden. Der Vergleich wird zwischen den folgenden Modellen durchgeführt: (M1) Korridor-Ableitung, (M2) Zell-Auflösung und (M3) Sichtbarkeits-Aufteilung.

Diese drei Netzwerkmodelle werden in typischen Indoor-Umgebungen (Kapitel 4.1) simuliert, wobei darauf geachtet wird, welche der aufgelisteten Anforderungen erfüllt werden.

Jedes Netzwerkmodell wird je nach Quelle anders konstruiert und verschiedene Kriterien für das Setzen der Punkte und Linien angewandt. Dadurch entstehen z.B. verschiedene Varianten des zellbasierten Netzwerkmodells, da jeder Autor etwas andere Kriterien anwendet. Deshalb wird hier nochmals kurz zusammengefasst, nach welchen Kriterien die Netzwerkmodelle für den Vergleich modelliert werden sollen.

Korridor-Netzwerkmodell (M1)

- Korridore werden als Kanten und Verzweigungen als Punkte dargestellt
- Die Linie repräsentiert die Mittelachse des Korridors
- Türen werden senkrecht auf die Korridor-Linie projiziert
- Räume werden durch Punkte dargestellt

Zell-Netzwerkmodell (M2)

- Einfache Räume werden durch Punkte dargestellt
- Korridore werden so unterteilt, dass jeder Zugang zum Korridor eine zugehörige Zelle hat (Lorenz et al., 2006)
- Freiflächen müssen manuell unterteilt werden. Faktoren für die Unterteilung sind die Folgenden: Konkavität, Grösse des Raumes, verschiedene Nutzungen innerhalb des Raums
- Zellen, die nebeneinander liegen, werden durch Linien verbunden
- Türen werden als Linien dargestellt (Lorenz et al 2006)

- Linien verbinden die verschiedenen Stockwerke und werden durch die Funktion des Objektes (z.B. Treppe, Lift) definiert (Yuan und Schneider 2010)

Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (M3)

- Konvexe Polygone werden mittels CDT (Constrained Delaunay Triangulation) erzeugt
- Bei Eingängen werden Punkte gesetzt (Zheng et al. 2009)
- In der Mitte von offenen Grenzen werden Punkte gesetzt

4.4 Beurteilung der Netzwerkmodelle anhand von modellorientierten Anforderungen

Die drei Netzwerkmodelle werden nun auf die zuvor beschriebenen modellorientierten Anforderungen geprüft.

In der Testumgebung U1 sehen die drei Netzwerkmodelle folgendermassen aus:

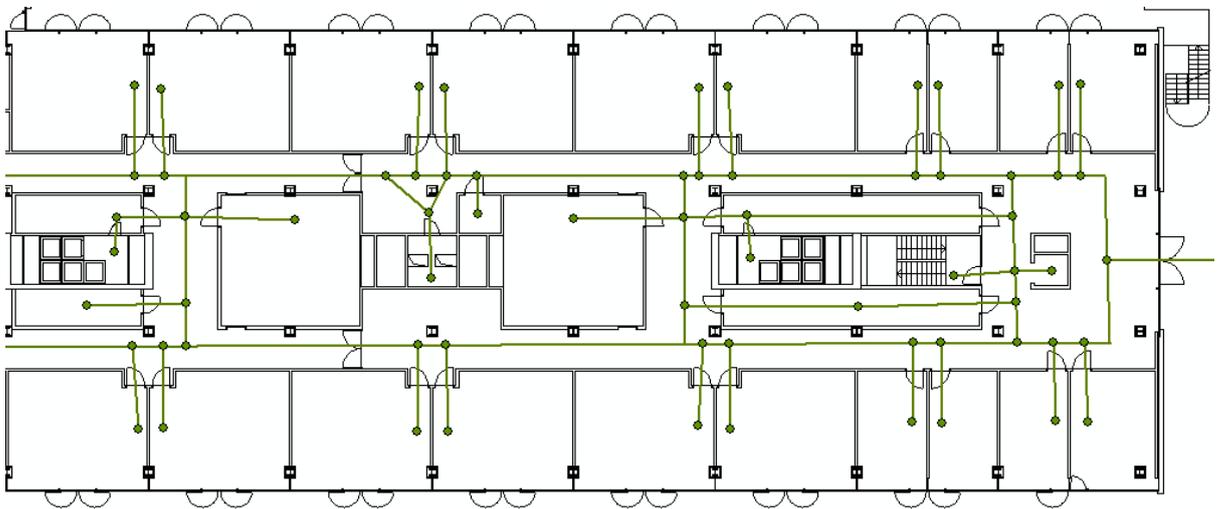


Abbildung 23: Das Korridor-Modell M1 (grün) in der Korridor-Umgebung (U1).

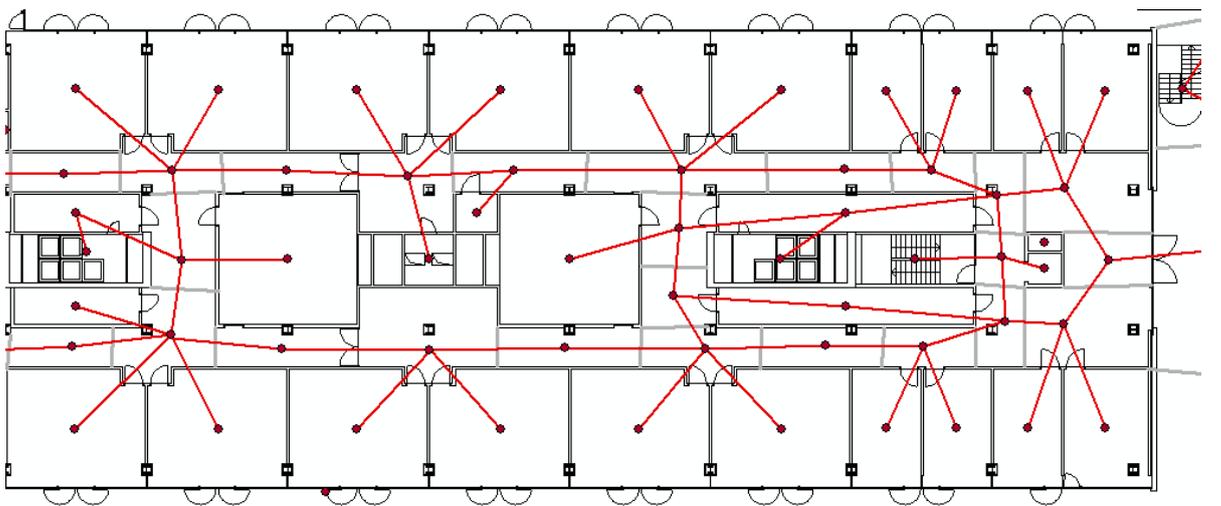


Abbildung 24: Das Zell-Modell M2 (rot) in der Korridor-Umgebung (U1).

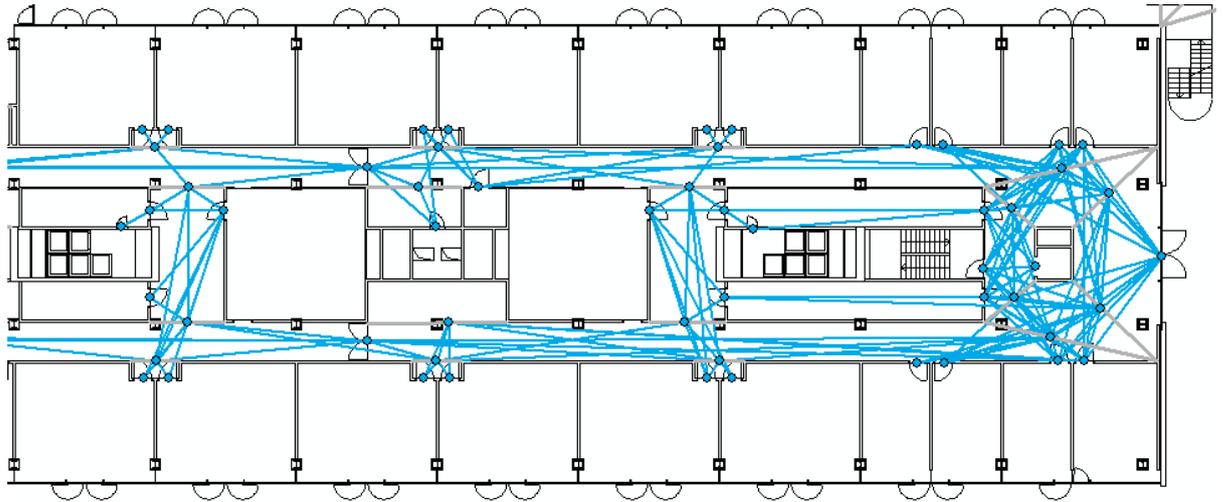


Abbildung 25: Das Sichtbarkeits-Modell M3 (blau) in der Korridor-Umgebung (U1).

In der Testumgebung der Freiflächen (U2) sehen die drei Netzwerkmodelle folgendermassen aus:

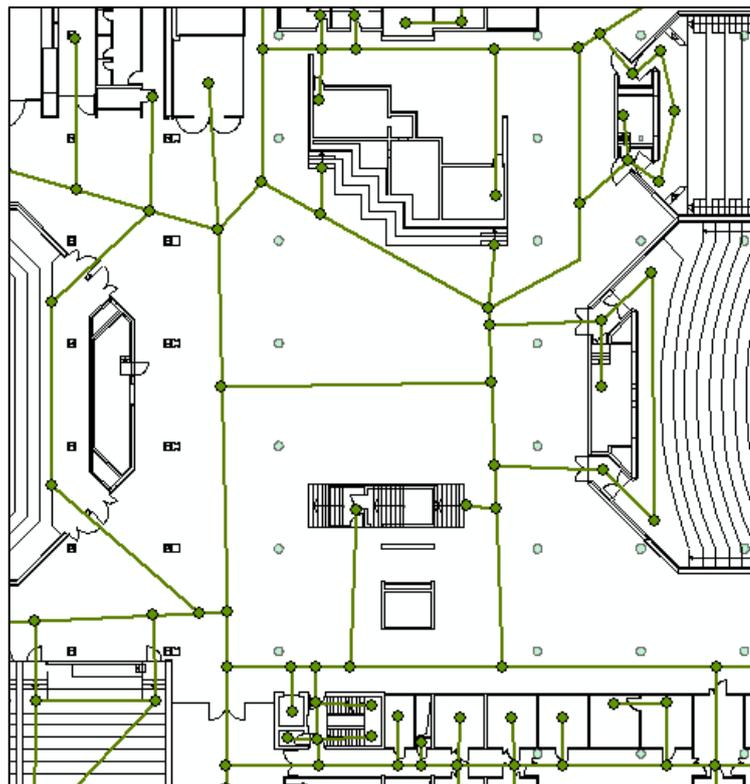


Abbildung 26: Das Korridor-Modell M1 (grün) in der Freiflächen-Umgebung (U2).

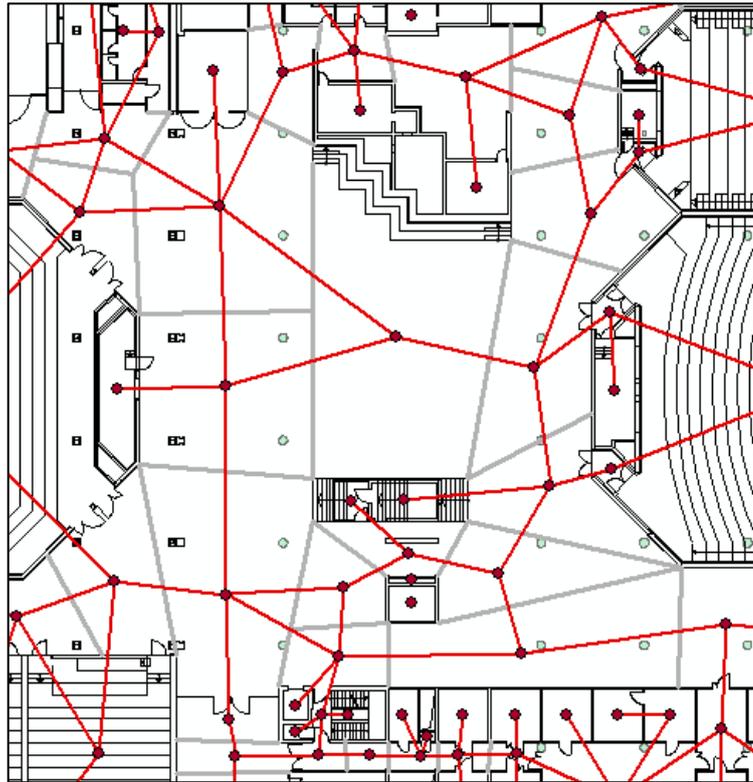


Abbildung 27: Das Zell-Modell M2 (rot) in der Freiflächen-Umgebung (U2).



Abbildung 28: Das Sichtbarkeits-Modell M3 (blau) in der Freiflächen-Umgebung (U2).

In der Testumgebung U3 sehen die drei Netzwerkmodelle folgendermassen aus:

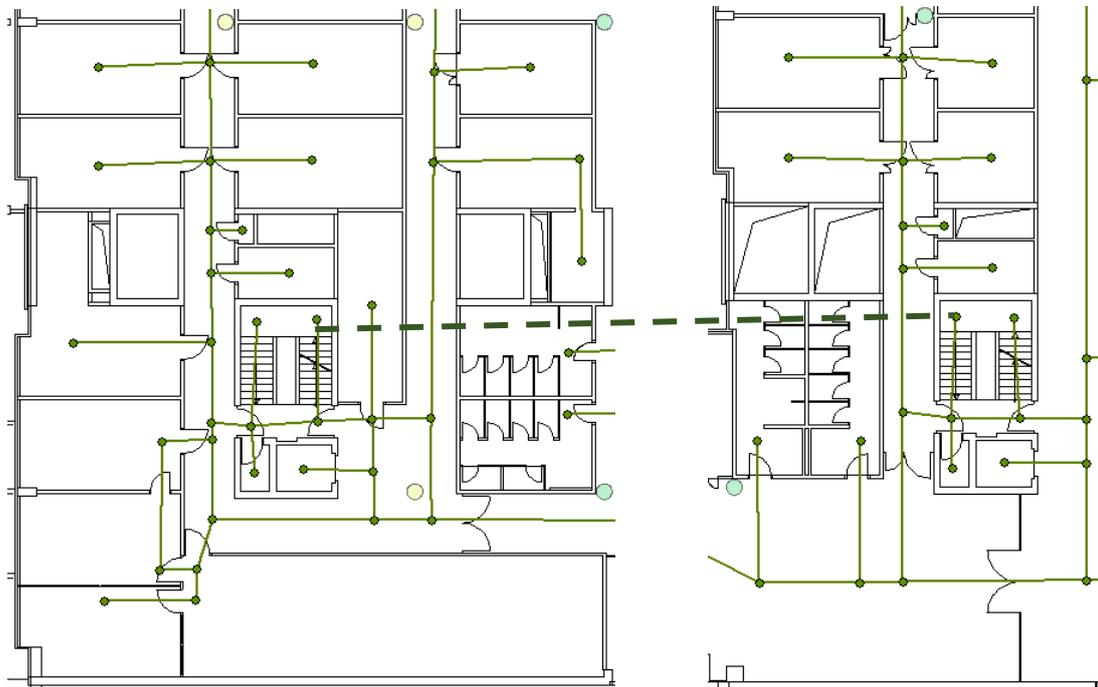


Abbildung 29: Das Korridor-Modell M1 (grün) in der Treppen-Umgebung (U3) im unteren Stockwerk (links) und oberen Stockwerk (rechts) mit einer Vertikalverbindung.

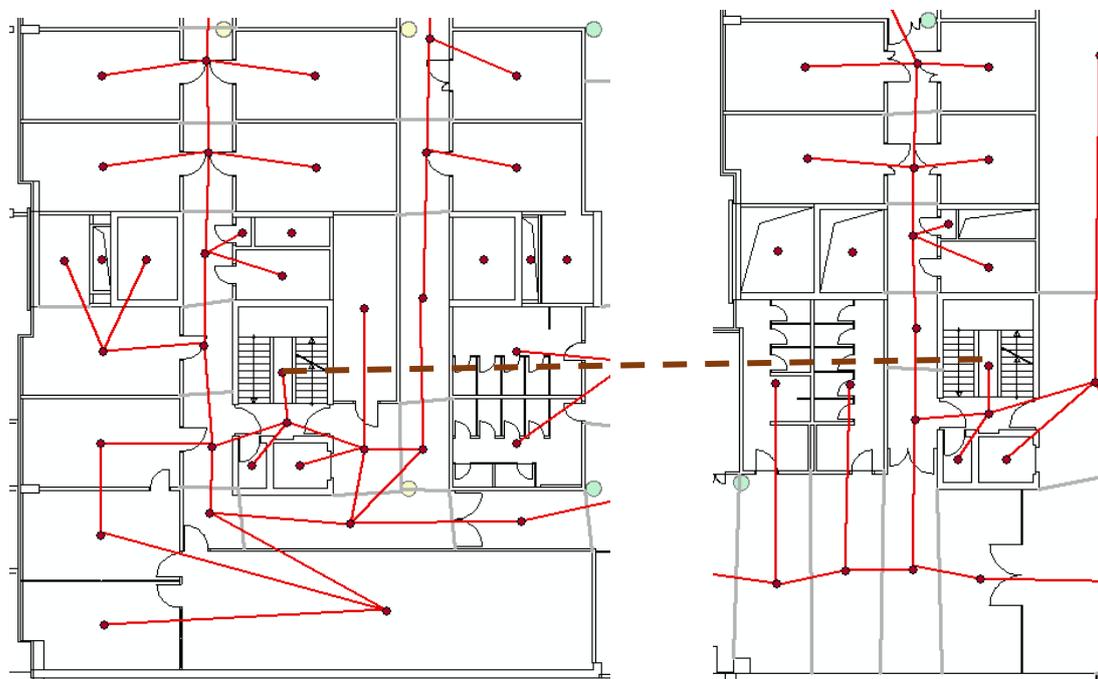


Abbildung 30: Das Zell-Modell M2 (rot) in der Treppen-Umgebung (U3) im unteren Stockwerk (links) und oberen Stockwerk (rechts) mit einer Vertikalverbindung.

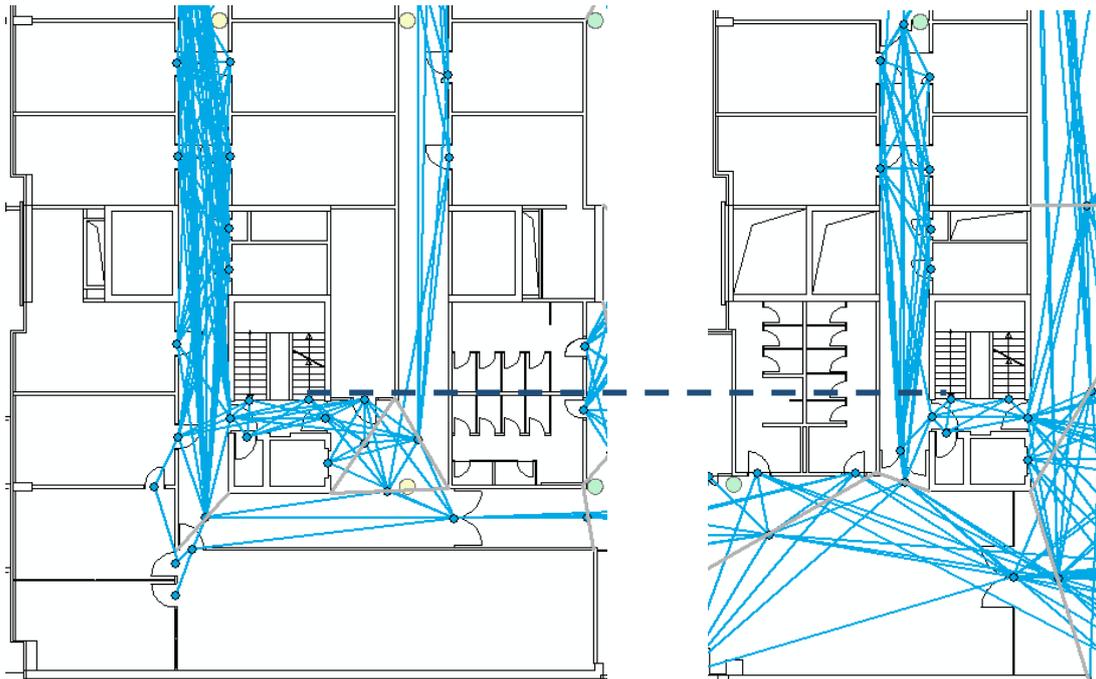


Abbildung 31: Das Sichtbarkeits-Modell M3 (blau) in der Treppen-Umgebung (U3) im unteren Stockwerk (links) und oberen Stockwerk (rechts) mit einer Vertikalverbindung.

4.4.1 Modellierungsaufwand (A1)

Erläuterungen für Modellierungsmöglichkeiten von Freiflächen, Korridoren und Treppen bzw. Aufzügen sind im Kapitel 2.5 nachzulesen. Folgend werden die wichtigsten Erkenntnisse in Bezug auf den Modellierungsvorgang zusammengefasst.

Beim Korridor-Netzwerkmodell (M1) besteht das Hauptproblem bei der Definition eines Korridors. Die Definition von einem Korridor ist nicht eindeutig, weshalb die Korridore manuell gewählt werden müssen. Dieser manuelle Arbeitsschritt und die ungenaue Definition eines Korridors haben zudem zur Folge, dass die Erzeugung des Graphen nicht reproduzierbar ist, da ein anderer Konstrukteur möglicherweise andere Korridore wählt. In Abbildung 32 ist ein Raum farblich hervorgehoben, bei dem es nicht ganz eindeutig ist, ob er als Korridor oder als Raum definiert werden soll. Sobald die Korridore definiert sind, ist die Erzeugung des Graphen mittels der Mittelachsentransformation (MAT) relativ einfach, da diese Methode weit verbreitet ist und auch schon in vielen Umgebungen implementiert ist. Zudem ist die Darstellung von Korridoren sehr realistisch. Die Projizierung der Türpunkte auf die Mittelachse des Korridors kann automatisiert werden, falls die Positionen der Türen als Punkte vorhanden sind. Auch die Berechnung des Zentrums eines Raumes stellt keine Probleme dar. Das Modell ist hingegen für die Erzeugung des Netzwerkes auf Freiflächen nicht geeignet (Xu et al. 2016), da nicht der ganze Raum erschlossen wird (Kruminaite 2014) und dadurch die Darstellung auf den Nutzer unnatürlich wirkt. Die Modellierung von Treppen und Aufzügen wird nicht beschrieben.

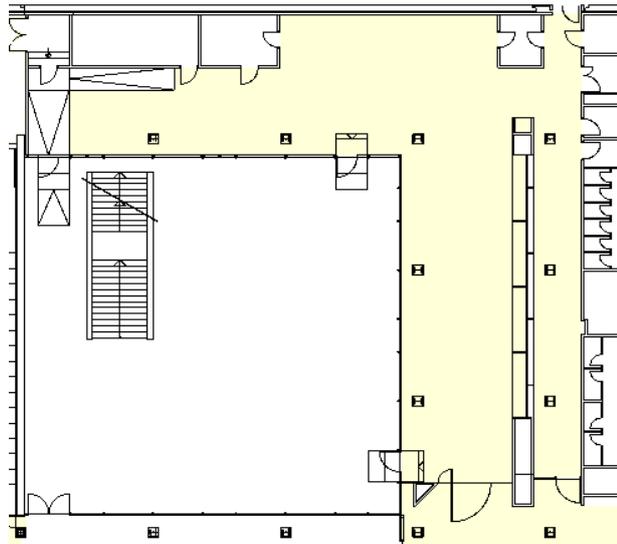


Abbildung 32: Die Definition eines Korridors ist nicht eindeutig. Die hier farblich hervorgehobene Fläche könnte sowohl als Raum, wie auch als Korridor ausgedeutet werden.

Der Modellierungsaufwand beim Zell-Netzwerkmodell (M2) ist relativ gross, da alle Zellen manuell gewählt werden müssen, da die Zelleinteilung nicht automatisiert werden kann. Auch hier ist die Erzeugung des Graphen nicht reproduzierbar, da ein anderer Konstrukteur möglicherweise eine andere Zellaufteilung wählt und dies kein einheitliches Verfahren ist, da die Bestimmung einer Zelle unklar ist. Einzig die Darstellung von geschlossenen Räumen durch den Mittelpunkt ist einfach zu automatisieren. Die Korridore werden manuell in Zellen unterteilt, sodass jeder Zugang einer Zelle zugeordnet werden kann. Dies ermöglicht eine realistische Modellierung. Die Unterteilung von Freiflächen aufgrund ihrer Nutzung in Zellen, wie auch eine Unterteilung mittels CDT ermöglichen eine nutzerfreundliche Darstellung der Freiflächen im Netzwerk. Treppen und Aufzüge werden ebenfalls nicht durch ihre Geometrie, sondern durch ihre Funktion definiert. Diese Einbindung der Semantik zeugt von einer adäquaten Abbildung des Objektes im Netzwerk. Es ist jedoch nicht abschliessend geklärt, ob der Zugang zu einer Treppe automatisch erkannt werden kann. In der Abbildung 33 ist eine Treppe zu sehen, die relativ komplex aufgebaut ist und die Zugangspunkte zur Treppe möglicherweise manuell erfasst werden muss.

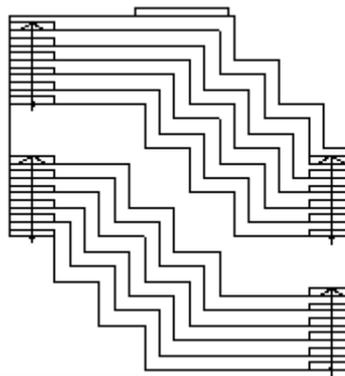


Abbildung 33: Komplexe Treppe, bei der die Zugänge möglicherweise nicht automatisch erkannt werden können.

Der Modellierungsaufwand des Sichtbarkeits-Netzwerkmodells (M3) ist relativ gering, da vieles automatisiert werden kann. Als Input braucht man lediglich die Raumpolygone auf dem 2D-Plan und die Position der Türen und Durchgängen. Auf der Grundlage dieser Daten kann die automatisierte Triangulation oder auch eine andere automatisierte Unterteilung in konvexe Polygone erfolgen. Auch

das Absetzen der Punkte auf den offenen Grenzen der erzeugten Zellen stellt kein Problem dar. Beim Sichtbarkeits-Netzwerkmodell werden Korridore aufgrund ihrer einfachen Formen in nur wenige konvexe Zellen unterteilt, was einer realistischen Darstellung eines Korridors behilflich ist. Je komplexer eine Form ist, desto deutlicher und realistischer wird der Graph erzeugt. Dies hat vor allem auf komplexen Freiflächen Vorteile, wo die feine Unterteilung der Routenberechnung und -beschreibung dient. Die Modellierung von Treppen und Aufzügen wird nicht beschrieben. In Tabelle 4 sind die hier aufgeführten Erkenntnisse kurz zusammengefasst.

Tabelle 4: Übersicht der Ergebnisse des Vergleichs der Netzwerkmodelle in Bezug auf den Modellierungsaufwand.

	KORRIDORE	FREIFLÄCHEN	TREPPEN
M1	<ul style="list-style-type: none"> – Sind definiert – Automatische Generation durch MAT – Realistische Darstellung 	<ul style="list-style-type: none"> – Nicht explizit definiert, aber automatische Generation durch MAT möglich – Unrealistische Darstellung, da nicht die ganze Fläche erschlossen wird 	<ul style="list-style-type: none"> – Nicht definiert
M2	<ul style="list-style-type: none"> – Sind definiert – Manuelle Unterteilung in Zellen – Realistische Darstellung 	<ul style="list-style-type: none"> – Definiert durch Funktion (manuelle Erfassung) oder Generation durch CDT – Darstellung stark von der Zellenwahl abhängig 	<ul style="list-style-type: none"> – Durch die Funktion definiert – Manuelle Erfassung – Adäquate Darstellung
M3	<ul style="list-style-type: none"> – Sind definiert – Automatische Generation – Realistische, aber komplexe Pfade 	<ul style="list-style-type: none"> – Sind definiert – Automatische Generation – Realistische Pfade 	<ul style="list-style-type: none"> – Nicht explizit definiert

4.4.2 Komplexität (A2)

Die Komplexität wird anhand des ersten Stockwerkes der Testumgebung U3 (Abbildung 34, mit Fotos in Abbildung 35) überprüft. Dieser Ausschnitt eignet sich für den Vergleich, weil er einen nicht überaus komplexen Gebäudeausschnitt zeigt und ein wiederkehrendes Muster in den Gebäuden des Campus darstellt.

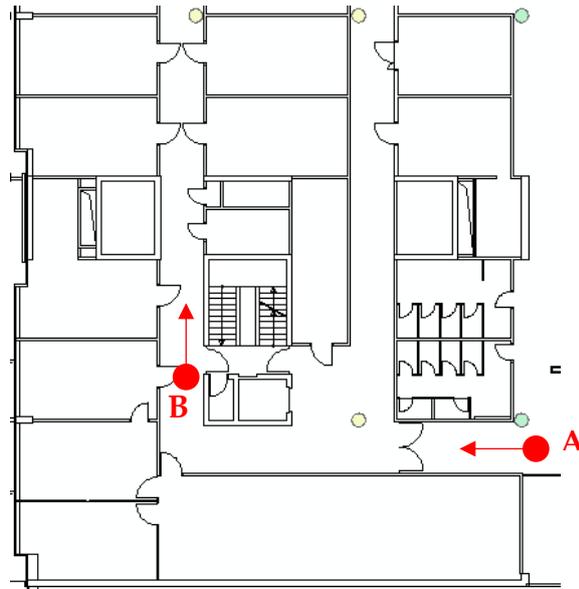


Abbildung 34: Planausschnitt der Vergleichsumgebung in Bezug auf die Komplexität mit den Standorten der Bildaufnahmen (rot).

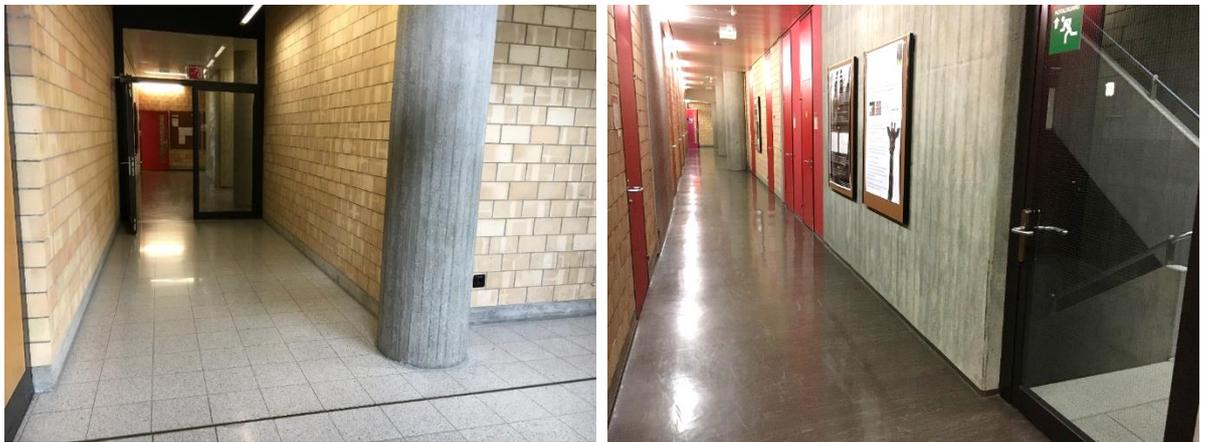


Abbildung 35: Foto vom Standort A (links) und vom Standort B (rechts) aus.

Auf der Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38 sind die drei Netzwerkmodelle in der oben beschriebenen Umgebung modelliert. Dabei ist neben der Anzahl der Linien und Punkte auch deutlich sichtbar, dass im Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (M3) komplexe Entscheidungspunkte vorzufinden sind.

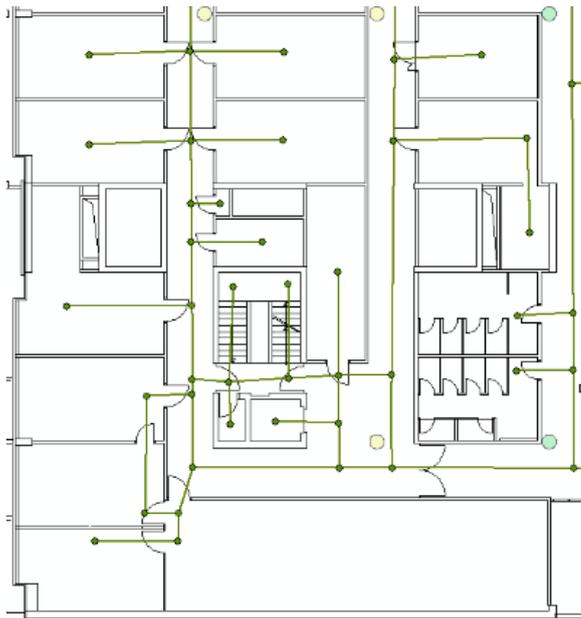


Abbildung 36: Komplexität des Korridor-Netzwerkmodells (grün).

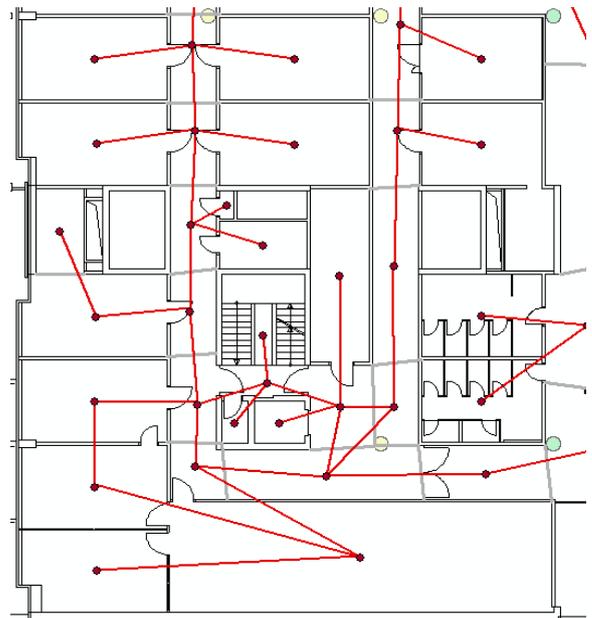


Abbildung 37: Komplexität des Zell-Netzwerkmodells (rot).



Abbildung 38: Komplexität des Sichtbarkeits-Netzwerkmodells (blau).

Das Netzwerkmodell 3 hat aufgrund der Anzahl Linien eine deutlich höhere Komplexität als die Netzwerkmodelle 1 und 2. Dadurch, dass alle Punkte, die von einem Punkt aus sichtbar sind, mit Linien verbunden werden, ergibt es eine deutlich grössere Anzahl Linien als in den Modellen 1 und 2. Die Netzwerkmodelle 1 und 2 haben eine ähnliche Komplexität, da die Räume durch Punkte dargestellt werden und mit Punkten im Korridor assoziiert werden. Die grössere Komplexität vom Netzwerkmodell 3 macht sich vor allem bei Korridoren mit vielen Zugangspunkten bemerkbar (Abbildung 39). Während in den Modellen 1 und 2 die Korridore abstrahiert werden und vereinfacht werden, werden bei Sichtbarkeits-Modell (M3) alle möglichen direkten Verbindungen ins Modell eingefügt, was zu dieser grossen Anzahl Linien führt.

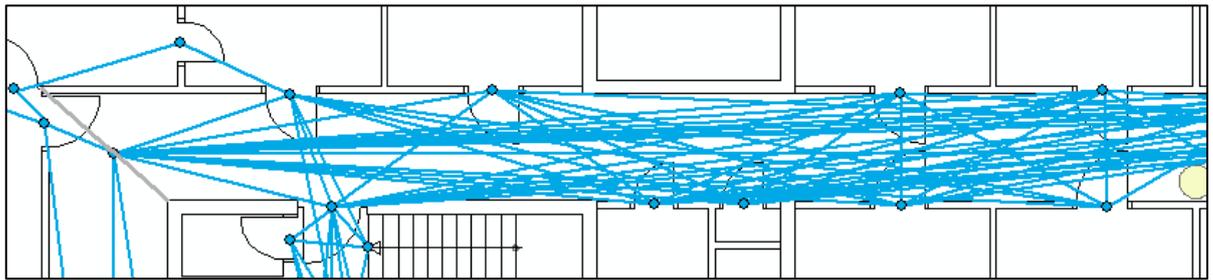


Abbildung 39: Darstellung eines Korridors mit den Sichtlinien (blau) des Sichtbarkeits-Netzwerkmodells (M3).

In den Netzwerkmodellen 1 und 2 sind relativ einfache Verzweigungen vorzufinden, während es im Netzwerkmodell 3 deutlich komplexere Verzweigungen mit bis zu 15 Linien, bzw. Abzweigungsmöglichkeiten, gibt. Dies ist auch deutlich an folgendem Beispiel zu erkennen (Abbildung 40). Beim Zimmer oben rechts in der Testumgebung hat man beim Netzwerkmodell 1 und 2 drei Möglichkeiten beim Verlassen des Zimmers: Man kann geradeaus ins nächste Zimmer gehen oder links oder rechts abbiegen und dem Korridor folgen. Beim Netzwerkmodell 3 hingegen gibt es 8 Abbiegungsmöglichkeiten, da 8 verschiedene Zugangspunkte zum Korridor von dieser Türe aus sichtbar sind. Bei einer allfälligen Routenbeschreibung müssten nun diese acht verschiedenen Richtungen differenziert werden können um dem Nutzer eine sinnvolle Anweisung zu geben.

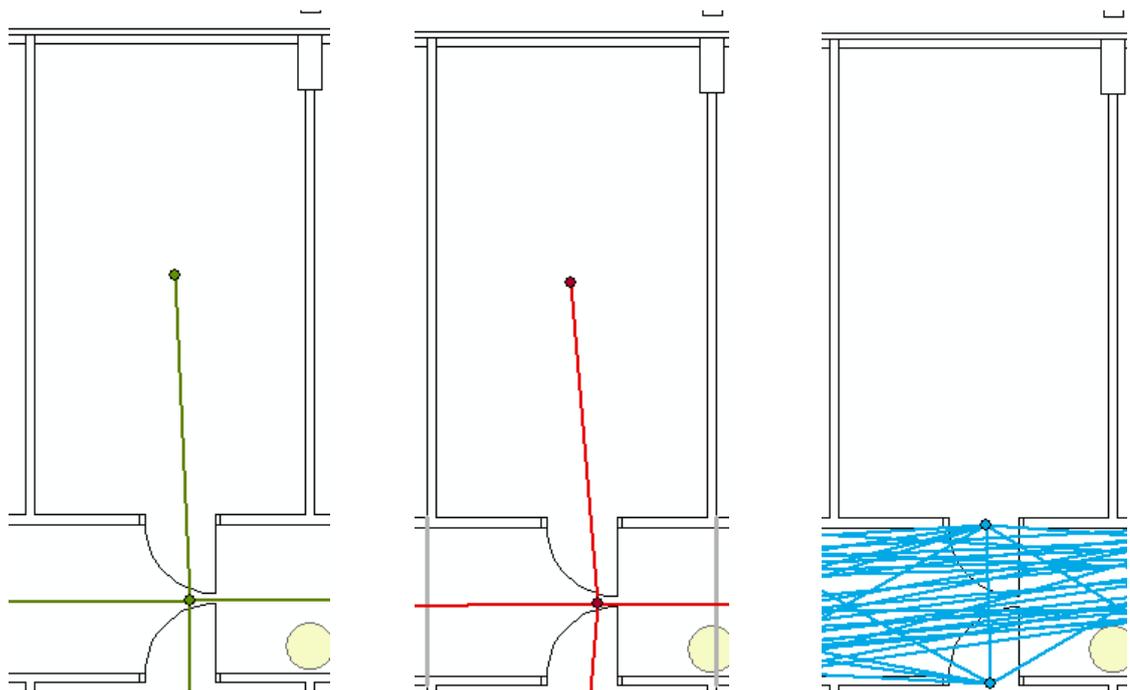


Abbildung 40: Abbiegungsmöglichkeiten beim Verlassen eines Zimmers in den drei verschiedenen Netzwerkmodellen.

Die Komplexität des Netzwerkmodells lässt sich schlussendlich anhand der Anzahl Linien und Punkte verdeutlichen. Vergleicht man die drei Netzwerkmodelle in der Testumgebung (Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38), kann man folgende Anzahl Punkte und Linien feststellen (Tabelle 5):

Tabelle 5: Übersicht der Anzahl Punkte und Linien je Netzwerkmodell.

	M1	M2	M3
PUNKTE	43	34	31
LINIEN	26	39	154

Das Netzwerkmodell M1 und M2 haben somit eine ähnliche Komplexität, wobei M2 minimal mehr Speicherkapazität braucht. Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell hingegen hat aufgrund der Anzahl Linien eine deutlich höhere Komplexität, obwohl sich die Anzahl Punkte in Grenzen hält.

4.4.3 Semantik (A3)

Dadurch, dass das Korridor-Netzwerkmodell ein geometrisches Netzwerk ist, werden die Geometrien im Netzwerkmodell wiedergegeben und kann entsprechend benannt werden. So wird z.B. jeder Raum, jeder Aufzug und jede Treppe durch Punkte dargestellt. Diese Punkte können mit Attributen ausgestattet werden, welche die Bedeutung des Punktes speichern.

Auch das Zell-Netzwerkmodell hat Züge eines geometrischen Netzwerkmodells, wodurch auch hier die Attribute eines Raumes zum entsprechenden Punkt abgespeichert werden können.

Die Handhabung der Semantik ist hingegen beim Sichtbarkeits-Netzwerkmodell deutlich schwieriger, denn die geometrischen Objekte werden nicht immer durch Punkte oder Linien dargestellt. Linien widerspiegeln grundsätzlich nur die Sichtbarkeit, die nicht weiter attribuiert werden soll. Zudem wird ein Raum mit dem gleichen Punkt, der die Türe zum Raum verkörpert, dargestellt. Das heisst, dass ein Punkt bei einer Türe grundsätzlich zwei Räumen, also dem Raum selbst und dem Korridor zugewiesen werden kann. Ausserdem ist eine Raumzuteilung zu einem Punkt nicht eindeutig, wie man dies in der Abbildung 41 sehen kann, wo einem kleinen Raum zwei Punkte zugeordnet sind, welche von völlig unterschiedlichen Linien angesteuert werden. Dies kann beim Routenbeschrieb zu Problemen führen und erschwert die Semantik. Des Weiteren wird eine Türe mit mehreren Räumen assoziiert. Das verursacht z.B. Probleme, da man nicht definieren kann, ob man noch durch die Türe gehen muss, um in einen bestimmten Raum zu kommen, oder ob man sich schon in diesem Raum befindet.

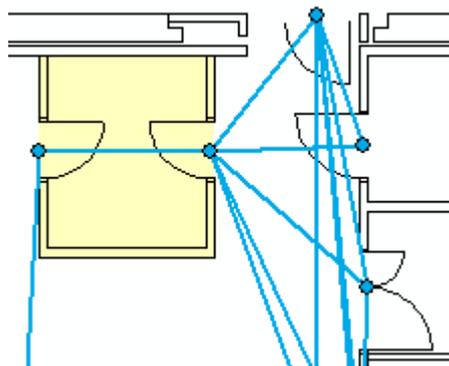


Abbildung 41: Dem farblich hervorgehobenen Raum können zwei Punkte zugewiesen werden.

Da in allen drei Netzwerkmodellen Zugänge zu Räumen entweder durch Linien oder Punkte dargestellt werden, ist es bei allen drei Netzwerkmodellen möglich, die Zugänge zu Räumen zu attributieren. Mögliche Attribute sind z.B. die Rollstuhlgängigkeit oder eine beschränkte Zugänglichkeit in Abhängigkeit der Funktion der navigierenden Person.

4.5 Beurteilung der Netzwerkmodelle anhand von routingorientierten Anforderungen

Die drei Netzwerkmodelle werden nun auf die zuvor beschriebenen routingorientierten Anforderungen geprüft. Zur Bewertung werden alle drei Routing-Algorithmen in den drei verschiedenen Situationen für alle drei Netzwerkmodelle modelliert. Die Abbildungen der modellierten Graphen und Pfade sind im Anhang II.a ersichtlich. Im folgenden Kapitel wird auf diese modellierten Pfade und Ausschnitte aus den Abbildungen im Anhang II.a eingegangen.

In der Tabelle 6 sind die Eigenschaften dieser modellierten Pfade in den verschiedenen Umgebungen im Anhang II.a zusammengefasst.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Eigenschaften des modellierten Wegs in den verschiedenen Netzwerkmodellen in verschiedenen Umgebungen.

Umgebung	Kriterium	M1	M2	M3
Korridor-Umgebung (U1)	Länge des Pfades R1*	40 m	41 m	36 m
	Anzahl geschnittene Wände bei R1	0	2	0
	Anzahl Abbiegungen bei R2	4	4	2
	Komplexität des Pfades** bei R3	17	17	21
Freiflächen-Umgebung (U2)	Länge des Pfades R1*	68 m	67 m	50 m
	Anzahl geschnittene Wände bei R1	0	0	0
	Anzahl Abbiegungen bei R2	2	2	0
	Komplexität des Pfades** bei R3	11	9	0
Treppen-Umgebung (U3)	Länge des Pfades R1*	29 m	26 m	16 m
	Anzahl geschnittene Wände bei R1	0	1	0
	Anzahl Abbiegungen bei R2	7	8	3
	Komplexität des Pfades** bei R3	20	19	27

* Länge des Pfades ab dem Verlassen des Start-Raums

** L-Turn und geradeaus = 1 Punkt, T-Turn = 2 Punkte, Abzweigung = 3 Punkte, sonst Anzahl Linien beim Entscheidungspunkt

Dabei soll noch eine wichtige Erkenntnis, die nicht direkt aus der Tabelle 6 herauslesbar ist, mit der Abbildung 42 und Abbildung 43 unterstrichen werden. Der gleiche Algorithmus, der den kürzesten Weg in der gleichen Korridor-Umgebung berechnet, führt je nach Netzwerkmodell zu einem anderen Resultat. Daher ist die Wahl des Netzwerkmodells sehr wichtig, da es den resultierenden Pfad stark beeinflusst.

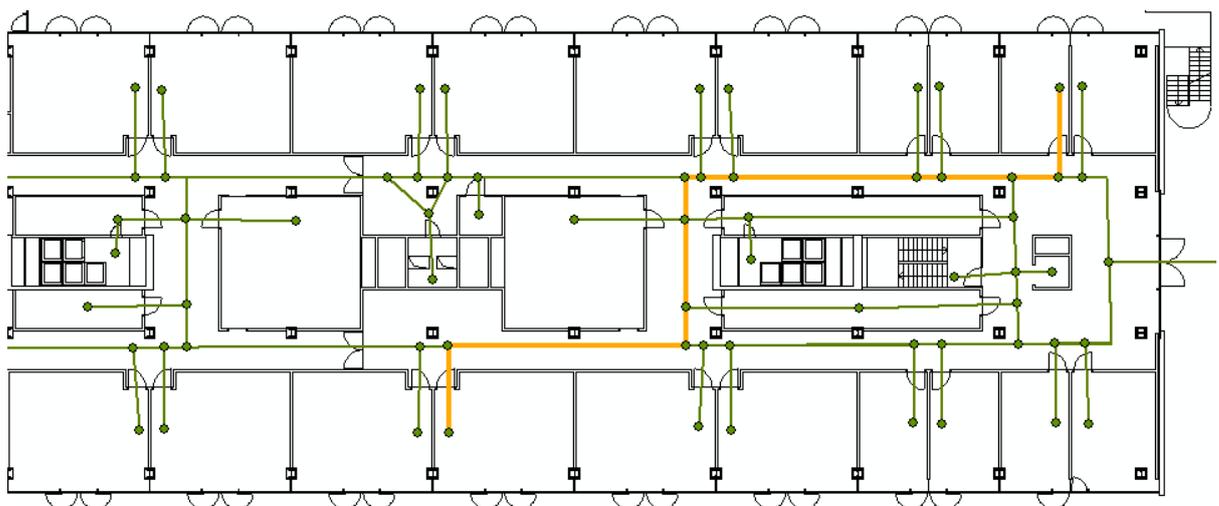


Abbildung 42: Der kürzeste Weg (orange) im Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Korridor-Umgebung.

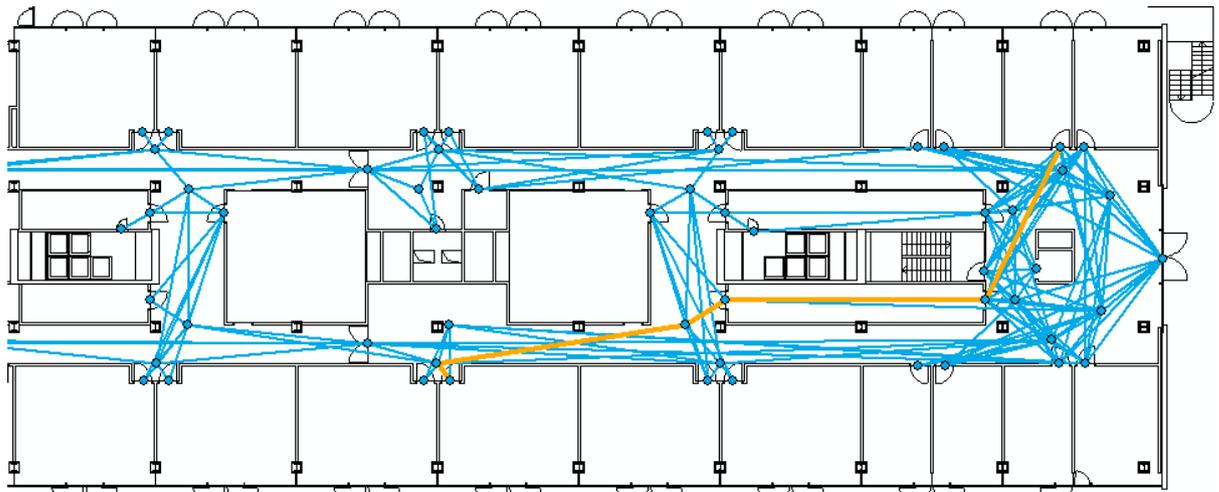


Abbildung 43: Der kürzeste Weg (orange) im Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Korridor-Umgebung.

4.5.1 Realitätsbezug (A4)

Um den Realitätsbezug der verschiedenen Netzwerkmodelle zu prüfen, wurde einerseits die Länge des modellierten Pfades, sowie die Anzahl der geschnittenen Wände ermittelt.

Gerade in Korridoren ist der modellierte Pfad im Korridor-Netzwerkmodell vergleichbar mit Pfaden, wie man sie im Strassennetzwerk in der Outdoor-Navigation kennt. Dieses Netzwerkmodell M1 bekundet aber grosse Probleme bei Freiflächen, wie man dies in der Abbildung 44 sehen kann. Da einige Teile einer Teilfläche nicht erschlossen werden und allgemein auf Freiflächen nur wenige Pfade modelliert werden, erscheint der Pfad meistens sehr unnatürlich. Auch aufgrund dieser unnatürlichen Pfade, die vor allem auf Freiflächen entstehen, generiert das Korridor-Netzwerkmodell eher lange Pfade im Vergleich mit den anderen Netzwerkmodellen.

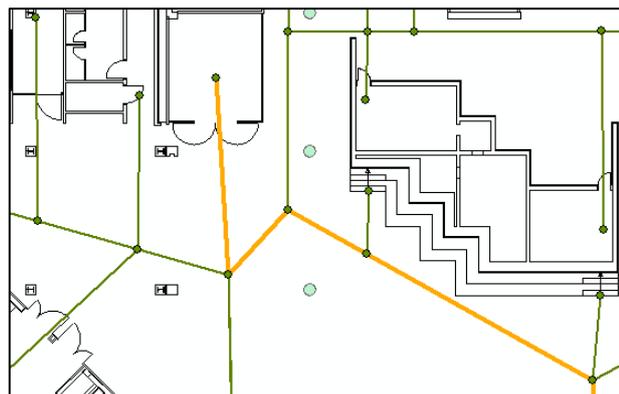


Abbildung 44: Der Routing-Algorithmus R1 (orange) generiert eine unnatürliche Route im Netzwerkmodell M1, da nicht alle Teile der Freifläche erschlossen sind.

Das Zell-Netzwerkmodell generiert mit dem Routing-Algorithmus R1 ähnlich lange Pfade, wie das Korridor-Netzwerkmodell. Doch auch dieses Netzwerkmodell weist Probleme auf Freiflächen auf. Aufgrund der manuellen Einteilung in Zellen können unnatürliche Pfade entstehen, wo ein Nutzer üblicherweise einen direkteren Pfad wählen würde. Dieses Problem ist gut in der Abbildung 45 sichtbar, wo der Pfad des Routing-Algorithmus ein unregelmässiges-Muster aufweist, anstatt den direkten Weg zum nächsten Punkt zu gehen.

In Korridoren und bei Treppen werden die Pfade des Routing-Algorithmus R1 im Zell-Netzwerkmodell aber sehr natürlich erzeugt und entsprechen der natürlichen Routenwahl eines Nutzers.

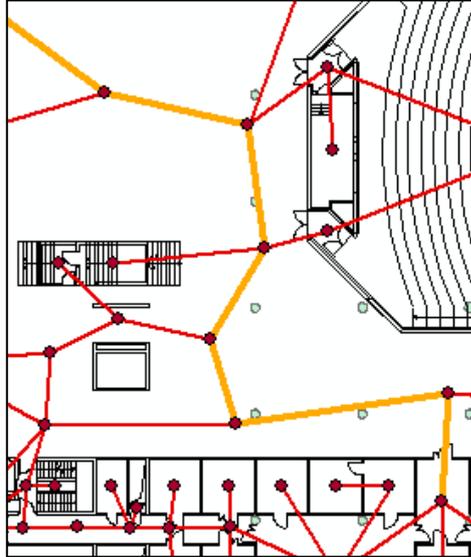


Abbildung 45: Der kürzeste Weg (orange) im Zell-Netzwerkmodell (rot) generiert auf Freiflächen längere Umwege.

Da das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell sehr direkte Linien wählt, waren die Pfadlängen des Routing-Algorithmus R1 in diesem Netzwerkmodell jeweils am kürzesten und somit hat das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell in diesem Faktor die besten Ergebnisse geliefert. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass in der Realität nicht immer die direkteste Linie vom Nutzer gewählt wird, möglicherweise wird er von der Geometrie des Gebäudes gesteuert. Diese Tatsache ist in der Korridor-Umgebung gut zu sehen. Der kürzeste Weg führt dort durch einen Raum, der parallel zum eigentlichen Korridor verläuft (Abbildung 46). Nutzer betreten einen Raum allerdings nur, wenn dieser Raum das Ziel ist, oder wenn es keinen anderen Weg gibt. Natürlicherweise lässt man sich vom Korridor leiten und folgt diesem.

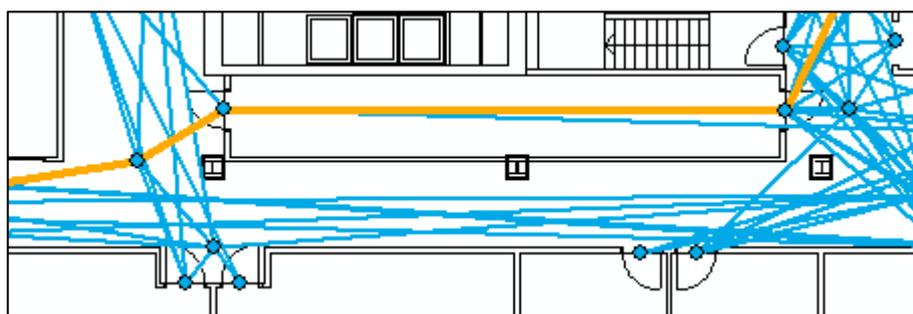


Abbildung 46: Der kürzeste Weg R1 im Sichtbarkeits-Netzwerkmodell M3 in der Korridor-Umgebung.

Der Pfad des Routing-Algorithmus R1 hat sowohl im Sichtbarkeits-Netzwerkmodell, wie auch im Korridor-Netzwerkmodell keine Wände geschnitten, denn bei beiden Netzwerkmodellen werden Geometrien des Gebäudes berücksichtigt, es sind bekanntlich auch geometrische Netzwerkmodelle. Zudem kommen im Sichtbarkeits-Netzwerkmodell Linien, welche die Wände schneiden, per Definition nicht vor.

Beim Zell-Netzwerkmodell (M2) werden nicht die Geometrien direkt, sondern die Raumeinheiten im Modell wiedergegeben. Dies ist besonders in offenen Räumen ein grosser Vorteil. Allerdings werden teilweise Wände geschnitten, da die Zellen durch den Zentrumspunkt repräsentiert werden und die

Verbindungslinien zu den benachbarten Zellen eventuell nicht dem Korridor entlang oder durch die Türe gehen, sondern eine Wand schneiden (Abbildung 47).

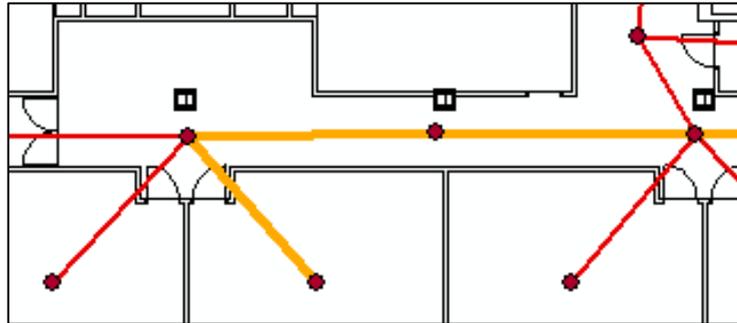


Abbildung 47: Beim Zell-Netzwerkmodell (rot) schneiden die generierten Routen (orange) teilweise die Wände.

Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell ermöglicht sehr realistische Darstellungen von Pfaden, da bei diesem Netzwerkmodell die Linien sehr direkt von einem Entscheidungspunkt zum nächsten Punkt gesetzt werden. Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell generiert in allen drei Testumgebungen deutlich kürzere Wege als die anderen Netzwerkmodelle. Die anderen beiden Netzwerkmodelle generieren ebenfalls natürliche Pfade, wobei aber beide Netzwerkmodelle auf Freiflächen Probleme aufweisen bei der Wahl des kürzesten Weges. Zudem schneidet das Zell-Netzwerkmodell oft Wände.

Für die Berechnung des kürzesten Weges ist also grundsätzlich das Sichtbarkeits-, wie auch das Korridor-Netzwerkmodell geeignet.

4.5.2 Abbiegungserkennung (A5)

Grundsätzlich kann in allen Netzwerkmodellen der Abbiegungswinkel berechnet werden und dadurch eine Abbiegung erkannt werden. Daher funktioniert der Routing-Algorithmus R2 in allen Netzwerkmodellen. Betrachtet man aber die generierten Pfade im Anhang II.a, so sind Unterschiede erkennbar.

Im Korridor-Netzwerkmodell (M1) ist speziell in offenen Räumen die Erkennung von Abbiegungen schwierig und stark vom Abstraktionsniveau abhängig. Oft werden grosse Umwege gemacht, da sich diese Umwege durch weniger Abbiegungen auszeichnen, wie in Abbildung 48 ersichtlich ist.

Dieses Phänomen ist auch beim Zell-Netzwerkmodell (M2) erkennbar. Auch hier entstehen unnatürliche Abbiegungen aufgrund der Zelleinteilung und sind stark davon abhängig, wie die Zellen gewählt werden.

Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (M3) kann durch eher flache Winkel und direkte Wege charakterisiert werden. Durch diese flachen Winkel werden aber möglicherweise Abbiegungen übersehen (Abbildung 49). Dies könnte aber durch einen etwas strengeren Grenzwert für den Winkel, der als Abbiegung zählt, minimiert werden.

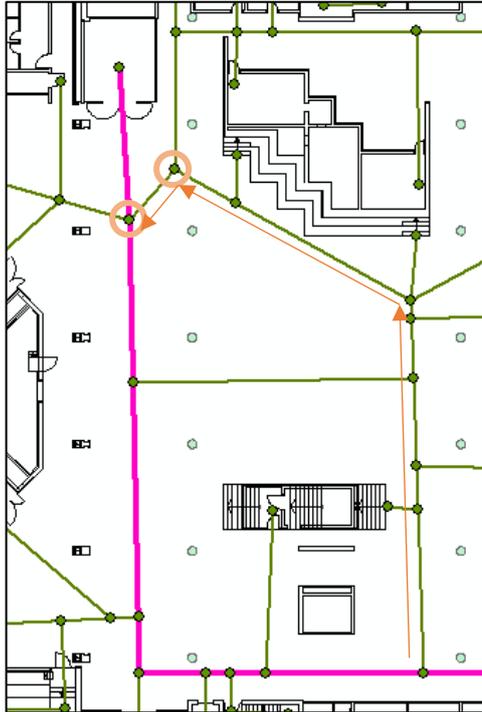


Abbildung 48: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) erkennt Abbiegungen, die von einem Nutzer so nicht wahrgenommen werden würden (orange Kreise). Deshalb wählt der Abbiegungsalgorithmus einen längeren Weg (pink), als die direktere Alternative (orange).

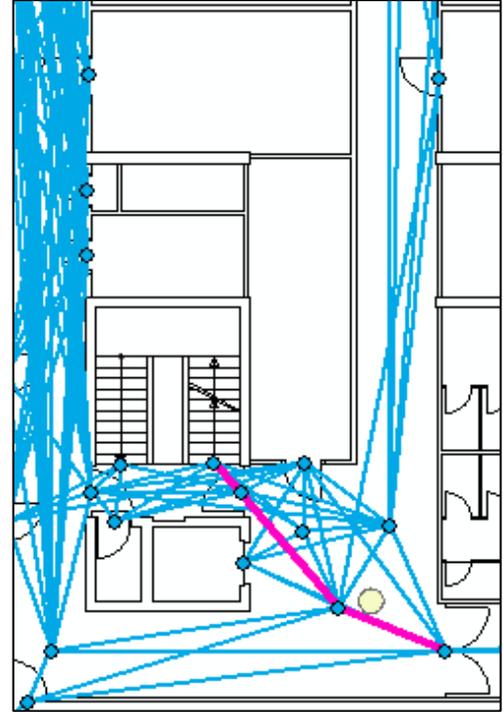


Abbildung 49: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) erkennt hier keine Abbiegung mit dem Abbiegungsalgorithmus (pink), obwohl dieser Pfad von einem Nutzer möglicherweise als eine Abbiegung wahrgenommen wird.

4.5.3 Abzweigungskategorisierung (A6)

Das Korridor-Netzwerkmodell (M1) scheint gut geeignet zu sein für die Abzweigungskategorisierung, da die möglichen Pfade stark abstrahiert dargestellt werden und so einfache Verzweigungen entstehen. Durch die rechtwinklige Projektion der Türen auf die Mittelachse des Korridors entstehen zudem für das Netzwerkmodell typische Verzweigungen, die gut kategorisiert werden können.

Die Abzweigungskategorisierung beim Zell-Netzwerkmodell (M2) ist etwas schwieriger umzusetzen. Je nach Grösse der Zelle geht der geometrische Bezug des Netzwerkmodells verloren und dadurch entstehen komplexe und unnatürliche Verzweigungen, die vom Nutzer so nicht wahrgenommen werden. Dieses Phänomen ist gut erkennbar in der Abbildung 50. Während der Pfad im Zell-Netzwerkmodell eine relativ komplexe Verzweigung passiert, die dadurch entsteht, dass die Zugänge zu den Türen in der Abzweigung miteinbezogen werden, passiert der Pfad im Korridor-Netzwerkmodell eine deutlich einfachere Abzweigung, die sich nur durch eine Abbiegung nach oben charakterisieren lässt, ohne den Einbezug von weiteren Abbiegungsmöglichkeiten, welche geometrisch erst später folgen.

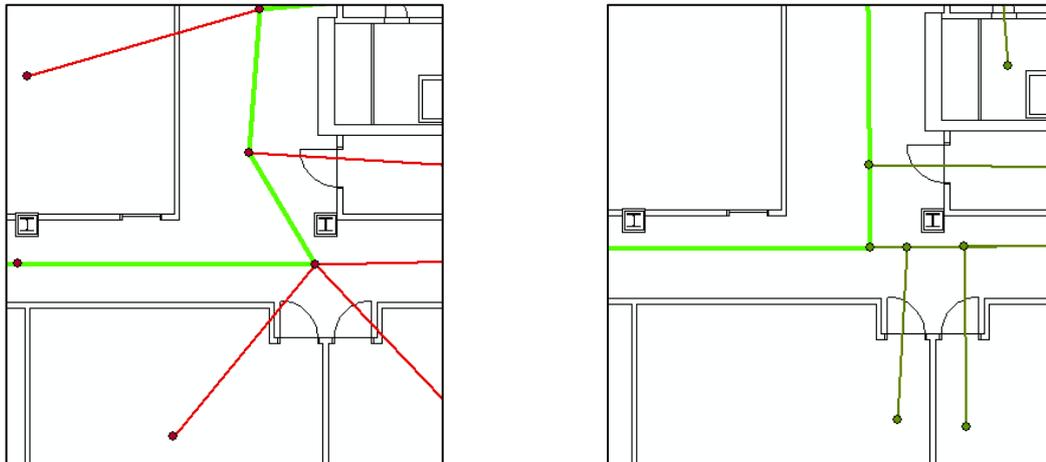


Abbildung 50: Vergleich des einfachsten Wegs (hellgrün) im Zell-Netzwerkmodell (rot, links) vs. im Korridor-Netzwerkmodell (grün, rechts).

Wie gesehen, weist das Zell-Netzwerkmodell etwas komplexere Verzweigungen auf, wobei allerdings darauf hingewiesen werden muss, dass in der Summe über den ganzen Pfad, der durch den Routing-Algorithmus R3 generiert wird, die Komplexität des Pfades im Zell-Netzwerkmodell vergleichbar ist mit der Komplexität des Pfades im Korridor-Netzwerkmodell. Die Ursache liegt darin, dass im Korridor-Netzwerkmodell durch die rechtwinklige Projektion der Türen auf die Korridore sehr viele Abzweigungen entstehen, die allerdings an sich nicht komplex sind.

Beim Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (M3) resultieren Pfade mit einer deutlich höheren Komplexität als bei den anderen zwei Netzwerkmodellen und kommt daher, dass jeder Zugangspunkt mit allen anderen von diesem Punkt aus sichtbaren Zugangspunkten verbunden wird. Durch die direkte Routenwahl hingegen werden nur wenige Entscheidungspunkte tangiert, wodurch sich die Komplexität eines Pfades mit dem Routing-Algorithmus R3 in Grenzen hält. Dies ist vor allem auf Freiflächen sichtbar, wo durch die direkte Linienwahl keine Entscheidungspunkte auf den Freiflächen tangiert werden und daher die Komplexität des Pfades sehr gering ist. In der Korridor-Umgebung, wie auch in der Treppen-Umgebung weist das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell allerdings Probleme auf, denn die Komplexität des modellierten Pfades ist deutlich höher als in den beiden anderen Netzwerkmodellen.

4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es gilt nun abzuschätzen, welches dieser verschiedenen Netzwerkmodelle geeignet ist für die Indoor-Routenplanung.

Die Erkenntnisse der Kapitel 4.4 und 4.5 in Bezug auf die jeweiligen Anforderungen an das Netzwerkmodell sind in der Tabelle 7 zusammengefasst und werden im Folgenden kurz erläutert.

Der vorangegangene Vergleich der Netzwerkmodelle hat aufgezeigt, dass die verschiedenen Netzwerkmodelle zu ganz unterschiedlichen Repräsentationen der drei Umgebungen führten.

Nicht alle Netzwerkmodelle können alle Umgebungen modellieren. Teilweise sind manuelle Vorarbeiten nötig, wie zum Beispiel beim Zell-Netzwerkmodell, um eine gewisse Umgebung zu modellieren. Das Korridor-Netzwerkmodell ist besonders für die Modellierung von Korridoren geeignet, dagegen ist dieses Netzwerkmodell nicht für die Darstellung von Freiflächen geeignet, da dadurch gewisse Teilflächen auf der Freifläche nicht erschlossen werden. Die Freiflächen werden am besten durch das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell modelliert, das alle möglichen direkten Pfadverbindungen zwischen den Zugangspunkten verbindet und dadurch realistische Pfade auf

Freiflächen garantiert. Die Modellierung von Treppen und Aufzügen ist, soweit bekannt, nur beim Zell-Netzwerkmodell beschrieben.

Die unterschiedlichen Repräsentationen der Umgebungen führen auch zu einer unterschiedlichen Komplexität. Während das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell eine sehr hohe Komplexität aufweist, sind die beiden anderen Netzwerkmodelle weniger komplex und brauchen daher auch weniger Speicherkapazität.

In Bezug auf die Semantik sind wiederum das Zell- und das Korridor-Netzwerkmodell im Vorteil, da Objekte im Gebäude eindeutig durch eine Geometrie repräsentiert werden, wohingegen beim Sichtbarkeits-Netzwerkmodell nur die Zugänge zu einem Raum als Punkte dargestellt werden und der Raum selber nicht, was für die menschliche Wahrnehmung unnatürlich ist.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus dem vorangegangenen Vergleich der Netzwerkmodelle ist, dass die verschiedenen Netzwerkmodelle zu unterschiedlichen Resultaten bei der Anwendung der Routing-Algorithmen führten.

Die geometrischen Korridor- und Sichtbarkeits-Netzwerkmodelle schneiden beim Realitätsbezug deutlich besser ab als das Zell-Netzwerkmodell, bei dem häufig Wände geschnitten werden. Dadurch ist das Zell-Netzwerkmodell nicht besonders geeignet für die Berechnung der kürzesten Route.

Während die Resultate von Routing-Algorithmen, welche Abbiegungswinkel berücksichtigen, im Korridor- und Zell-Netzwerkmodell stark davon abhängig sind, wie die Korridore und Zellen definiert bzw. gewählt sind, zeigt das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell deutlich bessere Resultate mit diesen Algorithmen. Der Grund dafür liegt in den direkten Routen, die im Sichtbarkeits-Netzwerkmodell entstehen, welche keine unnatürlichen Abbiegungen generieren.

Für die Abzweigungs-Kategorisierung ist hingegen das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell weniger geeignet, da es sehr komplexe Entscheidungspunkte aufweist. Das Korridor-Netzwerkmodell liegt bei diesen Routing-Algorithmen deutlich im Vorteil, da geometrisch realistische Verzweigungen entstehen.

Es stellt sich heraus, dass alle Netzwerkmodelle in gewissen Anforderungen überzeugen, während sie in anderen Anforderungen weniger überzeugen. Keines der Netzwerkmodelle zeigt eine überragende Eignung, jedes Netzwerkmodell hat seine Stärken in gewissen Anforderungen, da die Modelle für spezifische Anforderungen entwickelt wurden. Je nach Wahl des Datenmodells, erhält man ganz unterschiedliche Resultate bei der Anwendung eines Routing-Algorithmus. Daher macht es Sinn, die Stärken dieser verschiedenen Netzwerkmodelle zu nutzen und diese Modelle zu einem hybriden Modell zu kombinieren.

Tabelle 7: Vergleich der Netzwerkmodelle aufgrund der gestellten Anforderungen. Besonders gut erfüllte Anforderungen sind grün hervorgehoben.

			M1 Korridor-Netzwerkmodell	M2 Zell-Netzwerkmodell	M3 Sichtbarkeits-Netzwerkmodell
modell-orientiert	A1: Modellierungsaufwand	- Korridor (U1)	- Sind definiert - Automatische Generation durch MAT - Realistische Darstellung	- Sind definiert - Manuelle Unterteilung in Zellen	- Sind definiert - Automatische Generation - Realistischer, aber komplexer Graph
		- Freifläche (U2)	- Nicht explizit definiert, aber automatische Generation durch MAT möglich - Unrealistische Darstellung, da nicht die ganze Fläche erschlossen wird	- Definiert durch Funktion (manuelle Erfassung) oder Generation durch CDT - Darstellung stark von der Zellenwahl abhängig	- Sind definiert - Automatische Generation - Realistische Pfade
		- Treppe/Aufzug (U3)	- Nicht definiert	- Durch die Funktion definiert - Manuelle Erfassung - Adäquate Darstellung	- Nicht explizit definiert, können als Zugänge zum Raum betrachtet werden
	A2: Komplexität		- Einfache Verzweigungen - Geringe Speicherkapazität	- Einfache Verzweigungen - Geringe Speicherkapazität	- Sehr komplexe Verzweigungen - Grosse Speicherkapazität
	A3: Semantik		Räume und Treppen durch Punkte dargestellt, welche attribuiert werden können	Räume und Treppen durch Punkte dargestellt, welche attribuiert werden können	Punkte werden mit mehreren geometrischen Einheiten verknüpft, was Probleme verursachen kann
routing-orientiert	A4: Realitätsbezug		- Natürliche Pfade in Treppen- und Korridor-Umgebungen - Probleme auf Freiflächen	- Natürliche Pfade in Treppen- und Korridor-Umgebungen, wobei in allerdings oft Wände geschnitten werden - Probleme auf Freiflächen	- Sehr direkte Pfade - Sehr gut auf Freiflächen
	A5: Abbiegungserkennung		- Teilweise weite Umwege, um Abbiegungen zu vermeiden - Anzahl Abbiegungen von der Wahl des Korridors abhängig	- Teilweise weite Umwege, um Abbiegungen zu vermeiden - Anzahl Abbiegungen von der Wahl der Zellen abhängig	Wenige Abbiegungen durch direkte Pfade
	A6 : Abzweigungskategorisierung		Gut möglich durch die rechtwinklige Projektion von Zugangspunkten	Möglich, teilweise aber etwas komplexere Entscheidungspunkte, dafür etwas weniger Entscheidungspunkte	Deutlich höhere Komplexität des modellierten Pfades

5 Das hybride Netzwerkmodell

Für die vorliegende Arbeit wird ein gemischtes Netzwerkmodell verwendet, das die Stärken der im Kapitel 4 vorgestellten und verglichenen Netzwerkmodelle kombiniert nutzt und so den Anforderungen optimal entspricht. Dieses hybride Netzwerkmodell dient also der Unterstützung von Indoor-Routing-Algorithmen.

5.1 Der hybride Ansatz

Das hybride Netzwerkmodell bedient sich bei den folgenden drei Netzwerkmodellen, die je nach Umgebung eingesetzt werden:

- Korridor-Netzwerkmodell
- Zell-Netzwerkmodell
- Sichtbarkeits-Netzwerkmodell

Die Raumeinheiten werden in vier Kategorien eingeteilt, die dann nach einem anderen Netzwerkmodell modelliert werden.

Aufzüge und Treppen

Grundsätzlich werden alle Aufzüge und Treppen aufgrund ihrer Funktion identifiziert und durch das Zell-Netzwerkmodell modelliert. Das heisst, die Treppen und Aufzüge werden durch den Mittelpunkte dargestellt und dann mit vertikalen Linien die verschiedenen Stockwerke verbunden. In dieser Umgebung können also die Vorteile des Zell-Netzwerkmodells in Tabelle 7 optimal ausgenutzt werden.

Korridore

Des Weiteren sollen die Korridore durch geometrische Eigenschaften identifiziert werden und nach dem Korridor-Netzwerkmodell modelliert werden, da dieses Netzwerkmodell für genau diese Umgebung entwickelt wurde. Die identifizierten Korridore werden also durch die Mittelachse des Korridors abgebildet und die Türen werden auf diese Mittelachse projiziert. Auch hier können die Vorteile aus der Tabelle 7 optimal ausgenutzt werden.

Räume

Alle übrigen Räume werden auf ihre Grösse getestet. Bei kleinen Räumen wird grundsätzlich nach dem Zell-Netzwerkmodell vorgegangen und der Raum durch einen Punkt repräsentiert. Dadurch kann ein durchaus komplexer Raum mit vielen semantischen Informationen in einer einfachen Punktgeometrie mit Attributen abgespeichert werden. Dieser Punkt wird dann mit allen Zugangspunkten zum Raum verbunden. Des Weiteren werden aber auch die Zugangspunkte untereinander verbunden, falls die Erstellung einer Sichtlinie möglich ist. Dadurch ist die Modellierung bei diesen Raumeinheiten auch stark vom Sichtbarkeits-Netzwerkmodell beeinflusst.

Freiflächen

Grosse Räume, bzw. Freiflächen, werden nach dem Sichtbarkeits-Netzwerkmodell modelliert. Da sich die Anzahl an grossen Freiflächen meistens im Rahmen hält, fällt auch die Speicherkapazität dieses Netzwerkmodells nicht gross ins Gewicht. Bei Freiflächen muss also in einem ersten Schritt die Fläche in konvexe Sub-Flächen eingeteilt werden. Dies kann mittels einer Triangulation ausgeführt werden. Anschliessend werden auf den Kanten, die durch die Triangulation entstanden sind, sowie auch bei allen Zugängen zur Freifläche Punkte definiert werden.

Verknüpfung der unterschiedlichen Raumeinheiten

Damit diese vier Kategorien miteinander kompatibel sind und der Graph flüssige Übergänge von Bereichen der einen Kategorie in Bereiche einer anderen Kategorie gewährleisten kann, ist es notwendig, auf den Übergängen Punkte zu setzen. Das heisst, dass bei allen Türen und bei allen Übergängen von einer Raumeinheit in eine andere Raumeinheit, ein Punkt konstruiert werden muss. Somit können alle Raumeinheiten flüssig miteinander verbunden werden.

Die Einteilung in die verschiedenen Kategorien erfolgt, abgesehen von den Aufzügen und Treppen, über geometrische Eigenschaften. Möglicherweise müssen diese Schwellenwerte, ab welchem Seitenverhältnis ein Raum als Korridor definiert wird, oder ab welcher Fläche ein Raum als normaler Raum gilt, je nach Datensatz und Struktur des Gebäudes angepasst werden.

5.2 Input für die Transformation

Der hybride Ansatz wandelt ein Paket von 2D-Plänen in ein Multifloor-Netzwerk um, welches für die Routing-Algorithmen geeignet ist. Es müssen jedoch einige Voraussetzungen bei den 2D-Plänen gegeben sein, damit eine reibungslose Transformation vorstattgehen kann.

Da die meisten DWG-Dokumente mit Layern aufgebaut sind, ist es möglich, dass nur noch die relevanten Layer zusammengefasst werden müssen, damit die Transformation ablaufen kann. Der Aufwand für diese Vorbereitungsarbeiten ist sehr stark von den vorhandenen Daten abhängig. Es wird im Folgenden der Input für das hybride Netzwerkmodell genauer umrissen.

Es wird ein Plan von jedem Stockwerk des Gebäudes gebraucht. Jedem Objekt in diesem Plan wird das zugehörige Stockwerk, und damit die entsprechende Stockwerk-Höhe, zugewiesen. Dieser Plan besteht aus drei verschiedenen Layern, die unterschiedliche Objekte abbilden.

Der erste Layer beinhaltet alle Objekte, die das Passieren einer Stelle verunmöglichen oder die Sicht einschränken, wobei deren Geometrie keine Rolle spielt. Wände, Fenster, grosse Einrichtungen und Säulen sind Beispiele für nicht passierbare Objekte. Da dieser Layer für die Erstellung der Sichtbarkeitslinien gebraucht wird, dürfen auf diesem Layer die Türen und Treppen nicht eingezeichnet sein. Ein Beispiel für diesen Layer ist in der Abbildung 51 links zu sehen. Der erste Layer kann mit einem fakultativen Layer ergänzt werden, der die Türen und Treppen beinhaltet und zu Visualisierungszwecken verwendet werden kann. Für die Generierung des Netzwerkes ist dieser Layer nicht notwendig. Er dient nur dazu, zusammen mit dem ersten Layer einen Plan abzubilden, wie wir ihn üblicherweise kennen.

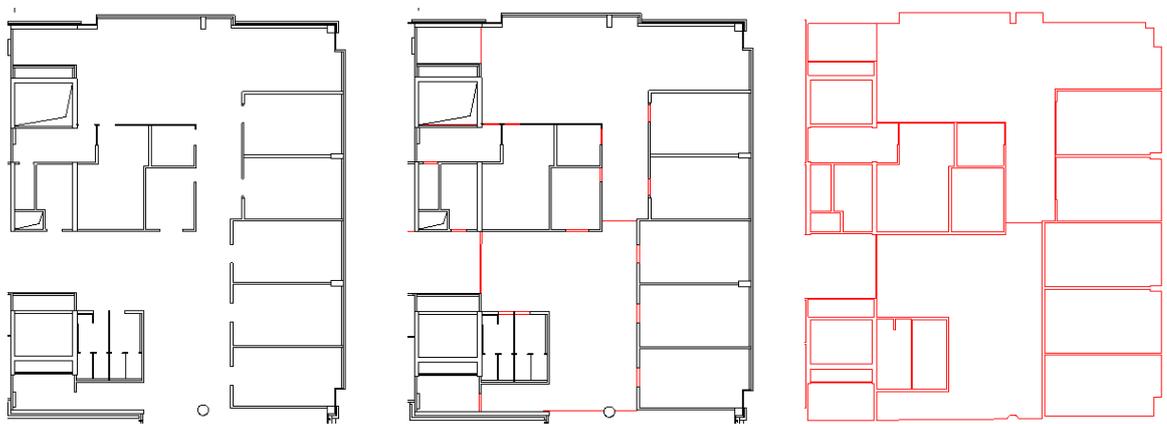


Abbildung 51: Die Layer 1 (links) und 2 (rechts), welche als Input benötigt werden. In der Mitte ist eine Überlagerung der beiden Layer zu sehen.

Der zweite Layer beinhaltet alle Raumpolygone. Diese Raumpolygone decken eine Fläche einer Raumeinheit ab und haben diverse semantische Informationen zugewiesen. Beispielsweise das Stockwerk, eine ID oder Raumnummer und die Information, ob es sich um einen Aufzug oder Treppe handelt. Dieser Layer ist sehr wichtig, da er anschliessend für die räumliche Analyse gebraucht wird. Ist der Layer noch nicht vorhanden, kann er eventuell aufgrund der Pläne erzeugt werden. In der Abbildung 51 rechts ist der Layer mit den Raumpolygonen zu sehen. In der Mitte dieser Abbildung ist wiederum der 2D-Plan zu sehen, welcher mit den Raumpolygonen hinterlegt wurde. Die Raumpolygone sind rot umrandet. Dadurch ist schon schön ersichtlich, dass durch diese Überlagerung die Türen und Durchgänge extrahiert werden können.

Der dritte Layer beinhaltet alle Zugangspunkte zu den Treppen (rote Punkte auf der Abbildung 52). Alle anderen Zugangspunkte, wie Eingänge zum Aufzug, Türen und allgemeine Durchgänge werden in der Transformation, welche im Kapitel 5.3 beschrieben wird, anhand der Überlagerung von den ersten beiden Layern eruiert. Die Zugangspunkte zu den Treppen sind allerdings nicht einfach zu konstruieren, da eine Ausrichtung fehlt und eine Treppe teilweise mehrerer Zugangspunkte hat. Deshalb werden diese Zugangspunkte in einem separaten Layer als Input benötigt.

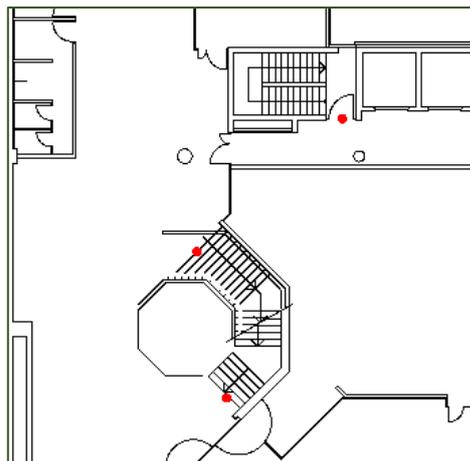


Abbildung 52: Manuell erfasste Zugangspunkte zu den Treppen (rot).

Um den Input für die Transformation aufzubereiten, werden bei den Daten des Campus der Universität Zürich zwei Vorbereitungsschritte benötigt.

Zuerst werden die Layer der DWG's gefiltert und sortiert. Aus den DWG's werden dadurch drei Outputs generiert: Einen Plan, bei dem die verschiedenen Objekte einer Gruppe zugeordnet sind („Türen“, „Treppen und Rampen“ müssen separat ausgeschieden sein), die Raumpolygone, sowie die Raumattribute. In einem zweiten Schritt werden die Raumattribute mit den Raumpolygonen verknüpft und so die semantischen Informationen verarbeitet (Abbildung 53).

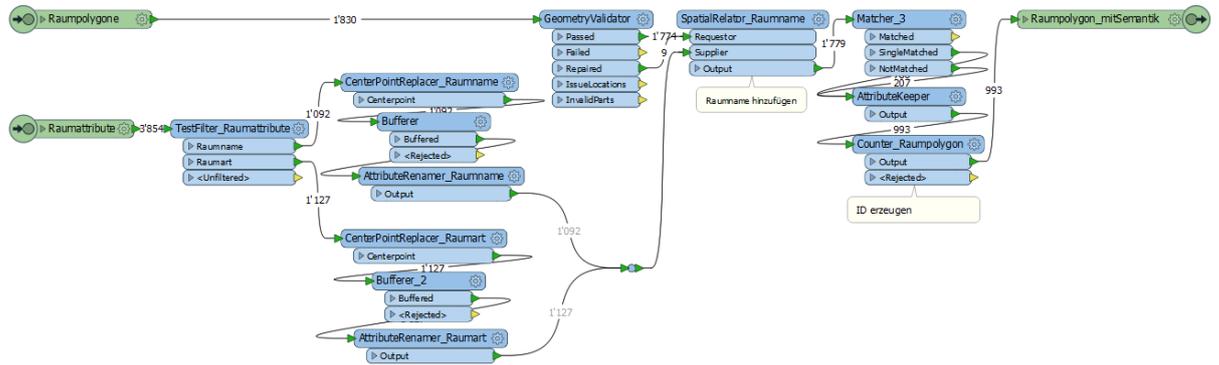


Abbildung 53: Transformator für die Vorbereitung, wobei die Raumpolygone mit den Raumattributen verknüpft werden.

Wenn Pläne vorhanden sind, die den Plänen der Universität Zürich nicht ähnlich sind, kann der Input für die Transformation auch anderweitig vorbereitet werden.

5.3 Transformation in das hybride Netzwerkmodell am Beispiel des Campus Irchel

Auf der Abbildung 54 ist die Haupttransformation zu sehen, die den im Kapitel 5.2 beschriebenen Input in das hybride Netzwerkmodell transformiert. Im Anhang II.b sind die einzelnen Transformatoren der in FME implementierten Haupttransformation zu sehen, welche im Folgenden kurz beschrieben werden.

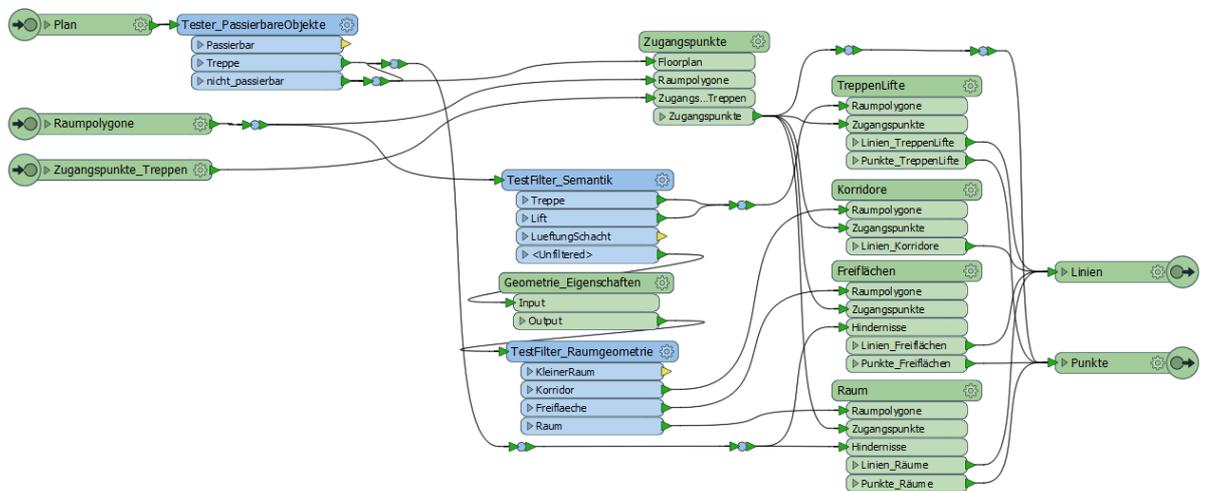


Abbildung 54: Die schematische Darstellung der Transformation ins hybride Netzwerkmodell in FME.

Generierung der Zugangspunkte

In einem ersten Schritt werden die Zugangspunkte generiert. Dazu wird der Plan des Stockwerks gepuffert und über die Raumpolygone gelegt. Alle Teilstücke der Raumpolygone, die von dem gepufferten Plan überlagert sind, werden gelöscht. Es bleiben diejenigen Teilstücke zurück, die nicht vom Plan überlagert sind, was so viel bedeutet, dass diese Teilstücke passierbar sind (Abbildung 55, links). Es werden nun nur diejenigen Teilstücke mit einer gewissen Länge weiterverarbeitet, denn es ist möglich, dass durch Ungenauigkeiten im Plan Teilstücke von Raumpolygonen übrig bleiben, die keinen passierbaren Durchgang darstellen. Nach der Vereinfachung der Geometrie der Teilstücke, werden sie auf den Mittelpunkt reduziert (Abbildung 55, mitte). Nahe beieinanderliegende

Durchgangspunkte werden nun noch zusammengefasst, da sie durch einen Durchgangspunkt dargestellt werden können (Abbildung 55, rechts).

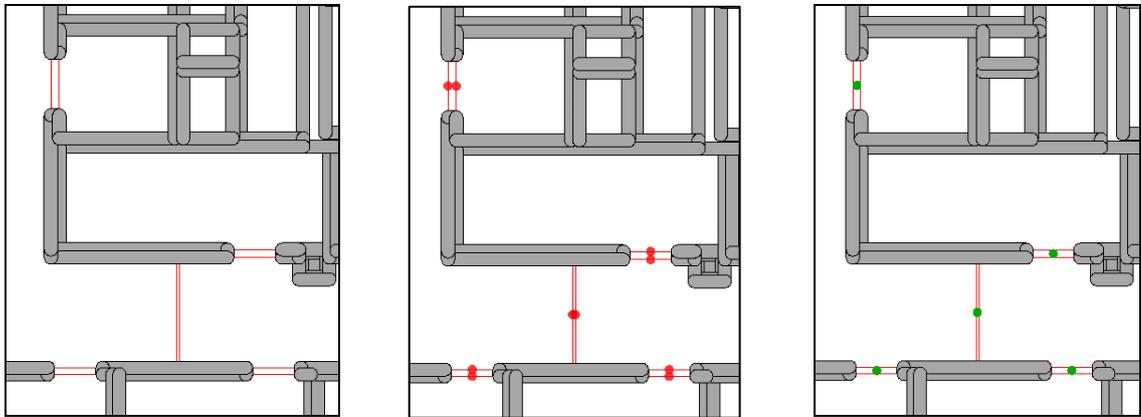


Abbildung 55: Die Generierung der Zugangspunkte. Grau dargestellt ist der gepufferte Stockwerkplan zu sehen, wobei in Rot die passierbaren Teilstücke der Raumpolygone zu sehen sind (links). Die Teilstücke werden durch den roten Mittelpunkt vereinfacht (mitte) und schliesslich zu den grünen Durchgangspunkten zusammengefasst (rechts).

Durch diesen Vorgang werden auch an Treppen Zugangspunkte generiert, die allerdings nicht weiterverarbeitet werden sollen, da sie nicht die tatsächlichen Zugangspunkte zu den Treppen darstellen, wie auf der Abbildung 56 links zu sehen ist. Daher werden nun die Raumpolygone der Treppen grosszügig gepuffert und diejenigen Zugangspunkte, die im Puffer dieser Treppen-Raumpolygone liegen, werden gelöscht und durch die manuell erfassten Treppen-Zugangspunkte ersetzt (Abbildung 56, rechts).

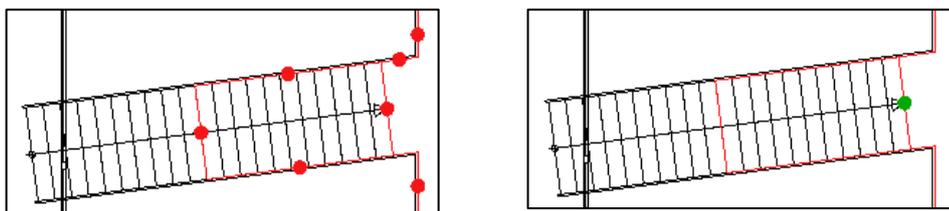


Abbildung 56: Durch die Überlagerung des Plans und der Raumpolygone (rot) automatisch generierten roten Zugangspunkte zur Treppe (links) werden durch den manuell erfassten grünen Zugangspunkt (rechts) ersetzt.

Schlussendlich werden diesen Zugangspunkten noch die ID's bzw. die Raumnummern der zwei Raumpolygone, die durch den Zugangspunkt verbunden werden, mithilfe eines geometrischen Filters zugewiesen.

Diese Zugangspunkte werden nun für die Weiterverarbeitung gebraucht, da sie den Übergang zwischen den verschiedenen Netzwerkmodellen sicherstellen.

Semantischer Filter

Nun wird die Darstellung der Räume in den verschiedenen Netzwerkmodellen angegangen. Dazu werden in einem ersten Schritt diejenigen Raumpolygone herausgefiltert, die Treppen und Aufzüge darstellen. Wie das Zell-Netzwerkmodell besagt, werden Treppen und Aufzüge aufgrund ihrer Funktion definiert. Die Raumpolygone haben Attribute zugewiesen, welche die Funktion des Raumes umschreiben. Lift- und Treppen-Polygone sind also durch dieses Attribut gekennzeichnet und können daher durch einen Attribut-Filter herausgefiltert werden. Des Weiteren werden auch Raumeinheiten mit der Funktion „Schacht“ oder „Lüftung“ rausgefiltert und nicht weiter in die Modellierung miteinbezogen, da sie für die Routenberechnungen nicht relevant sind.

Treppen und Aufzüge

Treppen und Aufzüge werden nach dem Zell-Netzwerkmodell modelliert. Die herausgefilterten Raumpolygone werden also auf den Zentrumspunkt reduziert. Übereinanderliegende Zentrumspunkte gehören zur gleichen Treppe, bzw. zum gleichen Aufzug, und haben somit eine topologische Beziehung. Diese Zugehörigkeit wird durch eine eindeutige ID pro Treppe bzw. Aufzug gekennzeichnet. Topologisch zusammenhängende Zentrumspunkte können also durch die Treppen/Lift-ID erkannt werden und die Beziehungen durch üblicherweise vertikale Linien dargestellt werden.

Um die Verknüpfung der unterschiedlichen Raumeinheiten zu gewährleisten, werden die Zentrumspunkte mit den Zugangspunkten zum Aufzug oder zur Treppe auf dem entsprechenden Stockwerk verbunden.

Geometrischer Filter

Diejenigen Raumeinheiten, die nicht durch ihre Funktion als Treppe oder Aufzug herausgefiltert wurden, werden nun nach geometrischen Eigenschaften erneut gefiltert. Die Grenzwerte für die Filterung anhand von geometrischen Eigenschaften der Raumeinheiten sind abhängig vom Gebäude und müssen jeweils der Gebäudestruktur angepasst werden.

Bei den vorliegenden Daten wurden die Raumeinheiten folgendermassen gefiltert und weiterverarbeitet:

<p><i>Wenn</i></p> <p style="padding-left: 40px;"><i>Fläche < 3 m²,</i></p> <p><i>dann ignoriere die Raumeinheit.</i></p> <p><i>Sonst wenn</i></p> <p style="padding-left: 40px;"><i>Seitenverhältnis < 1:3 und Fläche > 15 m²</i> <i>oder Fläche(BoundingBox) – Fläche > 0.5 x Fläche,</i></p> <p><i>dann behandle die Raumeinheit als Korridor.</i></p> <p><i>Sonst wenn</i></p> <p style="padding-left: 40px;"><i>Fläche > 200 m²,</i></p> <p><i>dann behandle die Raumeinheit als Freifläche.</i></p> <p><i>Sonst</i></p> <p><i>behandle die Raumeinheit als Raum.</i></p>

Abbildung 57: Schematische Darstellung des geometrischen Filters.

Korridore

Die Korridore werden nach dem Korridor-Netzwerkmodell modelliert. Dazu werden in einem ersten Schritt die Raumeinheiten vereinfacht, damit anschliessend simple Mittelachsen entstehen. Diese vereinfachten Raumeinheiten werden dann durch die mediale Achse ersetzt, welche die Pfadsegmente in Korridoren darstellen. Es ist auch möglich, die Mittelachse mit einer anderen Methode zu generieren. In einem zweiten Schritt werden nun alle Zugangspunkte zu dieser Korridor-Raumeinheit auf die generierte Mittelachse des Korridors projiziert und die Zugangspunkte so mit der Mittelachse verbunden (Abbildung 58).

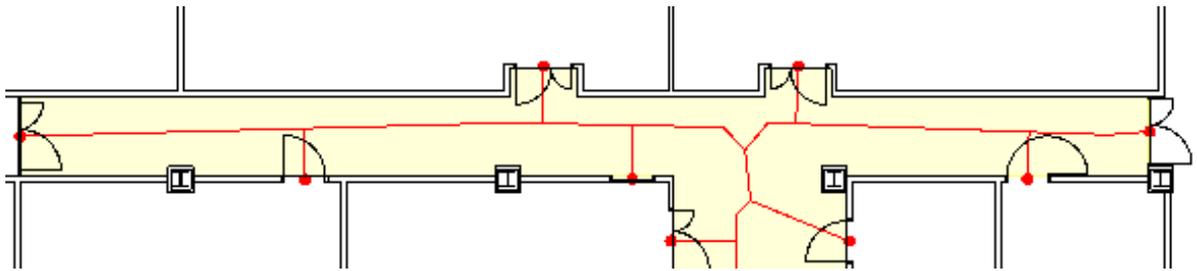


Abbildung 58: Eine als Korridor identifizierte Raumeinheit (gelb) wird durch die Mittelachse (rote Linien) und die darauf projizierten Zugangspunkte (rote Punkte) modelliert.

Freiflächen

Die Freiflächen werden nach dem Sichtbarkeits-Netzwerkmodell modelliert. Die konkaven Raumeinheiten werden trianguliert und somit in konvexe Sub-Strukturen unterteilt. Diese konvexen Sub-Strukturen garantieren, dass schlussendlich alle Zugangspunkte mit mindestens einem Pfadsegment verbunden sind. Auf den Kanten dieser Sub-Strukturen, welche die Raumeinheit unterteilen, werden nun Punkte gesetzt. Punkte nahe an den Wänden werden gelöscht und nahebeieinanderliegende Punkte werden geclustert, wodurch die Komplexität etwas vermindert werden kann (Abbildung 59, links). Anschliessend werden alle Punkte in einer Raumeinheit miteinander verbunden. Die entstandenen Linien werden nun auf die Überlagerung mit dem Plan überprüft. Durchquert eine Linie ein Objekt auf dem Stockwerkplan, so wird die Linie gelöscht (Abbildung 59, rechts, rote Linien). Andernfalls bleibt sie als Sichtbarkeits-Linie bestehen und stellt ein Pfadsegment dar (Abbildung 59, rechts, grüne Linien).

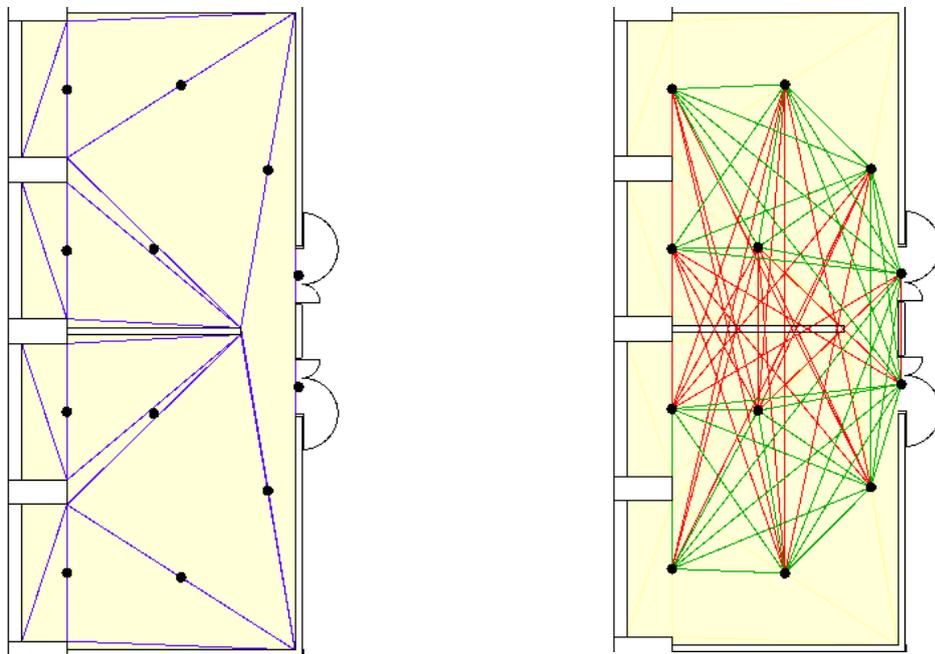


Abbildung 59: Ein grosser Raum oder eine Freifläche (gelb) wird trianguliert und auf den Grenzen der Dreiecke (blau) werden Punkte (schwarz) gesetzt, wobei diejenigen nahe an Wänden gelöscht werden und nahe beieinanderliegende Punkte geclustert werden (links). Alle Punkte werden verbunden und diejenigen Linien, die ein Objekt schneiden werden gelöscht (rot), die übrigen Linien bleiben als Sichtlinien (grün) in Netzwerk erhalten (rechts).

Räume

Zu guter Letzt werden alle übrigen Raumeinheiten als normale Räume betrachtet und nach dem Zell-Netzwerkmodell modelliert. Die Raumeinheiten werden durch den Mittelpunkt dargestellt. Nun werden diese Mittelpunkte und alle Zugangspunkte, welche diese Raumeinheit erschliessen, miteinander verbunden, damit der Übergang zu den anderen Raumeinheiten gewährleistet ist. Da je nach Funktion des Raumes und der Anzahl Zugangspunkte sehr viele Linien entstehen, werden nun noch diejenigen Linien gelöscht, die Wände oder andere nicht passierbare Objekte schneiden. Daher sind die Räume nicht direkt nach dem Zell-Netzwerkmodell modelliert, sondern stark vom Sichtbarkeits-Netzwerkmodell beeinflusst.

5.4 Beurteilung des hybriden Netzwerkmodells

Anhand der im Kapitel 5.3 beschriebenen Transformation wurde das Netzwerk des Campus Irchels an der Universität Zürich generiert. Das zugrunde liegende hybride Netzwerkmodell wird nun in den im Kapitel 4.1 vorgestellten Umgebungen beurteilt. Für die Beurteilung des hybriden Netzwerkmodells werden die gleichen Anforderungen geprüft, welche schon im Kapitel 4.2 vorgestellt wurden und für die Beurteilung des Korridor-, des Zell- und des Sichtbarkeits-Netzwerkes gebraucht wurden.

5.4.1 Beurteilung des Netzwerkmodells anhand von modellorientierten Anforderungen

Die Transformation der DWG-Pläne in das hybride Netzwerk hat die folgenden Netzwerke in den drei Testumgebungen „Korridor“, „Freifläche“ und „Treppe“ ergeben. In der Korridor-Testumgebung (U1) sieht das hybride Netzwerk folgendermassen aus:

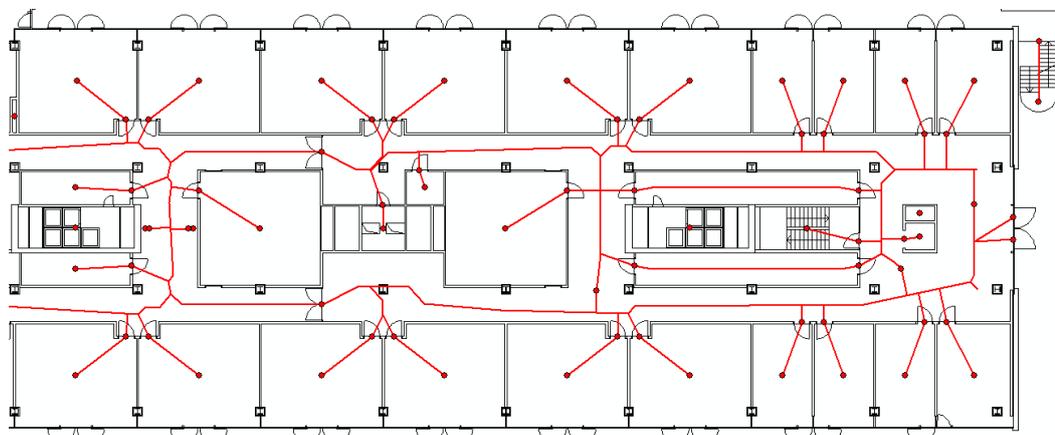


Abbildung 60: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung (U1).

In der Freiflächen-Testumgebung (U2) sieht das hybride Netzwerk folgendermassen aus:



Abbildung 61: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung (U2).

In der Treppen-Testumgebung (U3) sieht das hybride Netzwerk folgendermassen aus:

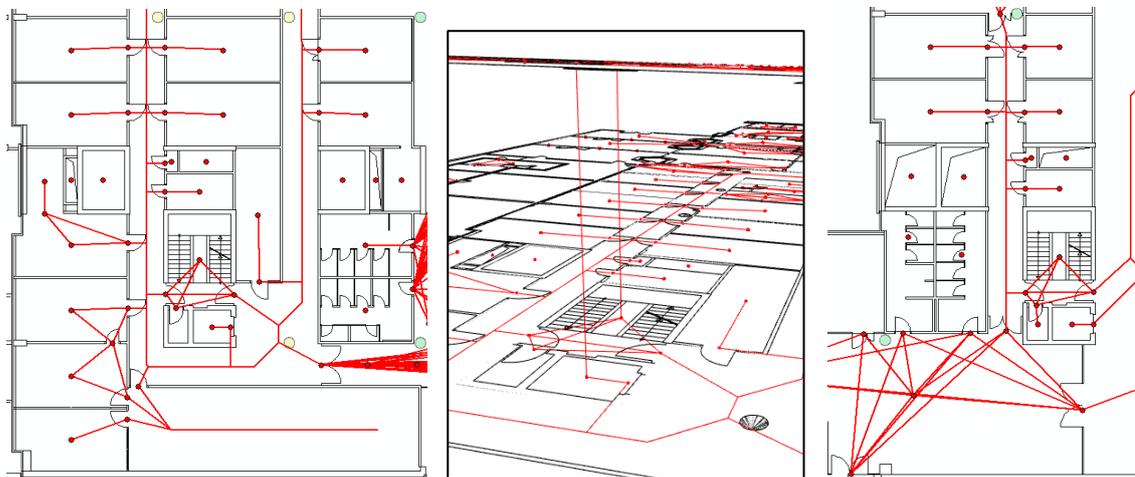


Abbildung 62: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung (U3) im unteren Stockwerk (links) und oberen Stockwerk (rechts) mit einer Vertikalverbindung (mitte).

Modellierungsaufwand (A1)

Der Modellierungsaufwand hält sich beim hybriden Netzwerkmodell in Grenzen, ist allerdings stark von den vorhandenen Daten abhängig. Die Raumstrukturen werden grösstenteils anhand von geometrischen Eigenschaften klassifiziert. Gegebenenfalls müssen die Grenzwerte für diese Klassifizierung der Struktur des Gebäudes angepasst werden.

Aufzüge und Treppen werden anhand ihrer Funktion und nicht anhand ihrer Geometrie definiert. Oftmals kann diese Funktion anhand des Layers, auf dem ein Objekt abgespeichert ist, identifiziert

werden. Im Falle der Daten der Universität Zürich sind diese semantischen Informationen vorhanden gewesen und die Funktionen mussten nicht manuell erfasst werden. Auch hier gilt, dass eine geringere Qualität der zu verarbeitenden Daten zu einem Mehraufwand aufgrund von manuellen Erfassungen führen kann.

Zusätzlich müssen die Zugangspunkte zu Treppen manuell erfasst werden, da sie nicht automatisch generiert werden können.

Bei den Daten der Universität Zürich konnte die Transformation ins hybride Netzwerkmodell bis auf die manuelle Erfassung der Zugangspunkte zu den Treppen automatisiert werden. Vergleicht man diesen Aufwand für die manuelle Erfassung mit den möglichen anstehenden manuellen Arbeiten im Korridor- oder Zell-Netzwerkmodell, ist dieser Aufwand verschwindend klein.

Komplexität (A2)

Die Komplexität des hybriden Netzwerkmodells wird relativ tief gehalten, da nur Freiflächen nach dem Sichtbarkeits-Netzwerkmodell modelliert werden. Alle anderen Raumeinheiten werden nach dem Korridor- oder Zell-Netzwerkmodell modelliert (Abbildung 63), welche eine tiefere Komplexität aufweisen. Dadurch hat das hybride Netzwerkmodell eine höhere Komplexität als die soeben genannten Netzwerkmodelle, allerdings ist die Komplexität des hybriden Ansatzes in Bezug auf die Linien deutlich tiefer als beim Sichtbarkeits-Netzwerkmodell. Das hybride Netzwerkmodell weist mehr Punkte auf als die Grund-Netzwerkmodelle (Tabelle 8). Der Grund dafür ist, dass sowohl in den Türen, wie auch im Raum ein Punkt gesetzt wird und der Schnittpunkt der Linie, die aus einem Raum kommt, mit der Korridor-Achse ebenfalls als Entscheidungspunkt angeschaut wird. Bei einigen Entscheidungspunkten gibt es also nur die Möglichkeit, geradeaus weiter zu gehen, was zwar die Komplexität in Bezug auf die Speicherkapazität negativ beeinflusst, aber nicht die Komplexität des Pfades, wenn man einen solchen Entscheidungspunkt passiert.

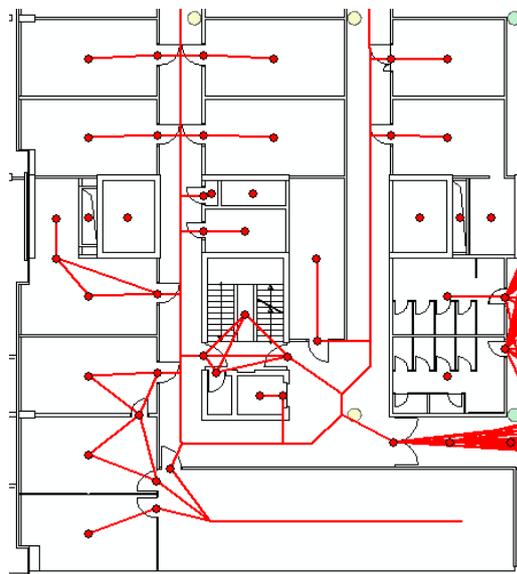


Abbildung 63: Komplexität des hybriden Netzwerkmodells (rot).

Tabelle 8: Übersicht der Anzahl Punkte und Linien des hybriden Netzwerkmodells verglichen mit dem Korridor- (M1), Zell- (M2) und Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (M3).

	M1	M2	M3	Hybrider Ansatz
PUNKTE	43	34	31	56
LINIEN	26	39	154	93

Semantik (A3)

Da jeder Raumeinheit durch einen Punkt oder eine Linie repräsentiert wird, können semantische Informationen sehr gut abgespeichert und verwendet werden. Beim hybriden Netzwerkmodell ist zudem jeder Durchgang und jede Türe durch einen Punkt modelliert. Somit können auch Informationen zur Beschränkung der Zugänglichkeit sehr gut verarbeitet werden. Bei den Daten der Universität Zürich wurden schon einige semantische Informationen, wie zum Beispiel die Raumnummer oder die Raumfunktion im Netzwerk abgespeichert. Diese Informationen können aber noch beliebig ergänzt werden.

5.4.2 Beurteilung des Netzwerkmodells anhand von routingorientierten Anforderungen

Zur Bewertung des Netzwerkmodells in Bezug auf routingorientierte Anforderungen wurden die drei Routing-Algorithmen in den drei verschiedenen Umgebungen modelliert. Die Abbildungen dazu sind im Anhang II.c zu sehen. Es wurden die gleichen Eigenschaften dieser modellierten Pfade gemessen, wie sie schon im Kapitel 4.5 gemessen wurden. In der Tabelle 9 werden diese Eigenschaften zusammengefasst und mit den Netzwerkmodellen 1 bis 3 verglichen.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Eigenschaften des modellierten Wegs in Korridor-Netzwerk (M1), Zel-Netzwerk (M2), Sichtbarkeits-Netzwerk (M3) und dem Netzwerk nach dem hybriden Ansatz in verschiedenen Umgebungen.

Umgebung	Kriterium	M1	M2	M3	Hybrider Ansatz
Korridor-Umgebung (U1)	Länge des Pfads R1*	40 m	41 m	36 m	43 m
	Anzahl geschnittene Wände bei R1	0	2	0	0
	Anzahl Abbiegungen bei R2	4	4	2	4
	Komplexität des Pfades** bei R3	17	17	21	14
Freiflächen-Umgebung (U2)	Länge des Pfads R1*	68 m	67 m	50 m	54 m
	Anzahl geschnittene Wände bei R1	0	0	0	0
	Anzahl Abbiegungen bei R2	2	2	0	2
	Komplexität des Pfades** bei R3	11	9	0	31
Treppen-Umgebung (U3)	Länge des Pfads R1*	29 m	26 m	16 m	19 m
	Anzahl geschnittene Wände bei R1	0	1	0	0
	Anzahl Abbiegungen bei R2	7	8	3	7
	Komplexität des Pfades** bei R3	20	19	27	13

* Länge des Pfades ab dem Verlassen des Start-Raums

** L-Turn und geradeaus = 1 Punkt, T-Turn = 2 Punkte, Abzweigung = 3 Punkte, sonst Anzahl Linien beim Entscheidungspunkt

Realitätsbezug (A4)

Die Länge der kürzesten Route zeigt, dass die verschiedenen Netzwerkmodelle optimal zum hybriden Netzwerkmodell kombiniert wurden. Die Länge des Pfades mit dem hybriden Ansatz liegt meistens knapp über der Länge mit dem Sichtbarkeits-Netzwerkmodell. Einzig in der Korridor-Umgebung hat das hybride Netzwerkmodell eine längere Länge als alle anderen Netzwerkmodelle. Das Korridor und das Zell-Netzwerkmodell wiesen bei Freiflächen Probleme in Bezug auf diese Anforderung auf. Das hybride Netzwerkmodell umgeht diese Probleme, indem die Freiflächen nach dem Prinzip des Sichtbarkeits-Netzwerkmodells modelliert werden, welches keine Probleme in Bezug auf diese Anforderung aufweist. Der hybride Ansatz ist also ein guter Kompromiss zwischen zu kurzen Strecken, wie sie bei den sehr direkten Verbindungslinien im Sichtbarkeits-Netzwerkmodell zu finden sind, und

zu langen Pfaden, die durch eine unnatürliche Modellierung entstehen, wie zum Beispiel teilweise im Korridor- und Zell-Netzwerkmodell.

Auch beim Kriterium der Anzahl der geschnittenen Wände schneidet das hybride Netzwerkmodell mit keinen geschnittenen Wänden sehr gut ab. Der Grund dafür ist die starke Anlehnung an die geometrischen Korridor- und Sichtbarkeits-Netzwerkmodelle.

Abbiegungserkennung (A5)

Abbiegungen werden grundsätzlich erkannt und liegen beim hybriden Ansatz meistens im Bereich des entsprechenden Kriteriums im Korridor- oder Netzwerkmodell.

Gerade in Korridoren besteht aber noch Verbesserungsbedarf beim hybriden Ansatz, da die Abzweigungen auf dem berechneten Pfad oft knapp unter dem Grenzwert von 45° zu liegen kamen. Generell sind die erzeugten Mittelachsen in Korridoren je nach Geometrie des Korridors sehr unruhig, wie man in der Abbildung 64 sehen kann. Möglicherweise werden also bei komplexen Korridoren zu viele Abbiegungen erkannt.

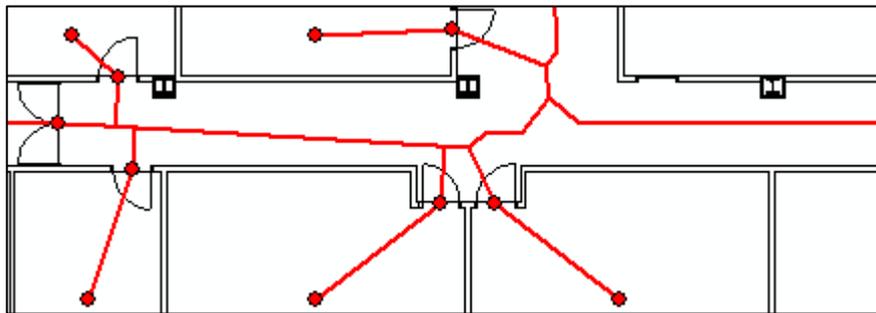


Abbildung 64: Unruhige Korridorlinie im hybriden Netzwerkmodell (rot), die aufgrund der Geometrie des Korridors entstanden ist.

Abzweigungskategorisierung (A6)

Das hybride Netzwerkmodell bringt simple Abzweigungen hervor, wie dies in der Korridor- und Treppen-Umgebung (Tabelle 9) gut zu erkennen ist. Allerdings sind die Verzweigungen in der Freiflächen-Umgebung sehr komplex, wie es auch zu erwarten war. Denn beim hybriden Ansatz wird auf Freiflächen das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell angewandt, was generell komplexere Abzweigungen aufweist, abgesehen davon, wenn eine direkte Verbindung besteht und unterwegs keine Abzweigungen passiert werden müssen. Beim hybriden Ansatz werden die Freiflächen trianguliert und auf den Dreiecksseiten Punkte gesetzt, zwischen denen Sichtbarkeitslinien erstellt werden. Eine andere Unterteilung in konvexe Sub-Formen würde eventuell weniger solche Punkte verursachen und damit auch weniger Sichtbarkeitslinien, die diese Punkte verbinden.

5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es konnte ein hybrides Netzwerkmodell hergeleitet werden, das sowohl auf dem Korridor-, dem Zell- und dem Sichtbarkeits-Netzwerkmodell basiert. Die Transformation verlangt nach einem Plan jedes Stockwerks inkl. den Raumpolygonen, die jeweils einen Raum definieren, und den manuell erfassten Zugangspunkten zu den Treppen. Die voll automatische Transformation in das Netzwerk nach dem hybriden Ansatz bringt ein gutes Resultat hervor. Vor allem in den modellorientierten Anforderungen schneidet der hybride Ansatz sehr gut ab, da die diversen Vorteile der unterschiedlichen zu Grunde liegenden Netzwerkmodellen optimal ausgenutzt werden. Der Modellierungsaufwand hält sich in Grenzen, ist allerdings stark von den vorhandenen Daten abhängig. Die Komplexität des hybriden Netzwerkmodells findet einen guten Kompromiss zwischen den simplen Zell- und Korridor-

Netzwerkmodellen und dem komplexeren Sichtbarkeits-Netzwerkmodell. Semantische Informationen sind im hybriden Ansatz gut zu berücksichtigen, da jeder Raum eindeutig durch einen Punkt dargestellt wird. Somit können Attribute beliebig erweitert werden und diese auch für allfällige Routenberechnungen berücksichtigt werden.

Auch auf die routingorientierten Anforderungen reagiert das hybride Netzwerkmodell gut, besonders der Realitätsbezug überzeugt im Vergleich mit den anderen Netzwerkmodellen. Bei der Abbiegungserkennung ist speziell in den Korridoren der Schwellenwert, ab welchem Winkel eine Gabelung als Abzweigung berücksichtigt wird, zu beachten. In der Abzweigungskategorisierung zeigt das hybride Netzwerkmodell sehr gute Resultate, ausser auf Freiflächen, die aufgrund der Detailliertheit im hybriden Ansatz sehr viele Linien und damit komplexe Entscheidungspunkte hervorbringen.

6 Diskussion der Ergebnisse

Am Anfang dieser Arbeit wurden die folgenden zwei Forschungsziele formuliert:

Z1: Beurteilung der Eignung von existierenden Indoor-Netzwerkmodellen für verschiedene Routing-Algorithmen

Z2: Entwicklung eines Netzwerkmodells

Nach einer kurzen Zusammenfassung der Vorgehensweise dieser Arbeit, werden die Ergebnisse in Bezug auf diese zwei Ziele diskutiert.

6.1 Zusammenfassung der Vorgehensweise

Die Grundlagen der Indoor-Routenplanung haben gezeigt, dass es bereits einige Netzwerkmodelle gibt, die für die Indoor-Routenplanung entwickelt wurden. Die gängigsten drei Netzwerkmodelle, das Korridor-Netzwerkmodell, das Zell-Netzwerkmodell und das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell, wurden dann für die weitere Evaluation ausgewählt.

Diese drei Netzwerkmodelle wurden aufgrund von modellorientierten (Modellierungsaufwand, Komplexität und Semantik) und routingorientierten Anforderungen (Realitätsbezug, Abbiegungserkennung und Abzweigungskategorisierung) beurteilt und miteinander verglichen. Die routingorientierten Anforderungen sind aufgrund von bestehenden Outdoor-Routing-Algorithmen, welche schon in die Indoor-Routenplanung übernommen worden sind oder noch übernommen werden können, aufgestellt worden.

Die Beurteilung anhand einer Netzwerkmodell-Studie hat gezeigt, dass alle drei Modelle je nach Umgebung und je nach Anforderung Vor- und Nachteile aufweisen, welche im nachfolgenden Kapitel 6.2 genauer vorgestellt werden. Es gibt kein Netzwerkmodell, das heraussticht und explizit für Algorithmen, welche mit Abbiegungen oder Abzweigungskategorisierungen arbeiten, verwendet werden könnte. Daher macht es Sinn, die unterschiedlichen Netzwerkmodelle zu kombinieren und ein hybrides Netzwerkmodell zu entwickeln, auf welches im folgenden Kapitel 6.3 genauer eingegangen wird. Zum hybriden Netzwerkmodell wurde eine Transformation in FME geschrieben, welche 2D-Pläne in einen Netzwerkgraphen umwandelt, der eine Node-Edge-Struktur hat. Dieses hybride Netzwerkmodell passt sich je nach Umgebung an, wodurch das Optimum in Bezug auf die Anforderungen an ein Netzwerkmodell herausgeholt werden kann. Die zuvor angewandten Anforderungen für die Beurteilung von bestehenden Netzwerkmodellen wurden auch auf das hybride Netzwerkmodell angewandt und überprüft, wodurch die Qualität des hybriden Netzwerkmodells aufgezeigt werden konnte.

6.2 Ergebnisse in Bezug auf Z1

Die Beurteilung des Korridor-, des Zell- und des Sichtbarkeits-Netzwerkmodells erfolgte aufgrund der modellorientierten und routingorientierten Anforderungen. Dazu wurde eine Netzwerkmodell-Studie durchgeführt, in der die verschiedenen Netzwerkmodelle in drei verschiedenen Umgebungen modelliert wurden. Anschliessend wurden die drei Routing-Algorithmen, auf die sich die Anforderungen beziehen, konzeptuell angewandt und ausgewertet.

Grundsätzlich können die folgenden Hauptkenntnisse festgehalten werden:

- Bei der Generierung des Netzwerkes sind je nach Netzwerkmodell grössere Vorarbeiten zu leisten.
- Die Netzwerkmodelle führen zu unterschiedlichen Repräsentationen einer gleichen Umgebung. Nicht alle Netzwerkmodelle sind für alle Umgebungen geeignet.

- Wendet man den gleichen Routing-Algorithmus in der gleichen Umgebung an, sind die Resultate der berechneten Route abhängig vom jeweiligen Netzwerkmodell. Bei der Wahl des Netzwerkmodells sei also Vorsicht geboten, da es zu unterschiedlichen Resultaten führen kann.
- Die Eignung in Bezug auf die Kompatibilität mit später zu entwickelnden Algorithmen stellt eine wichtige Anforderung dar. Es konnte aber kein Netzwerkmodell in allen routingorientierten Anforderungen überzeugen.

Das Korridor-Netzwerkmodell hat besonders bei der Modellierung von Korridoren überzeugt, wofür es auch entwickelt wurde, wobei nicht ausser Acht gelassen werden darf, dass die Definition eines Korridors nicht explizit festgelegt ist. Bei Freiflächen hingegen zeigt das Korridor-Netzwerkmodell Mängel auf, da nicht alle Flächen erschlossen werden. Des Weiteren hat das Netzwerkmodell mit einer geringen Komplexität und einer Eignung für die Einbindung von semantischen Informationen überzeugt. Das Korridor-Netzwerkmodell überzeugte bei den routingorientierten Anforderungen vor allem bei der Abzweigungskategorisierung, da es sich um ein geometrisches Modell handelt, und bei den simplen Verzweigungen, die aufgrund der rechtwinkligen Projektion der Zugangspunkte auf die Korridorlinie entstehen.

Das Zell-Netzwerkmodell sticht beim Modellieren von Treppen und Aufzügen heraus, da dieses Modell die Treppen und Aufzüge durch ihre Funktion definiert. Weitere Eignungen zeichnen dieses Netzwerkmodell bei der guten Einbindungsmöglichkeiten der Semantik und bei der Modellierung von einfachen Verzweigungen aus. Somit überzeugt dieses Netzwerkmodell vor allem bei den modellorientierten Anforderungen. Bei den routing-orientierten Anforderungen konnte das Modell meistens aufgrund der fehlenden geometrischen Betrachtungen nicht überzeugen.

Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell zeigt seine Stärken hauptsächlich auf Freiflächen, wobei das Modell auch in anderen Umgebungen geeignet ist. Der grösste Nachteil beim Sichtbarkeits-Netzwerkmodell ist die Komplexität, die es aufweist. Es modelliert sehr viele Linien, deren Anzahl die Berechnungszeit eines Routing-Algorithmus beeinflussen kann. Zudem generiert es dadurch sehr komplexe Verzweigungen und folglich konnte das Netzwerkmodell bei der Abzweigungskategorisierung nicht überzeugen. Dafür zeichnet es sich durch sehr direkte Pfade mit wenigen, aber komplexen, Abzweigungen aus.

Somit konnte die Eignung der existierenden Indoor-Netzwerkmodelle aufgezeigt und beurteilt werden. Da alle Netzwerkmodelle in gewissen Anforderungen überzeugen konnten und je nach Umgebung Vor- und Nachteile aufweisen, macht es Sinn diese Stärken zu nutzen und in einem hybriden Netzwerkmodell zu kombinieren.

6.3 Ergebnisse in Bezug auf Z2

Die vorangegangenen Erkenntnisse führten zu der Entwicklung des hybriden Netzwerkmodells. Dieses hybride Netzwerkmodell soll abhängig von der Umgebung nach einem anderen Netzwerkmodell modellieren.

Beim hybriden Netzwerkmodell werden die Raumeinheiten in vier Kategorien aufgeteilt. Aufzüge und Treppen werden durch ihre Funktion definiert und dann anhand des Zell-Netzwerkmodells modelliert. Die verschiedenen Stockwerke werden durch vertikale Linien von Aufzugs- zu Aufzugszelle verbunden. Korridore werden durch geometrische Eigenschaften identifiziert und nach dem Korridor-Netzwerkmodell modelliert, wobei die Mittelachse berechnet wird und alle Zugangspunkte auf diese Linien projiziert werden. Alle übrigen Raumeinheiten werden auf ihre Grösse getestet. Kleine Räume werden nach dem Zell- und Sichtbarkeits-Netzwerk modelliert, wobei die Sichtlinien zwischen den

Zugangspunkten und dem Raummittelpunkt erstellt werden. Freiflächen und grosse Räume werden trianguliert und ebenfalls nach dem Sichtbarkeits-Netzwerkmodell modelliert. Um diese verschiedenen Raumeinheiten miteinander zu verknüpfen und der Graph flüssige Übergänge gewährleisten kann, werden an den Übergängen von der einen Raumeinheit zu einer anderen Raumeinheit Zugangspunkte gesetzt.

Die Einteilung in die Kategorien erfolgt hauptsächlich über geometrische Eigenschaften. Die Schwellenwerte für diese Kategorisierung sind stark vom Datensatz und von der Gebäudestruktur abhängig und müssen gegebenenfalls angepasst werden.

Zu diesem hybriden Netzwerkmodell wurde ein Transformator in FME geschrieben, der 2D-Pläne in einen Netzwerkgraphen umwandelt.

Die Beurteilung dieses Netzwerkmodells hat ergeben, dass es vor allem in den modellorientierten Anforderungen gut abschneidet, da es die Vorteile der zu Grunde liegenden Netzwerkmodelle sinnvoll kombiniert. Dieses gute Abschneiden ist aber stark abhängig von den Daten, die verarbeitet werden. Möglicherweise schränkt die Datenqualität der Input-Daten die Transformation ein.

Das hybride Netzwerkmodell schneidet zudem beim Realitätsbezug besonders gut ab im Vergleich mit den anderen Netzwerkmodellen. Bei der Abbiegungserkennung sind hauptsächlich im Bereich der Korridore noch Verbesserungen möglich. Die Abzweigungskategorisierung ist grundsätzlich möglich, wobei die Modellierung nach dem Sichtbarkeits-Netzwerkmodell auf Freiflächen, wie erwartet, die Qualität des hybriden Netzwerkmodells in diesem Punkt etwas einschränkt. Aber auch hier können weitere Verfeinerungen bessere Resultate hervorbringen.

6.4 Kritische Reflexion der Vorgehensweise

Somit wurden beide Ziele erreicht und ein Beitrag an die Weiterentwicklung eines Indoor-Navigationssystems geleistet.

Die Anforderungen an das Netzwerkmodell könnten sicherlich noch weiter ausgebaut werden, wenn man in der Entwicklung eines Indoor-Navigationssystems noch weiter vorausschaut. Denn nach der Entwicklung von Routing-Algorithmen wird als nächste Aufgabe die Generierung von Wegbeschreibungen anstehen. Berücksichtigt man diese Entwicklung, könnte man noch weitere Anforderungen formulieren. Allgemein ist diese ganze Entwicklung zu einem Indoor-Navigationssystem jedoch ein zyklischer Prozess. Es muss immer wieder ein Schritt zurück gemacht werden und der vorherige Schritt überprüft und angepasst werden (Abbildung 65).

Die Wahl, beziehungsweise die Entwicklung, des Netzwerkmodells hat deutlich mehr Zeit in Anspruch genommen, als am Anfang abgeschätzt wurde. Im Konzept zu dieser Arbeit ging man noch davon aus, dass man das Netzwerkmodell einfach auswählen kann und falls keine Transformation vorhanden ist, das Netzwerk einfach von Hand konstruiert und dann mit der Entwicklung von Algorithmen weiterfahren kann. Die Erkenntnis, dass ein hybrides Netzwerkmodell entwickelt werden muss, führte jedoch zu einem Umdenken. Da das Netzwerkmodell eine sehr wichtige Basis ist für weiterführende Arbeiten, wurde der Fokus sehr stark auf das Netzwerkmodell verschoben und die Entwicklung von weiteren Routing-Algorithmen nicht mehr weiter verfolgt.

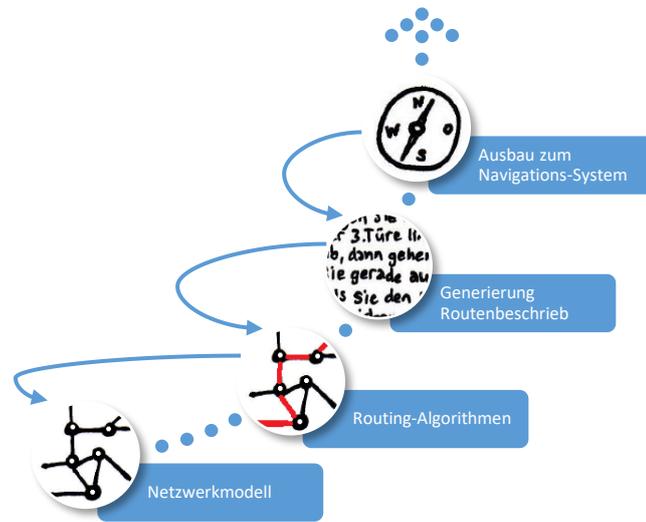


Abbildung 65: Prozess bei der Weiterentwicklung eines Indoor-Navigationssystems.

7 Ausblick

7.1 Weitere Forschungsmöglichkeiten

Es gibt einige weitere Forschungsmöglichkeiten, wie diese Arbeit aufgezeigt hat.

Eine erste Möglichkeit bezieht sich auf die Transformation des 2D-Plans in einen Netzwerkgraphen. Hier könnte der Input noch vereinfacht werden, indem der Transformator Gebäudestrukturen nur aufgrund des 2D-Plans erkennen kann. Bei den Daten, die in dieser Arbeit verwendet wurden, waren z.B. die Türen und Treppen auf identifizierbaren Layern. Möglicherweise liegt aber ein DWG vor, bei dem sich alle Objekte auf dem gleichen Layer befinden. Dann wäre die Vorbereitung sehr aufwändig und man müsste diverse Objekte identifizieren. Wenn der Transformator diese Objekte nur anhand der Struktur erkennen würde, würde sich die Vorbereitung in allen Fällen extrem minimieren und eine Filterung und Identifizierung der Layer wäre nicht mehr notwendig.

Des Weiteren kann das hier vorliegende hybride Netzwerkmodell weiter verfeinert werden. Potenzial gibt es z.B. bei der Berechnung der Mittelachse eines Korridors, welche weniger stark von der Korridor-Geometrie abhängig sein soll. Zudem kann auch eine andere Unterteilung von Freiflächen, welche weniger Linien modellieren würde, in Betracht gezogen werden. Es müssten folglich die Auswirkungen auf die Routing-Algorithmen erneut eruiert werden.

Die grösste Forschungsmöglichkeit liegt aber sicherlich bei weiterführenden Arbeiten in Bezug auf ein Indoor-Navigationssystem. Mit dem Netzwerkmodell ist nun eine Grundlage gegeben. Auf dieser Grundlage können nun weitere Routing-Algorithmen entwickelt werden, damit viele unterschiedliche Pfade generiert werden können. Ein nächster Schritt wäre dann noch das Generieren eines Routenbeschriebs. Auf den Routenbeschrieb wurde bei der Entwicklung des Netzwerkmodells nicht besonders eingegangen. Möglicherweise muss das Netzwerkmodell noch mit gewissen Attributen und Eigenschaften ergänzt werden, damit später ein Routenbeschrieb generiert werden kann.

7.2 Persönliches Schlusswort

Ich hoffe persönlich, dass ich in ein paar Jahren, wenn ich wieder mal am Bahnhof in Zürich stehe und nicht mehr genau weiss, wo in diesem Untergrund-Labyrinth der Supermarkt liegt, das Mobiltelefon zücken kann und mir den Weg dahin anzeigen lassen kann. Da ich nicht das Risiko eingehen will, dass ich mich verlaufe und dadurch Zeit verliere, wähle ich den „zuverlässigsten“ Weg und komme ohne Umwege bei meinem gewünschten Supermarkt an. Ich hoffe, mit dieser Arbeit ein Stück an diese Entwicklung von Indoor-Navigationssystemen beigetragen zu haben und damit andere Personen dazu motiviert zu haben, ebenfalls in diesem Themenbereich zu forschen.

I Verzeichnisse

I.a Literatur

Afyouni, I.; Ray, C.; Claramunt, C. (2012): Spatial models for context-aware indoor navigation systems. A survey. In: JOSIS (4). DOI: 10.5311/JOSIS.2012.4.73.

Becker, T.; Nagel, C.; Kolbe, T. H. (2009): Supporting Contexts for Indoor Navigation Using a Multilayered Space Model. In: 2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware. Taipei, Taiwan, 18.05.2009 - 20.05.2009: IEEE, S. 680–685.

Bose, P.; Morin, P. (1999): Online Routing in Triangulations. In: A. Aggarwal (Hg.): Algorithms and Computation. ISAAC 1999, Bd. 1741. Berlin, Heidelberg: Springer (Lecture Notes in Computer Science, 1741), S. 113–122.

Butler, D. L.; Acquino, A. L.; Hissong, A. A.; Scott, P. A. (1993): Wayfinding by Newcomers in a Complex Building. In: Hum Factors 35 (1), S. 159–173. DOI: 10.1177/001872089303500109.

Conroy Dalton, R. (2003): The Secret Is To Follow Your Nose. In: Environment and Behavior 35 (1), S. 107–131. DOI: 10.1177/0013916502238867.

Cormen, T. H.; Leiserson, C.E., Rivest, R. L.; Stein, C. (2009): Introduction to Algorithms. 3rd ed. Cambridge, Mass.: MIT Press.

Dijkstra, E. W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs. In: Numer. Math. 1 (1), S. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.

Duckham, M.; Kulik, L. (2003): "Simplest" Paths. Automated Route Selection for Navigation. In: W. Kuhn, M. Worboys und S. Timpf (Hg.): Spatial Information Theory. Foundations of Geographic Information Science, Bd. 2825. Heidelberg: Springer, S. 169–185.

Dudas, P. M.; Ghafourian, M.; Karimi, H. A. (2009): ONALIN. Ontology and Algorithm for Indoor Routing. In: 2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware. Taipei, Taiwan, 18.05.2009 - 20.05.2009: IEEE, S. 720–725.

Gärling, T.; Kwan, M.-P.; Golledge, R. G. (1992): Computational process modeling travel decisions: Review and conceptual analysis. Paper submitted for publication.

Gilliéron, P.-Y.; Büchel, D.; Spassov, I.; Merminod, B. (2004): Indoor Navigation Performace Analysis.

Golledge, R. G. (1995a): Defining the Criteria Used in Path Selection. University of California Transportation Center. Eindhoven.

Golledge, R. G. (1995): Path Selection and Route Preference in Human Navigation. A Progress Report. In: A. Frank und W. Kuhn (Hg.): Spatial Information Theory. A Theoretical Basis for GIS, Bd. 988. Heidelberg: Springer, S. 207–222.

- Haque, S.; Kulik, L.; Klippel, A. (2007): Algorithms for Reliable Navigation and Wayfinding. In: T. Barkowsky, M. Knauff, G. Ligozat und D. Montello (Hg.): *Spatial Cognition V Reasoning, Action, Interaction*, Bd. 4387. Berlin: Springer, S. 308–326.
- Hill, M. R. (1982): *Spatial Structure and Decision-Making Aspects of Pedestrian Route Selection through an Urban Environment*. Ph.D. Thesis. University Microfilms International, Nebraska-Lincoln.
- Hillier, B. (1997): *Moving diagonally: Some results and some conjectures*. University College London, London.
- Hochmair, H.; Frank, A. U. (2000): Influence of estimation errors on wayfinding-decisions in unknown street networks – analyzing the least-angle strategy. In: *Spatial Cognition and Computation* 2 (4), S. 283–313. DOI: 10.1023/A:1015566423907.
- Hölscher, C.; Büchner, S. J.; Meilinger, T.; Strube, G. (2009): Adaptivity of wayfinding strategies in a multi-building ensemble. The effects of spatial structure, task requirements, and metric information. In: *Journal of Environmental Psychology* 29 (2), S. 208–219. DOI: 10.1016/j.jenvp.2008.05.010.
- Hölscher, C.; Meilinger, T.; Vrachliotis, G.; Brösamle, M.; Knauff, M. (2006): Up the down staircase. Wayfinding strategies in multi-level buildings. In: *Journal of Environmental Psychology* 26 (4), S. 284–299. DOI: 10.1016/j.jenvp.2006.09.002.
- Hölscher, C.; Vrachliotis, G.; Meilinger, T. (2005): The Floor Strategy: Wayfinding Cognition in a Multi-Level Building. In: *Proceedings of the 5th International Space Syntax Symposium 2*, S. 823–829.
- Hoogendoorn, S. P.; Bovy, P.H.I (2004): Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 38 (2), S. 169–190. DOI: 10.1016/S0191-2615(03)00007-9.
- Isikdag, U.; Zlatanova, S.; Underwood, J. (2013): A BIM-Oriented Model for supporting indoor navigation requirements. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 41, S. 112–123. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2013.05.001.
- Jiang, B.; Liu, X. (2010): Computing the Fewest-turn Map Directions based on the Connectivity of Natural Roads. In: *International Journal of Geographical Information Science* 25 (7), S. 1069–1082.
- Karimi, H. A.; Ghafourian, M. (2010): Indoor Routing for Individuals with Special Needs and Preferences. In: *Transactions in GIS* 14 (3), S. 299–329. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2010.01198.x.
- Kruminaite, M. (2014): *Space Subdivision for Indoor Navigation*. Master Thesis. TU Delft, Delft. Architecture and The Built Environment.
- Lee, J. (2004): A Spatial Access-Oriented Implementation of a 3-D GIS Topological Data Model for Urban Entities. In: *GeoInformatica* 8 (3), S. 237–264. DOI: 10.1023/B:GEIN.0000034820.93914.d0.
- Lee, J.; Kwan, M.-P. (2005): A combinatorial data model for representing topological relations among 3D geographical features in micro-spatial environments. In: *International Journal of Geographical Information Science* 19 (10), S. 1039–1056. DOI: 10.1080/13658810500399043.

- Li, X.; Claramunt, C.; Ray, C. (2010): A grid graph-based model for the analysis of 2D indoor spaces. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 34 (6). DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2010.07.006.
- Liu, L.; Zlatanova, S. (2012): A semantic data model for indoor navigation. In: C. Claramunt und K.-J. Li (Hg.): *Proceedings of the Fourth ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness - ISA '12*. Redondo Beach, California, 06.11.2012 - 06.11.2012. New York, USA: ACM Press, S. 1–8.
- Lorenz, B.; Ohlbach, H. J.; Stoffel, E.-P. (2006): A Hybrid Spatial Model for Representing Indoor Environments. In: D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell et al. (Hg.): *Web and Wireless Geographical Information Systems*, Bd. 4295. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), S. 102–112.
- Mark, D. M. (1986): Automated Route Selection for Navigation. In: *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 1 (9), S. 2–5. DOI: 10.1109/MAES.1986.5005198.
- Meijers, M.; Zlatanova, S.; Pfeifer, N. (2005): 3D geo-information indoors: structuring for evacuation. In: *Proceedings of Next generation 3D city models*, S. 22–27.
- Richter, K.-F.; Duckham, M. (2008): Simplest Instructions: Finding Easy-to-Describe Routes for Navigation. In: T. Cova (Hg.): *Geographic information science. 5th international conference / proceedings*, Bd. 5266. Berlin: Springer (Lecture Notes in Computer Science, 5266), S. 274–289.
- Richter, K.-F.; Klippel, A. (2002): "You-are-here maps": Wayfinding support as location based service. In: J. Moltgen und A. Wytzisk (Hg.): *GI-Technologien für Verkehr und Logistik*. Münster: IfGI Prints 13.
- Sato, A.; Ishimaru, N.; Tao, G.; Tanizaki, M. (2009): OGC(R) OWS-6 Outdoor and Indoor 3D Routing Services. Engineering Report.
- Schougaard, K. R.; Grønbæk, K.; Scharling, T. (2012): Indoor Pedestrian Navigation Based on Hybrid Route Planning and Location Modeling. In: D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell et al. (Hg.): *Pervasive Computing*, Bd. 7319. Berlin, Heidelberg: Springer (Lecture Notes in Computer Science), S. 289–306.
- Seneviratne, P. N.; Morrall, J. F. (1985): Analysis of factors affecting the choice of route of pedestrians. In: *Transportation Planning and Technology* 10 (2), S. 147–159. DOI: 10.1080/03081068508717309.
- Stoffel, E.-P.; Lorenz, B.; Ohlbach, H. J. (2007): Towards a Semantic Spatial Model for Pedestrian Indoor Navigation. In: J.-L. Hainaut, E. A. Rundensteiner, M. Kirchberg, M. Bertolotto, M. Brochhausen, Y.-P. P. Chen et al. (Hg.): *Advances in Conceptual Modeling – Foundations and Applications*, Bd. 4802. Berlin, Heidelberg: Springer (Lecture Notes in Computer Science), S. 328–337.
- Turner, A.; Doxa, M.; O'Sullivan, D.; Penn, A. (2001): From isovists to visibility graphs: a methodology for the analysis of architectural space. In: *Environment and Planning B: Planning and Design* 28, S. 103–121.
- Urry, J. (2007): *Mobilities*. Cambridge: Polity.

Vanclooster, A.; van de Weghe, N.; Maeyer, P. de (2016): Integrating Indoor and Outdoor Spaces for Pedestrian Navigation Guidance. A Review. In: *Transactions in GIS* 20 (4), S. 491–525. DOI: 10.1111/tgis.12178.

Westphal, Matthias; Renz, Jochen (2011): Evaluating and minimizing ambiguities in qualitative route instructions. In: I. Cruz und D. Agrawal (Hg.): *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL. International Conference on Advances in Geographic Information Systems. The 19th ACM SIGSPATIAL International Conference. Chicago, Illinois, 1/11/2011 - 4/11/2011. New York, USA: ACM Press, S. 171–180.*

Winter, S. (2002): Modeling Costs of Turns in Route Planning. In: *GeoInformatica* 6 (4), S. 345–361. DOI: 10.1023/A:1020853410145.

Xu, M.; Wei, S.; Zlatanova, S. (2016): An indoor navigation approach considering obstacles and space subdivision of 2d plan. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLI-B4*, S. 339–346. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-339-2016.

Yuan, W.; Schneider, M. (2010): iNav. An Indoor Navigation Model Supporting Length-Dependent Optimal Routing. In: M. Painho, M. Y. Santos und H. Pundt (Hg.): *Geospatial Thinking. Berlin, Heidelberg: Springer (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography)*, S. 299–313.

Zheng, J.; Winstanley, A.; Pan, Z.; Coveney, S. (2009): Spatial Characteristics of Walking Areas for Pedestrian Navigation. In: *2009 Third International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering. Qingdao, China, 04.06.2009 - 06.06.2009: IEEE, S. 452–458.*

I.b Abbildungen

Abbildung 1: Gewichtung der verschiedenen Verzweigungstypen (übernommen von Mark 1986).	13
Abbildung 2: Algorithmus 1 von Duckham und Kulik (2003).	14
Abbildung 3: Algorithmus 2 von Duckham und Kulik (2003).	14
Abbildung 4: Ein Beispiel von zwei Routen mit den gleichen Start- und Endpunkten. Die gestrichelte Route ist einfacher zum Beschreiben und Befolgen, da weniger Anweisungen für Abzweigungen vorkommen (Westphal et al. 2011).	15
Abbildung 5: Relativ zur Bewegungsrichtung werden die abzweigenden Strassen anhand dieses Star-Schemas qualitativen Richtungsbeschreibungen zugeordnet (Westphal et al., 2011). Es können weniger detaillierte Schemen (links) oder detailliertere Schemen (rechts) verwendet werden.	16
Abbildung 6: Die rote Route hat nur eine Abzweigung und einen totalen Abbiegungswinkel von 90°, während die blaue Route genau gleich lang ist, aber einen deutlich grösseren Gesamtdrehwinkel hat (Jiang und Liu 2010).	17
Abbildung 7: Kombinatorisches Netzwerk (links) und geometrisches Netzwerk (rechts) (Lee 2004).	22
Abbildung 8: Die abstrahierte Darstellung eines Netzwerkes (blau, rot) basierend auf dem Korridor-Modell mit den verwendeten Korridoren (grün).	24
Abbildung 9: Die Cafeteria mit den unterschiedlichen Nutzungen.	26
Abbildung 10: Unterschiedliche Nutzungen einer Freifläche, wie z.B. Flächen mit Sitzmöglichkeiten (grün) oder der Verkaufsbereich der Cafeteria (blau). Die restliche Fläche wird zum Transferieren gebraucht. In rot ist die Aufnahmeposition der Abbildung 9 zu sehen.	26
Abbildung 11: Die abstrahierte Darstellung eines Netzwerkes (blau, rot) basierend auf dem Zell-Modell mit den verwendeten Zellen (grün).	28
Abbildung 12: Die abstrahierte Darstellung eines Netzwerkes (blau, rot) basierend auf dem Raster-Modell.	29
Abbildung 13: Die abstrahierte Darstellung eines Netzwerkes (blau, rot) basierend auf dem Sichtbarkeits-Modell mit den verwendeten konvexen Polygonen (grün).	31
Abbildung 14: Plan im Untersuchungsgebiet "Korridore" (U1) mit den Standorten der Bildaufnahmen (rot).	37
Abbildung 15: Foto im Untersuchungsgebiet U1 vom Punkt A aus.	38
Abbildung 16.a und .b: Fotos der Testumgebung U1 vom Punkt A aus.	38
Abbildung 17.a und .b: Fotos der Testumgebung U2 vom Punkt B aus.	39
Abbildung 18: Plan im Untersuchungsgebiet "Freifläche" (U2) mit den Standorten der Bildaufnahmen (rot).	39
Abbildung 19: Foto von der Testumgebung U2 vom Standort A aus (Ansicht aus dem oberen Stockwerk).	40
Abbildung 20: Foto der Testumgebung U2 vom Standort B aus.	40
Abbildung 21: Plan im Untersuchungsgebiet "Treppen" (U3) mit dem Standort der Bildaufnahme (rot), unteres Stockwerk (links) und oberes Stockwerk (rechts).	41

Abbildung 22: Testumgebung U3 vom Standort A aus.	41
Abbildung 23: Das Korridor-Modell M1 (grün) in der Korridor-Umgebung (U1).	44
Abbildung 24: Das Zell-Modell M2 (rot) in der Korridor-Umgebung (U1).	44
Abbildung 25: Das Sichtbarkeits-Modell M3 (blau) in der Korridor-Umgebung (U1).	45
Abbildung 26: Das Korridor-Modell M1 (grün) in der Freiflächen-Umgebung (U2).	45
Abbildung 27: Das Zell-Modell M2 (rot) in der Freiflächen-Umgebung (U2).	46
Abbildung 28: Das Sichtbarkeits-Modell M3 (blau) in der Freiflächen-Umgebung (U2).	46
Abbildung 29: Das Korridor-Modell M1 (grün) in der Treppen-Umgebung (U3) im unteren Stockwerk (links) und oberen Stockwerk (rechts) mit einer Vertikalverbindung.	47
Abbildung 30: Das Zell-Modell M2 (rot) in der Treppen-Umgebung (U3) im unteren Stockwerk (links) und oberen Stockwerk (rechts) mit einer Vertikalverbindung.	47
Abbildung 31: Das Sichtbarkeits-Modell M3 (blau) in der Treppen-Umgebung (U3) im unteren Stockwerk (links) und oberen Stockwerk (rechts) mit einer Vertikalverbindung.	48
Abbildung 32: Die Definition eines Korridors ist nicht eindeutig. Die hier farblich hervorgehobene Fläche könnte sowohl als Raum, wie auch als Korridor ausgedeutet werden.	49
Abbildung 33: Komplexe Treppe, bei der die Zugänge möglicherweise nicht automatisch erkannt werden können.	49
Abbildung 34: Planausschnitt der Vergleichsumgebung in Bezug auf die Komplexität mit den Standorten der Bildaufnahmen (rot).	51
Abbildung 35: Foto vom Standort A (links) und vom Standort B (rechts) aus.	51
Abbildung 36: Komplexität des Korridor-Netzwerkmodells (grün).	52
Abbildung 37: Komplexität des Zell-Netzwerkmodells (rot).	52
Abbildung 38: Komplexität des Sichtbarkeits-Netzwerkmodells (blau).	52
Abbildung 39: Darstellung eines Korridors mit den Sichtlinien (blau) des Sichtbarkeits-Netzwerkmodells (M3).	53
Abbildung 40: Abbiegungsmöglichkeiten beim Verlassen eines Zimmers in den drei verschiedenen Netzwerkmodellen.	53
Abbildung 41: Dem farblich hervorgehobenen Raum können zwei Punkte zugewiesen werden.	54
Abbildung 42: Der kürzeste Weg (orange) im Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Korridor-Umgebung.	55
Abbildung 43: Der kürzeste Weg (orange) im Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Korridor-Umgebung.	56
Abbildung 44: Der Routing-Algorithmus R1 (orange) generiert eine unnatürliche Route im Netzwerkmodell M1, da nicht alle Teile der Freifläche erschlossen sind.	56
Abbildung 45: Der kürzeste Weg (orange) im Zell-Netzwerkmodell (rot) generiert auf Freiflächen längere Umwege.	57
Abbildung 46: Der kürzeste Weg R1 im Sichtbarkeits-Netzwerkmodell M3 in der Korridor-Umgebung.	57

Abbildung 47: Beim Zell-Netzwerkmodell (rot) schneiden die generierten Routen (orange) teilweise die Wände.	58
Abbildung 48: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) erkennt Abbiegungen, die von einem Nutzer so nicht wahrgenommen werden würden (orange Kreise). Deshalb wählt der Abbiegungsalgorithmus einen längeren Weg (pink), als die direktere Alternative (orange).	59
Abbildung 49: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) erkennt hier keine Abbiegung mit dem Abbiegungsalgorithmus (pink), obwohl dieser Pfad von einem Nutzer möglicherweise als eine Abbiegung wahrgenommen wird.	59
Abbildung 50: Vergleich des einfachsten Wegs (hellgrün) im Zell-Netzwerkmodell (rot, links) vs. im Korridor-Netzwerkmodell (grün, rechts).	60
Abbildung 51: Die Layer 1 (links) und 2 (rechts), welche als Input benötigt werden. In der Mitte ist eine Überlagerung der beiden Layer zu sehen.	64
Abbildung 52: Manuell erfasste Zugangspunkte zu den Treppen (rot).	65
Abbildung 53: Transformator für die Vorbereitung, wobei die Raumpolygone mit den Raumattributen verknüpft werden.	66
Abbildung 54: Die schematische Darstellung der Transformation ins hybride Netzwerkmodell in FME.	66
Abbildung 55: Die Generierung der Zugangspunkte. Grau dargestellt ist der gepufferte Stockwerkplan zu sehen, wobei in Rot die passierbaren Teilstücke der Raumpolygone zu sehen sind (links). Die Teilstücke werden durch den roten Mittelpunkt vereinfacht (mitte) und schliesslich zu den grünen Durchgangspunkten zusammengefasst (rechts).	67
Abbildung 56: Durch die Überlagerung des Plans und der Raumpolygone (rot) automatisch generierten roten Zugangspunkte zur Treppe (links) werden durch den manuell erfassten grünen Zugangspunkt (rechts) ersetzt.	67
Abbildung 57: Schematische Darstellung des geometrischen Filters.	68
Abbildung 58: Eine als Korridor identifizierte Raumeinheit (gelb) wird durch die Mittelachse (rote Linien) und die darauf projizierten Zugangspunkte (rote Punkte) modelliert.	69
Abbildung 59: Ein grosser Raum oder eine Freifläche (gelb) wird trianguliert und auf den Grenzen der Dreiecke (blau) werden Punkte (schwarz) gesetzt, wobei diejenigen nahe an Wänden gelöscht werden und nahe beieinanderliegende Punkte geclustert werden (links). Alle Punkte werden verbunden und diejenigen Linien, die ein Objekt schneiden werden gelöscht (rot), die übrigen Linien bleiben als Sichtlinien (grün) in Netzwerk erhalten (rechts).	69
Abbildung 60: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung (U1).	70
Abbildung 61: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung (U2).	71
Abbildung 62: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung (U3) im unteren Stockwerk (links) und oberen Stockwerk (rechts) mit einer Vertikalverbindung (mitte).	71
Abbildung 63: Komplexität des hybriden Netzwerkmodells (rot).	72
Abbildung 64: Unruhige Korridorlinie im hybriden Netzwerkmodell (rot), die aufgrund der Geometrie des Korridors entstanden ist.	74

Abbildung 65: Prozess bei der Weiterentwicklung eines Indoor-Navigationssystems.	79
Abbildung 66: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xii
Abbildung 67: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xii
Abbildung 68: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xiii
Abbildung 69 Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xiii
Abbildung 70: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xiii
Abbildung 71: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xiv
Abbildung 72: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xiv
Abbildung 73: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xiv
Abbildung 74: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xv
Abbildung 75: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xv
Abbildung 76: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xvi
Abbildung 77: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xvi
Abbildung 78: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xvii
Abbildung 79: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xvii
Abbildung 80: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xviii
Abbildung 81: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xviii
Abbildung 82: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xix
Abbildung 83: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xix
Abbildung 84: Das Korridor-Netzwerkmodell (orange) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xx

Abbildung 85: Das Korridor-Netzwerkmodell (orange) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xx
Abbildung 86: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xxi
Abbildung 87: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xxi
Abbildung 88: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xxii
Abbildung 89: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xxii
Abbildung 90: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xxiii
Abbildung 91: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xxiii
Abbildung 92: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xxiv
Abbildung 93: Erster Teil des Transformators "Zugangspunkte", der die Zugangspunkte bei Türen, Aufzügen und Durchgängen eruiert.	xxv
Abbildung 94: Zweiter Teil des Transformators "Zugangspunkte", der die Zugangspunkte bei Treppen ermittelt.	xxv
Abbildung 95: Erster Teil des Transformators "TreppenLifte", der die Vertikalverbindungen der Treppen und Lifte erstellt.	xxvi
Abbildung 96: Zweiter Teil des Transformators "TreppenLifte", der die Zugangslinien und Punkte der Treppen und Lifte erstellt.	xxvi
Abbildung 97: Erster Teil des Transformators "Korridore", der die Mittelachsen der Korridore generiert.	xxvii
Abbildung 98: Zweiter Teil des Transformators "Korridore", der die Verbindungen der Zugangspunkte zu der Mittelachse herstellt.	xxvii
Abbildung 99: Erster Teil des Transformators "Freiflächen", der Vorbereitungen für die Sichtbarkeitslinien macht.	xxviii
Abbildung 100: Zweiter Teil des Transformators "Freiflächen", der die Sichtbarkeitslinien erstellt.	xxviii
Abbildung 101: Transformator "Raum", der die Räume modelliert.	xxix
Abbildung 102: Der Transformator "Bufferer3D_Levels", der Punkte buffert und wieder auf das Stockwerk mappt.	xxx
Abbildung 103: Der Transformator „Clustering_Points_By_Level“ der pro Stockwerk die Punkte in einer gewissen Distanz clustert.	xxx
Abbildung 104: Der Transformator "Connecting_allPoints", der alle Punkte mit einem gleichen Attribut miteinander verbindet.	xxxi

Abbildung 105: Der Transformator "Geometrie_Eigenschaften", der geometrische Eigenschaften der Raumeinheiten berechnet.	xxxii
Abbildung 106: Der Transformator "Zugangspunkte_duplizieren", der Durchgangspunkte dupliziert und somit eindeutig macht.	xxxii
Abbildung 107: Der Transformator "Triangulationspunkte" trianguliert die Raumpolygone und setzt auf die Mitte der Dreiecksseiten einen Punkt.	xxxii
Abbildung 108: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xxxiii
Abbildung 109: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xxxiii
Abbildung 110: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xxxiv
Abbildung 111: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xxxiv
Abbildung 112: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xxxiv
Abbildung 113: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xxxv
Abbildung 114: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).	xxxv
Abbildung 115: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).	xxxvi
Abbildung 116: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).	xxxvi

I.c Tabellen

Tabelle 1: Rangliste von Faktoren, welche die Routenwahl beeinflussen (übernommen von Seneviratne und Morrall 1985).	10
Tabelle 2: Rangfolge der Kriterien, die für eine Routenwahl berücksichtigt werden (Golledge 1995a).	11
Tabelle 3: Übersicht der beurteilten Anforderungen an ein Netzwerkmodell.	43
Tabelle 4: Übersicht der Ergebnisse des Vergleichs der Netzwerkmodelle in Bezug auf den Modellierungsaufwand.	50
Tabelle 5: Übersicht der Anzahl Punkte und Linien je Netzwerkmodell.	53
Tabelle 6: Zusammenfassung der Eigenschaften des modellierten Wegs in den verschiedenen Netzwerkmodellen in verschiedenen Umgebungen.	55
Tabelle 7: Vergleich der Netzwerkmodelle aufgrund der gestellten Anforderungen. Besonders gut erfüllte Anforderungen sind grün hervorgehoben.	62
Tabelle 8: Übersicht der Anzahl Punkte und Linien des hybriden Netzwerkmodells verglichen mit dem Korridor- (M1), Zell- (M2) und Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (M3).	72
Tabelle 9: Zusammenfassung der Eigenschaften des modellierten Wegs in Korridor-Netzwerk (M1), Zel-Netzwerk (M2), Sichtbarkeits-Netzwerk (M3) und dem Netzwerk nach dem hybriden Ansatz in verschiedenen Umgebungen.	73

II Anhang

II.a Netzwerkmodell-Studie

Es sind die folgenden Pfade eingezeichnet:

- Kürzester Weg (R1)
- Abbiegungs-Algorithmus (R2)
- Einfachster Weg (R3)

Korridor-Netzwerkmodell (M1) in der Korridor-Umgebung (U1):

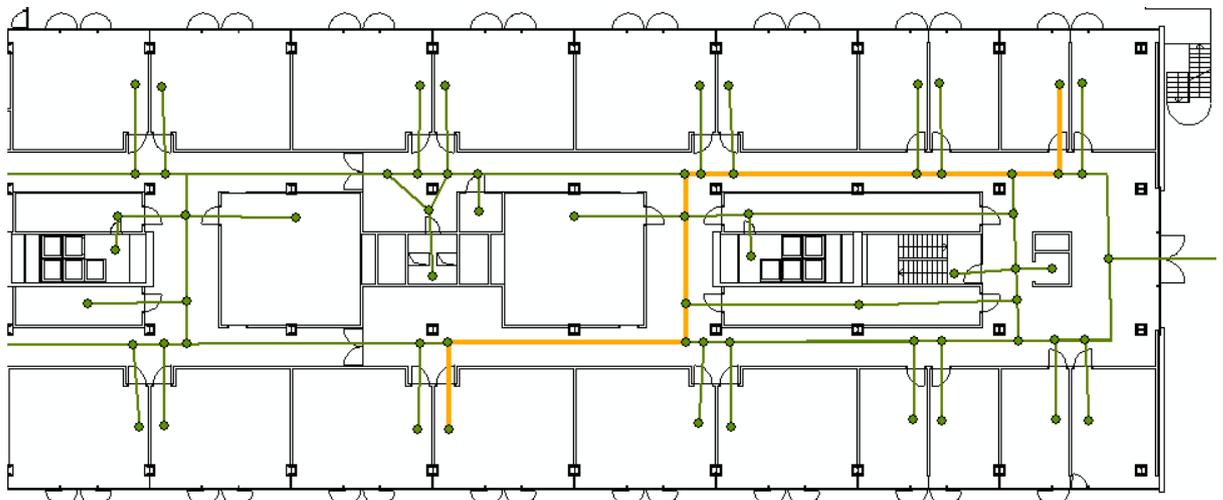


Abbildung 66: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).

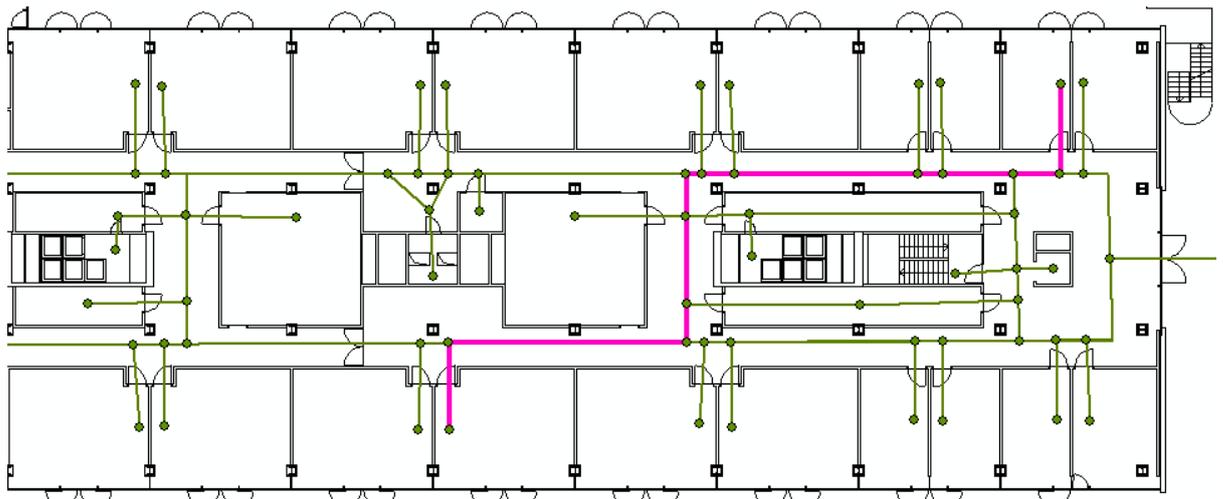


Abbildung 67: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).

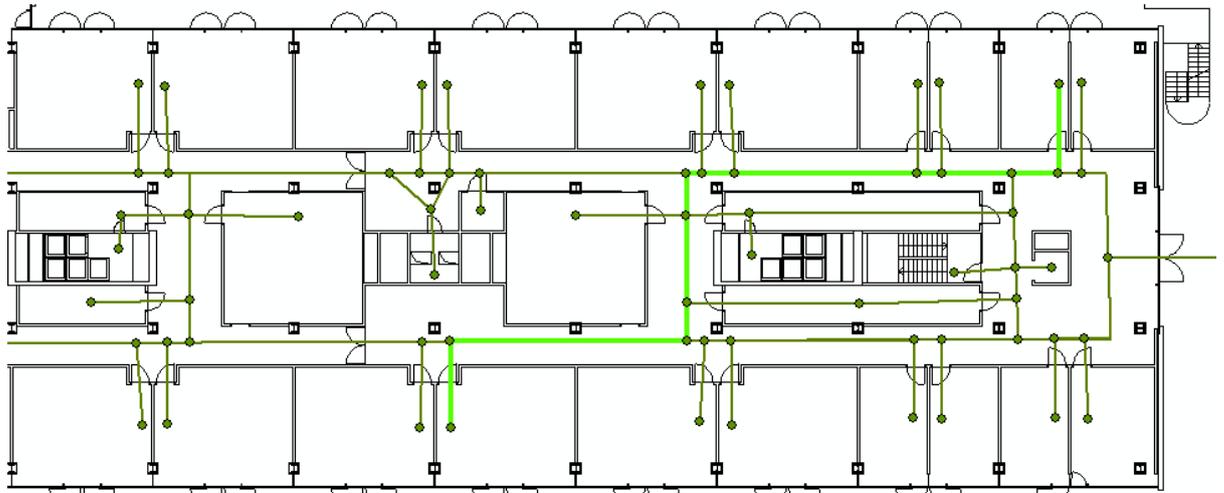


Abbildung 68: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).

Zell-Netzwerkmodell (M2) in der Korridor-Umgebung (U1):

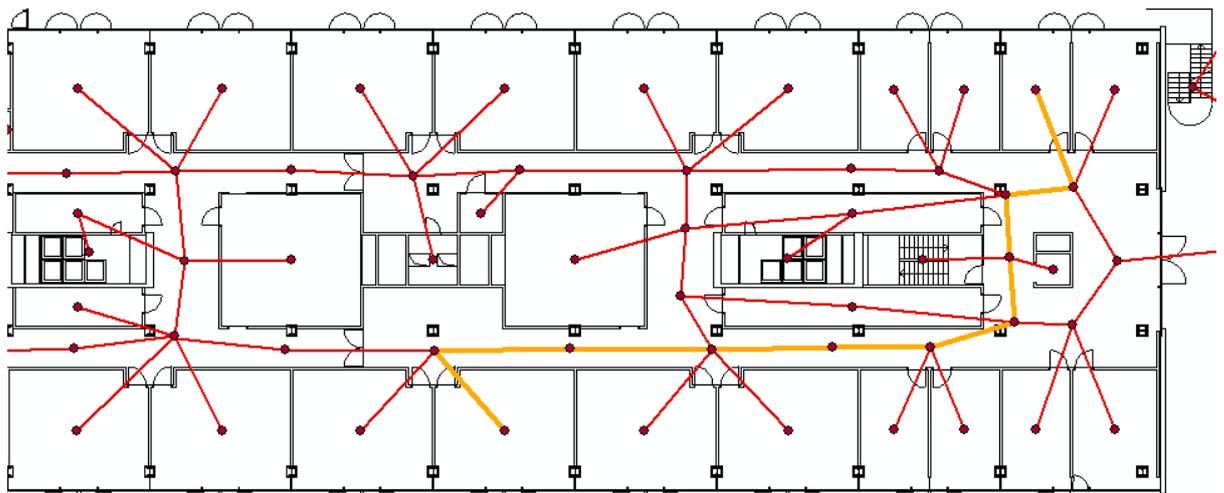


Abbildung 69 Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).

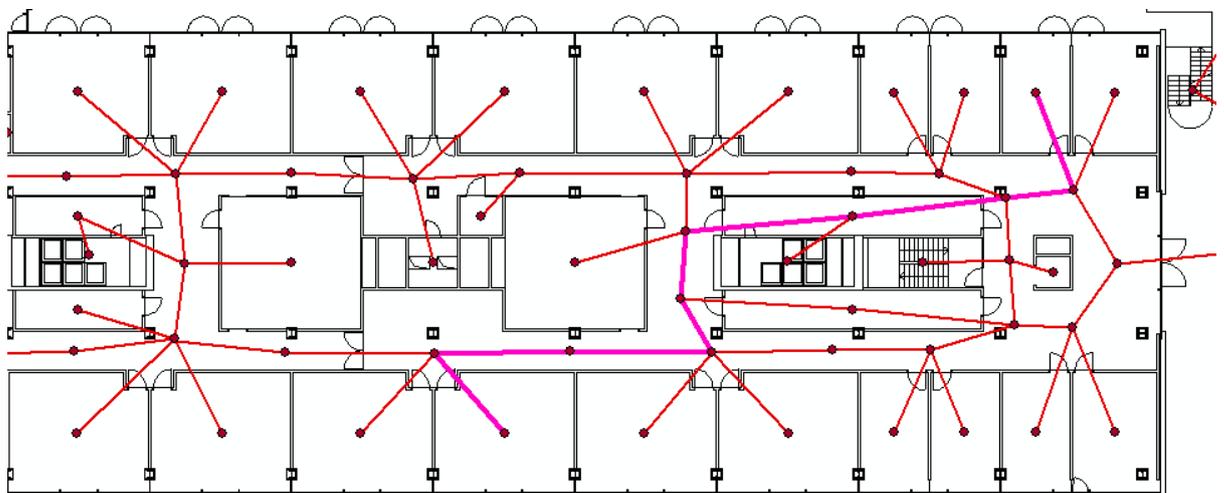


Abbildung 70: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).

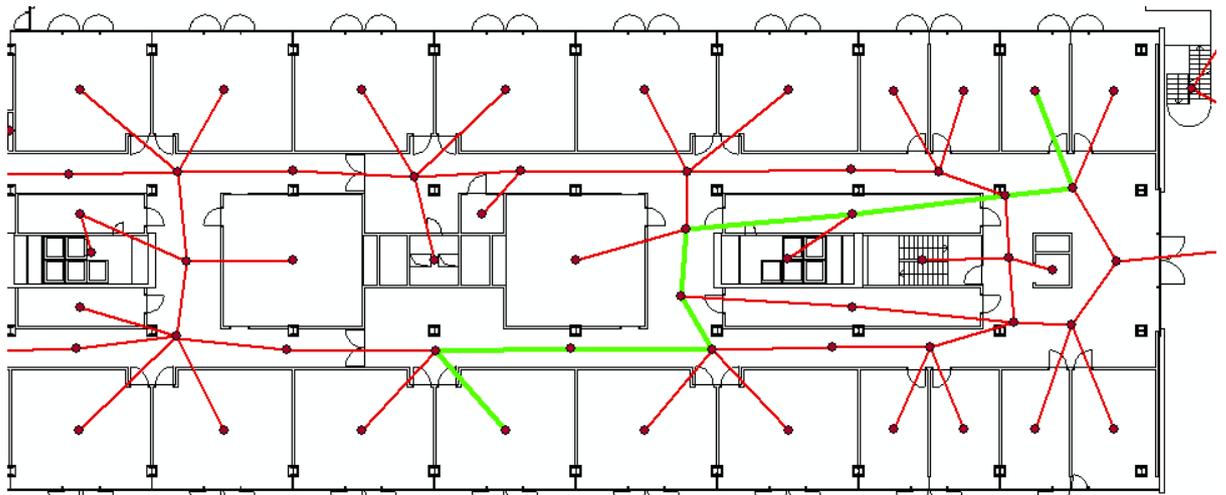


Abbildung 71: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).

Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (M3) in der Korridor-Umgebung (U1):

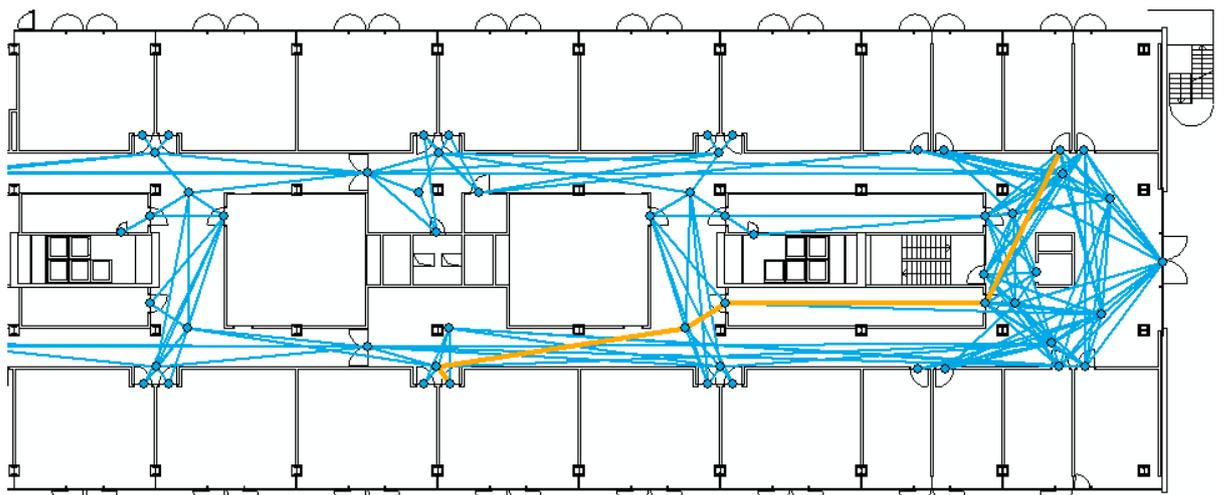


Abbildung 72: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).

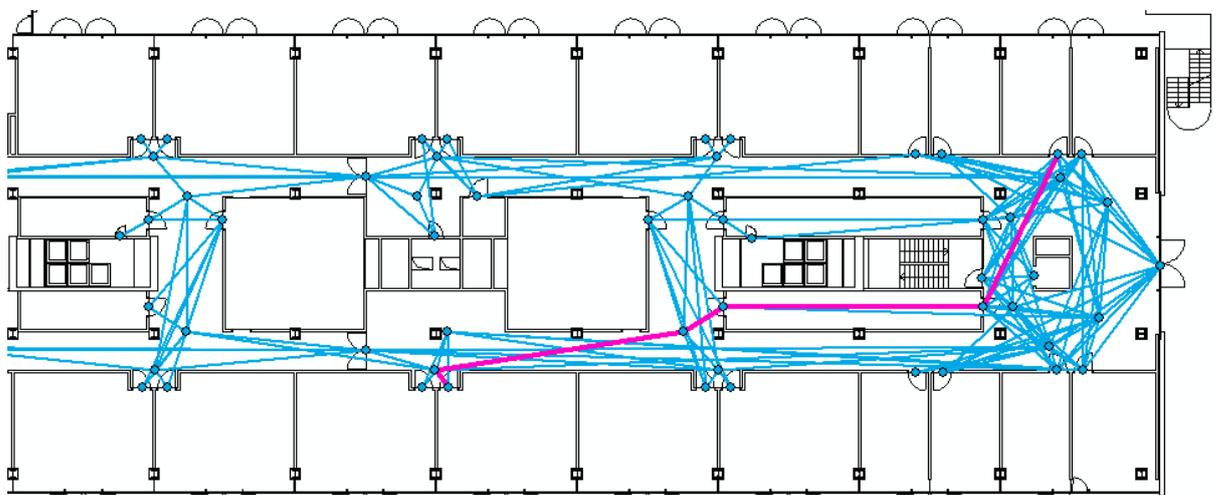


Abbildung 73: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).

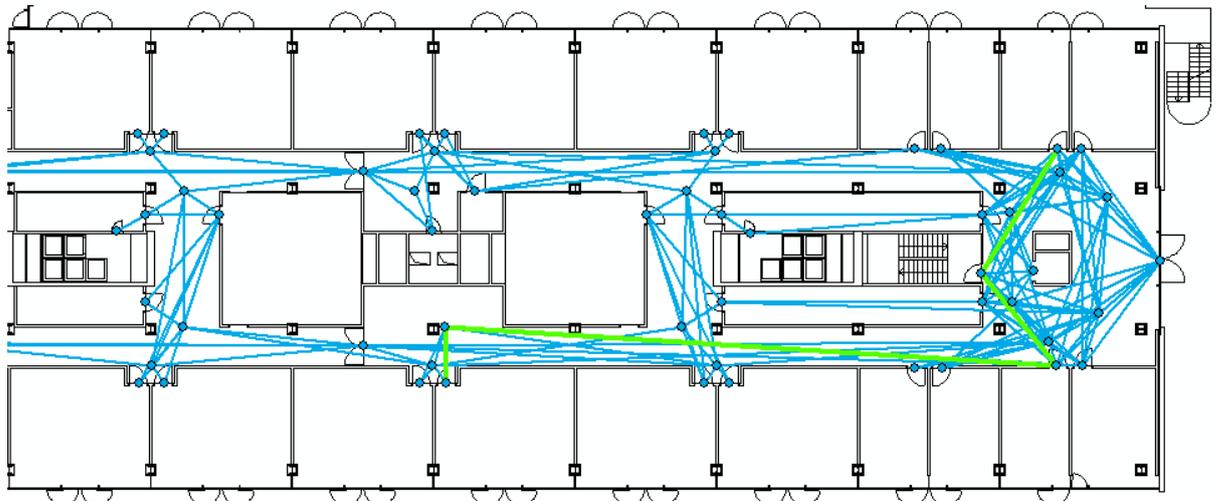


Abbildung 74: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).

Korridor-Netzwerkmodell (M1) in der Freiflächen-Umgebung (U2):

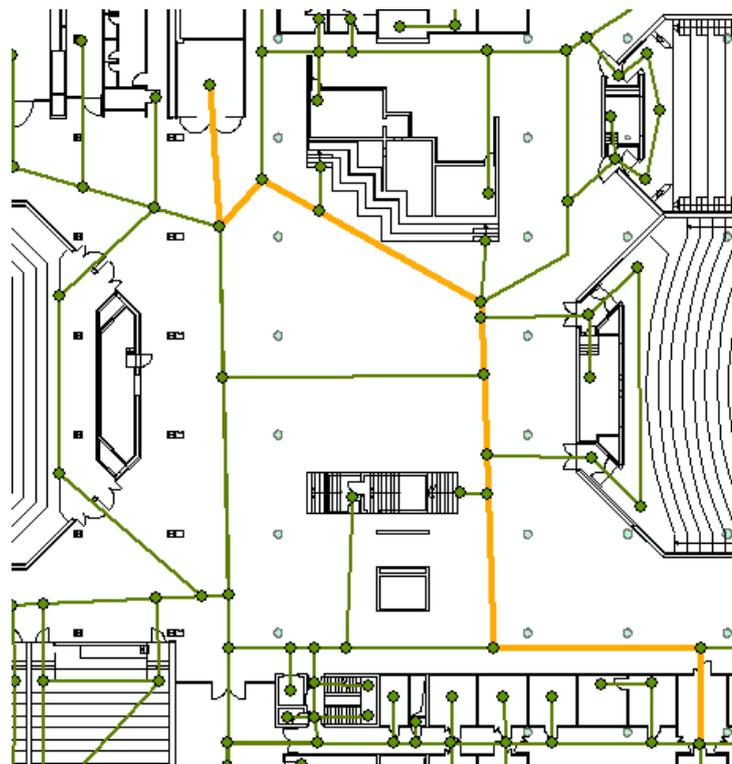


Abbildung 75: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).

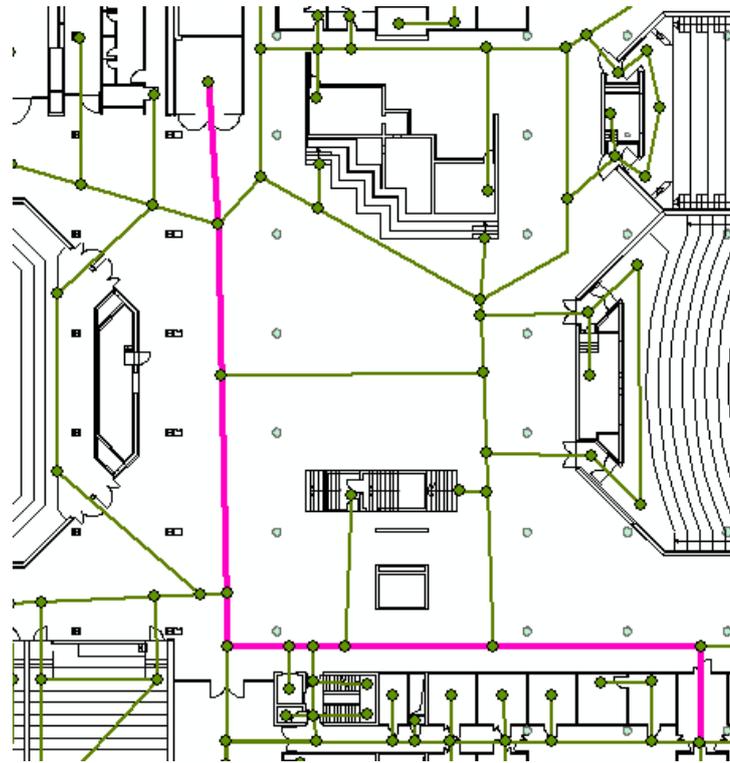


Abbildung 76: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).

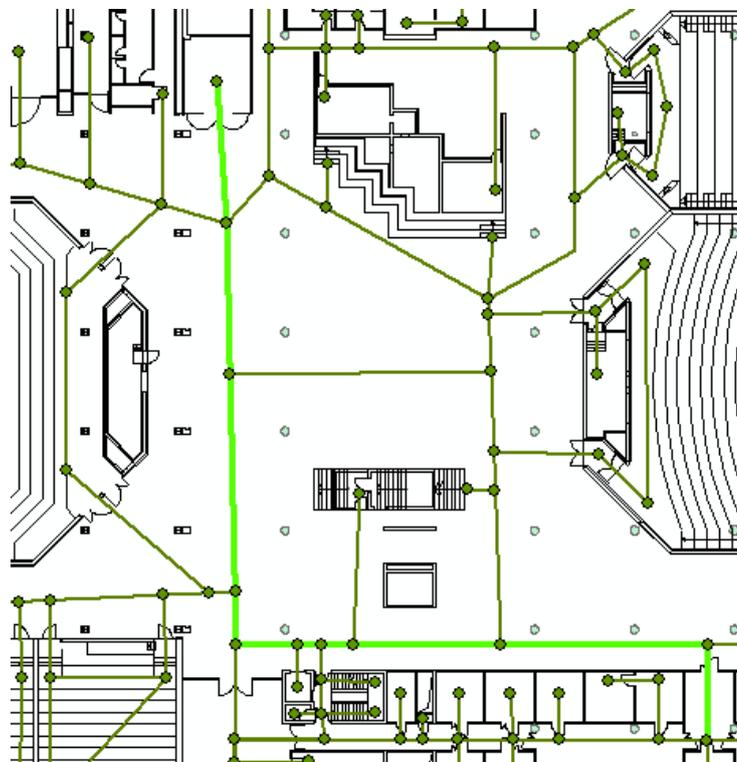


Abbildung 77: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).

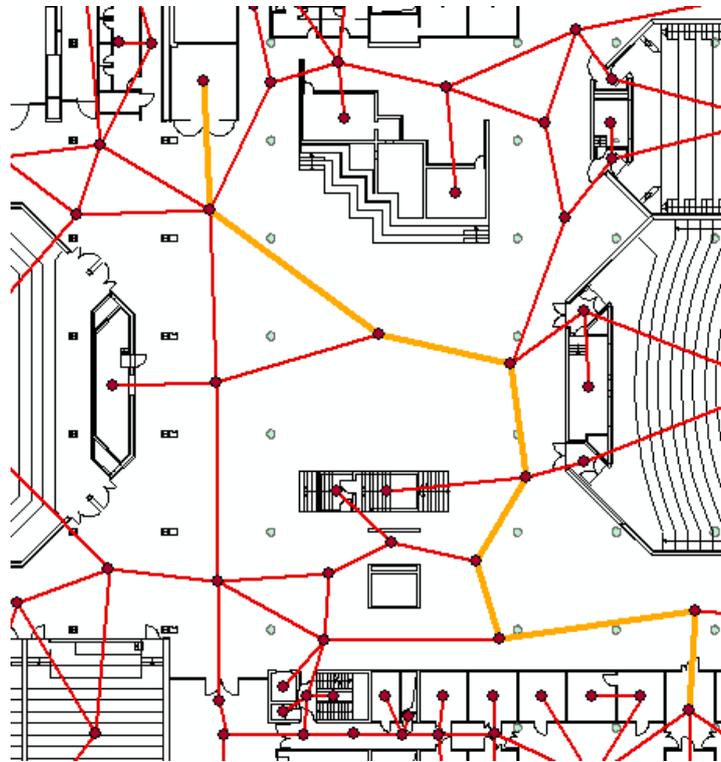
Zell-Netzwerkmodell (M2) in der Freiflächen-Umgebung (U2):

Abbildung 78: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).

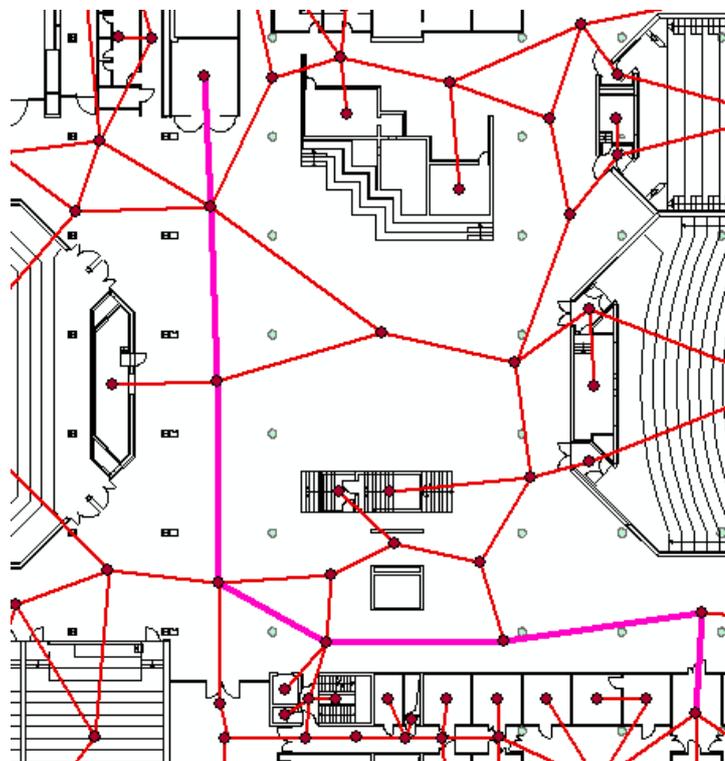


Abbildung 79: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).

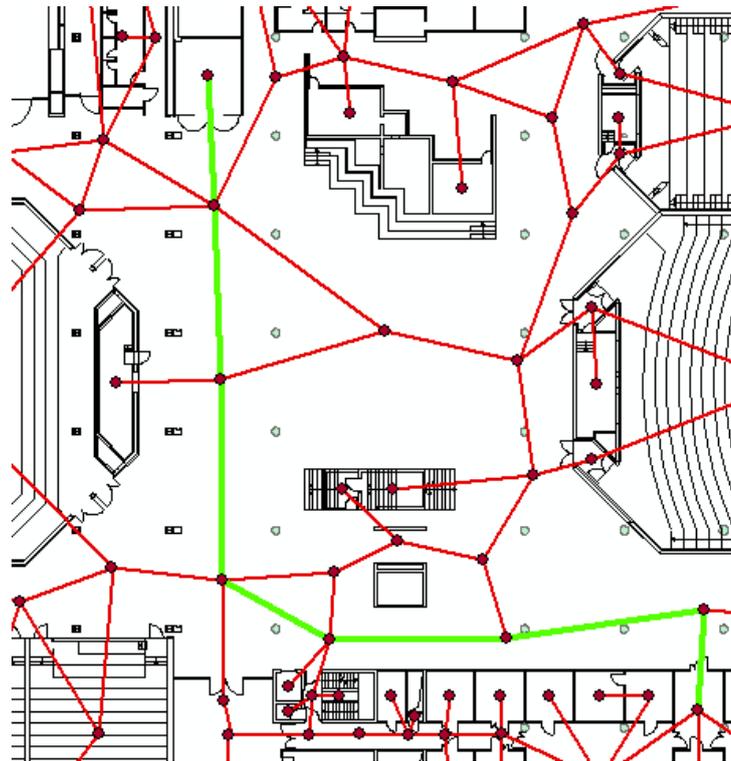


Abbildung 80: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).

Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (M3) in der Freiflächen-Umgebung (U2):



Abbildung 81: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).



Abbildung 82: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).



Abbildung 83: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).

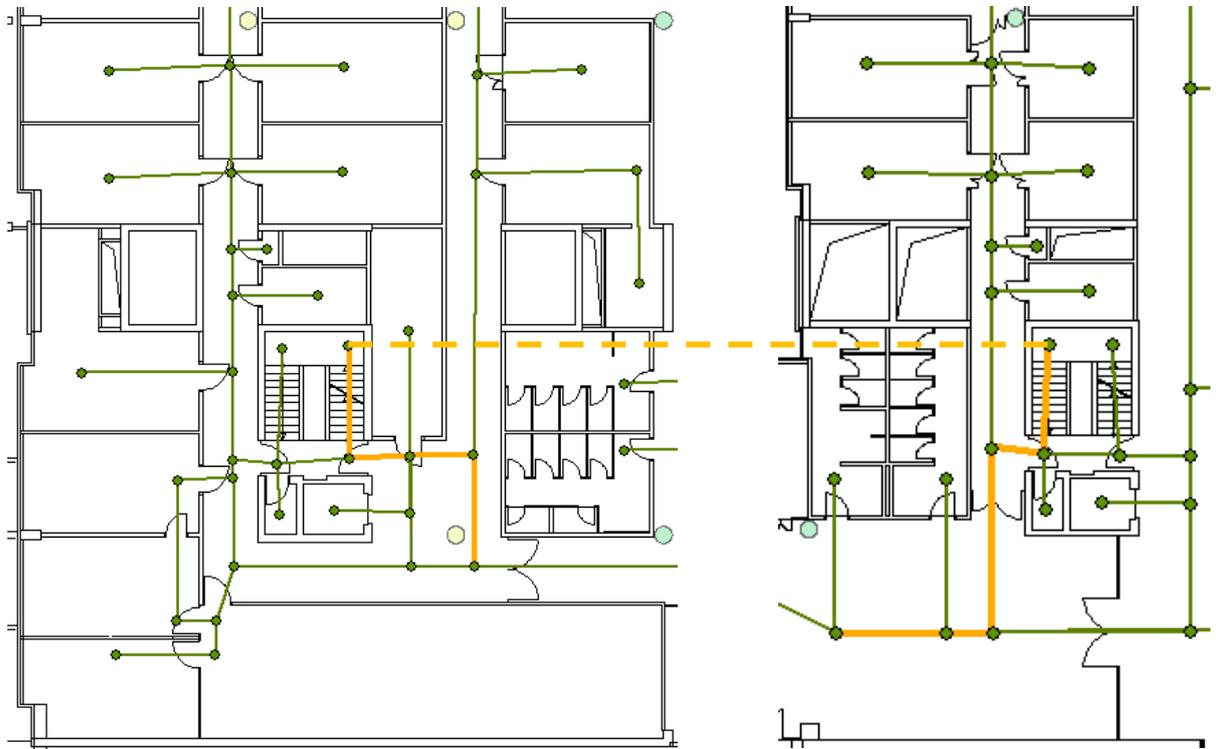
Korridor-Netzwerkmodell (M1) in der Treppen-Umgebung (U3):

Abbildung 84: Das Korridor-Netzwerkmodell (orange) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).

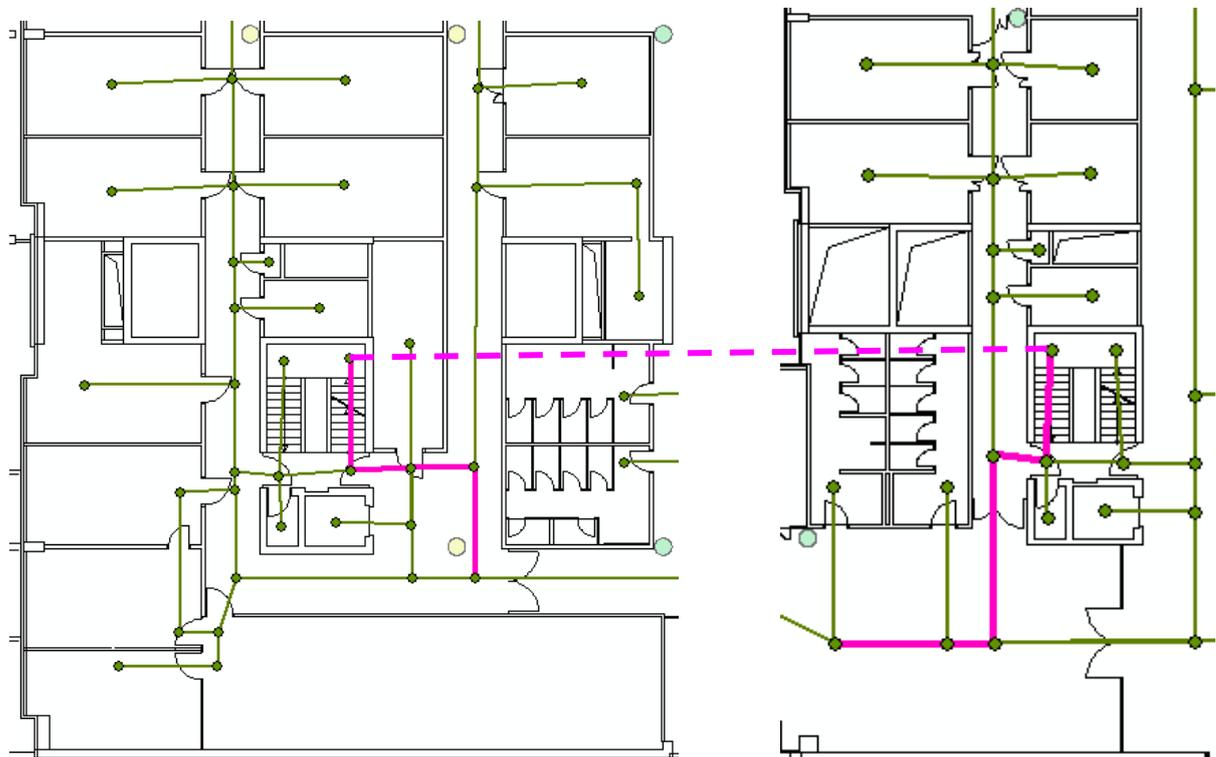


Abbildung 85: Das Korridor-Netzwerkmodell (orange) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).

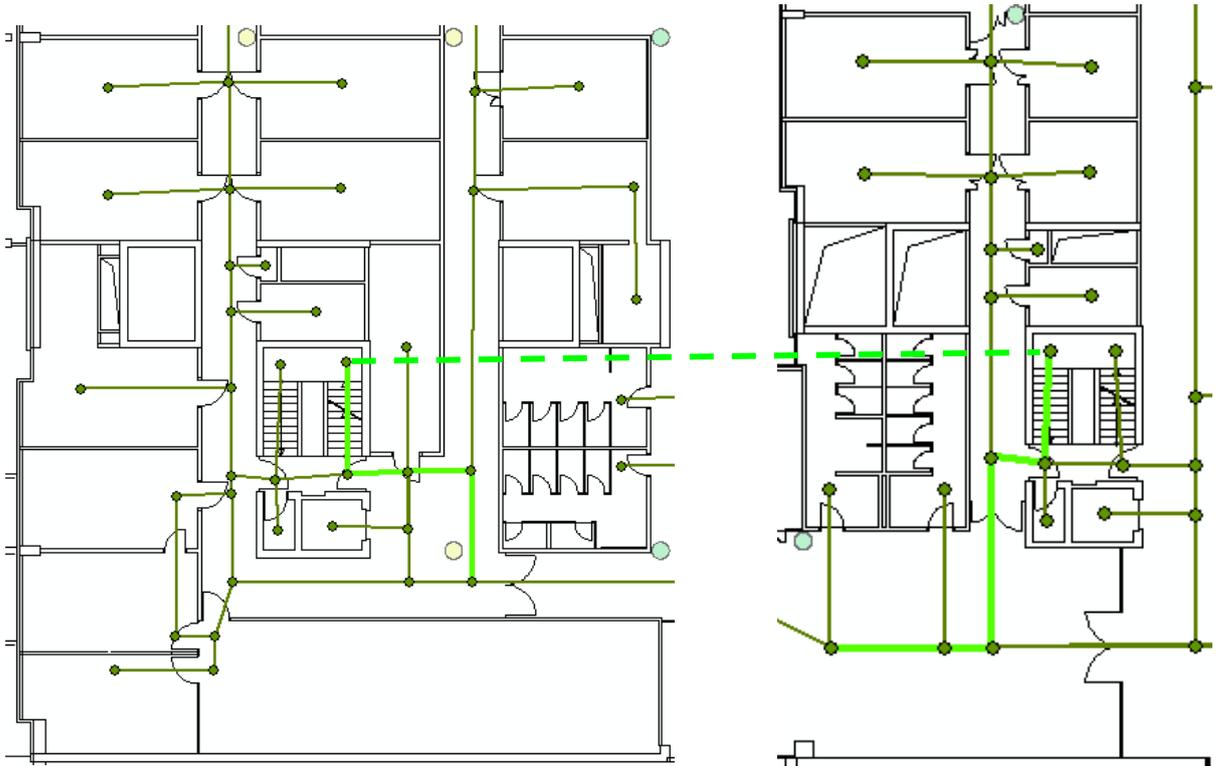


Abbildung 86: Das Korridor-Netzwerkmodell (grün) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).

Zell-Netzwerkmodell (M2) in der Treppen-Umgebung (U3):

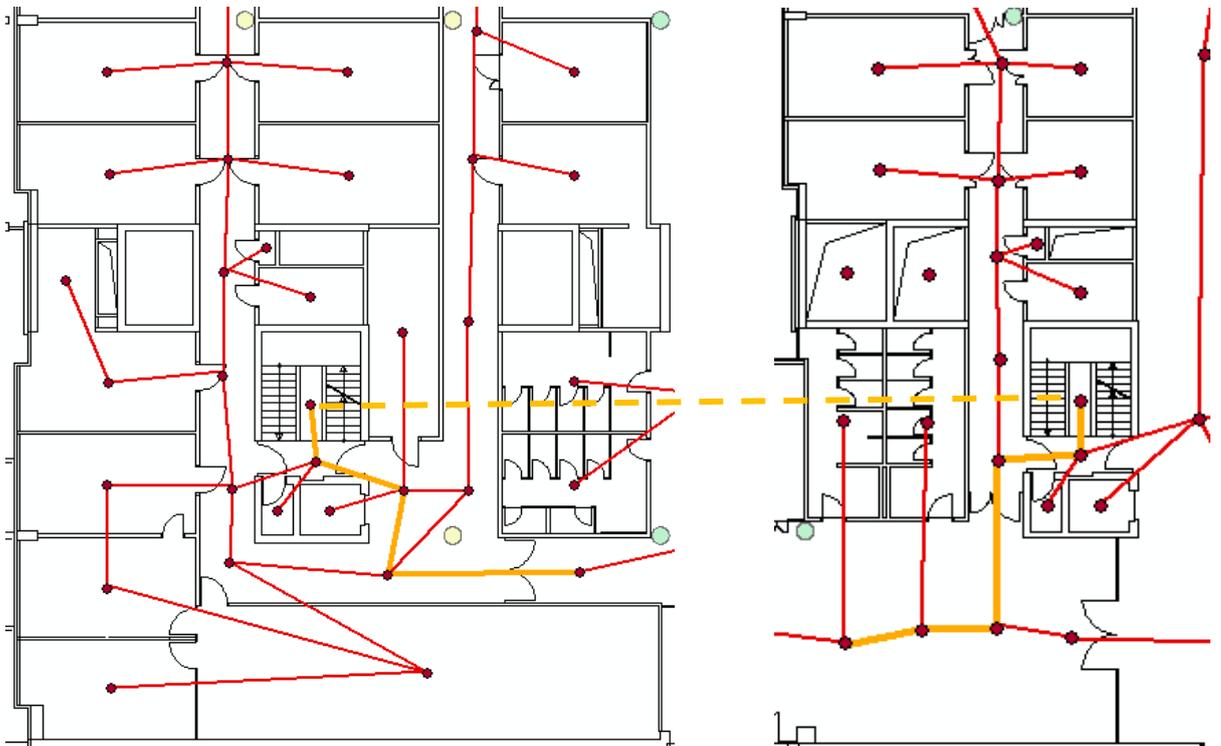


Abbildung 87: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).

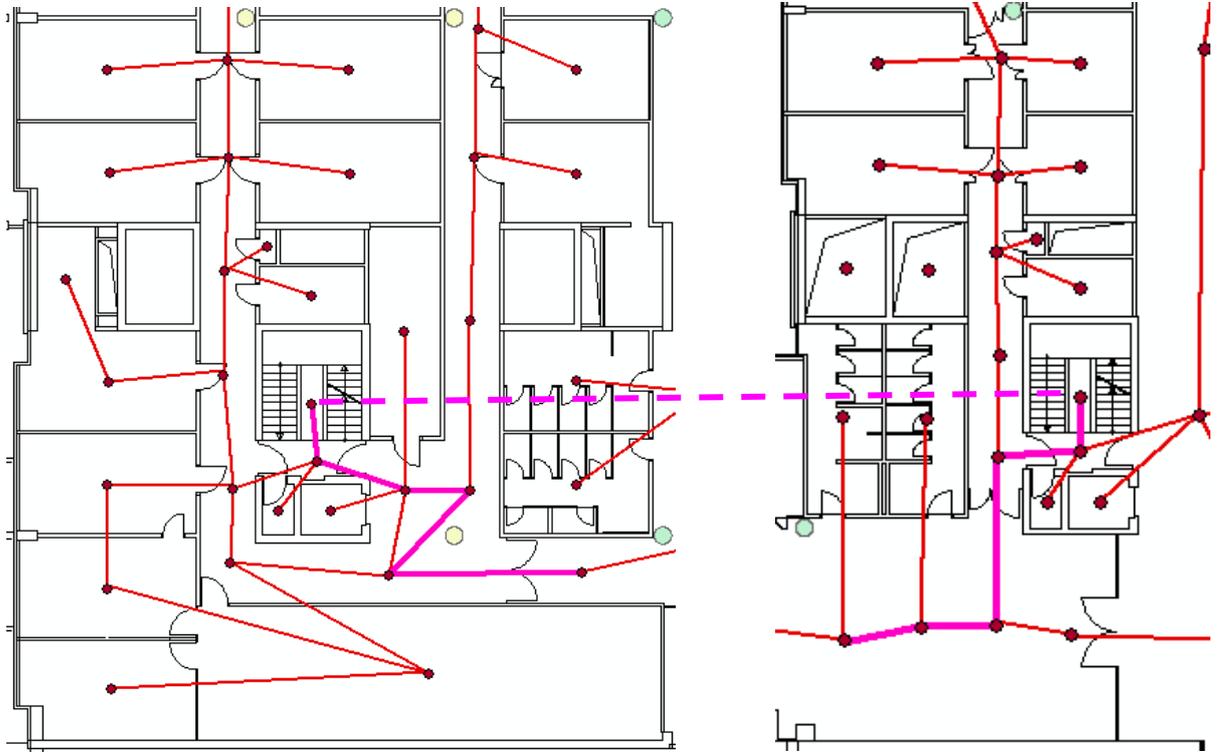


Abbildung 88: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).

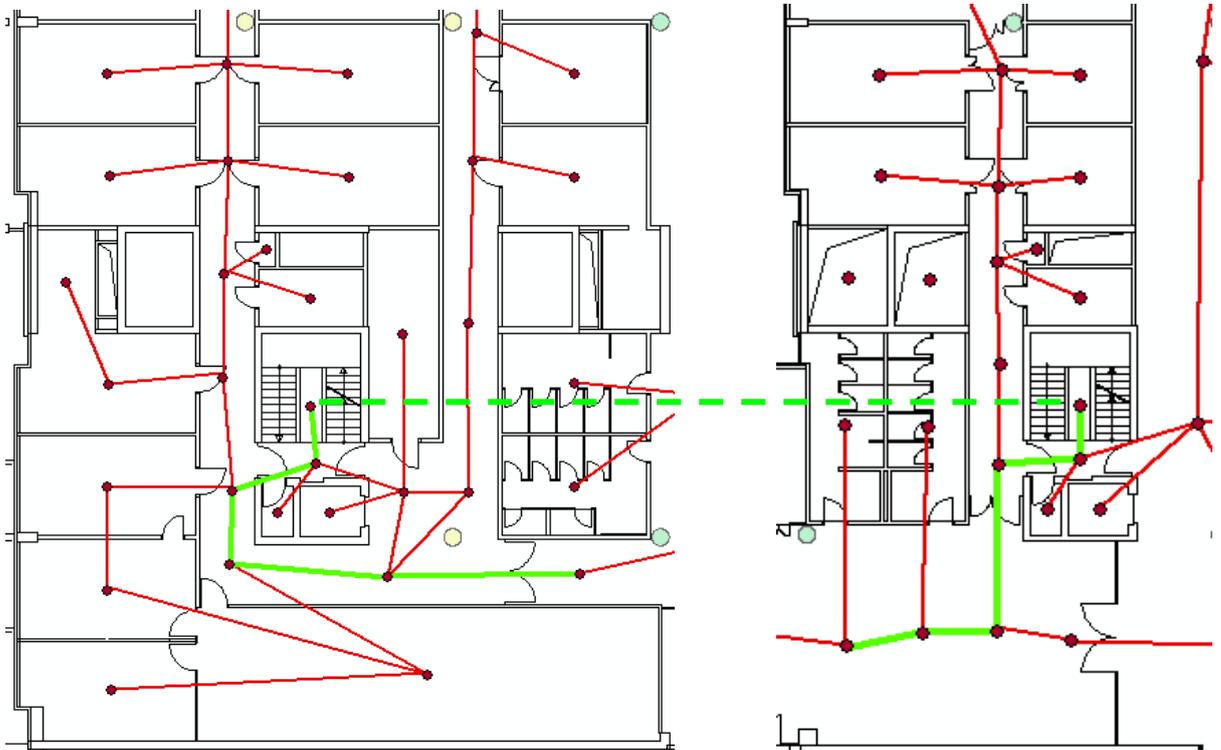


Abbildung 89: Das Zell-Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).

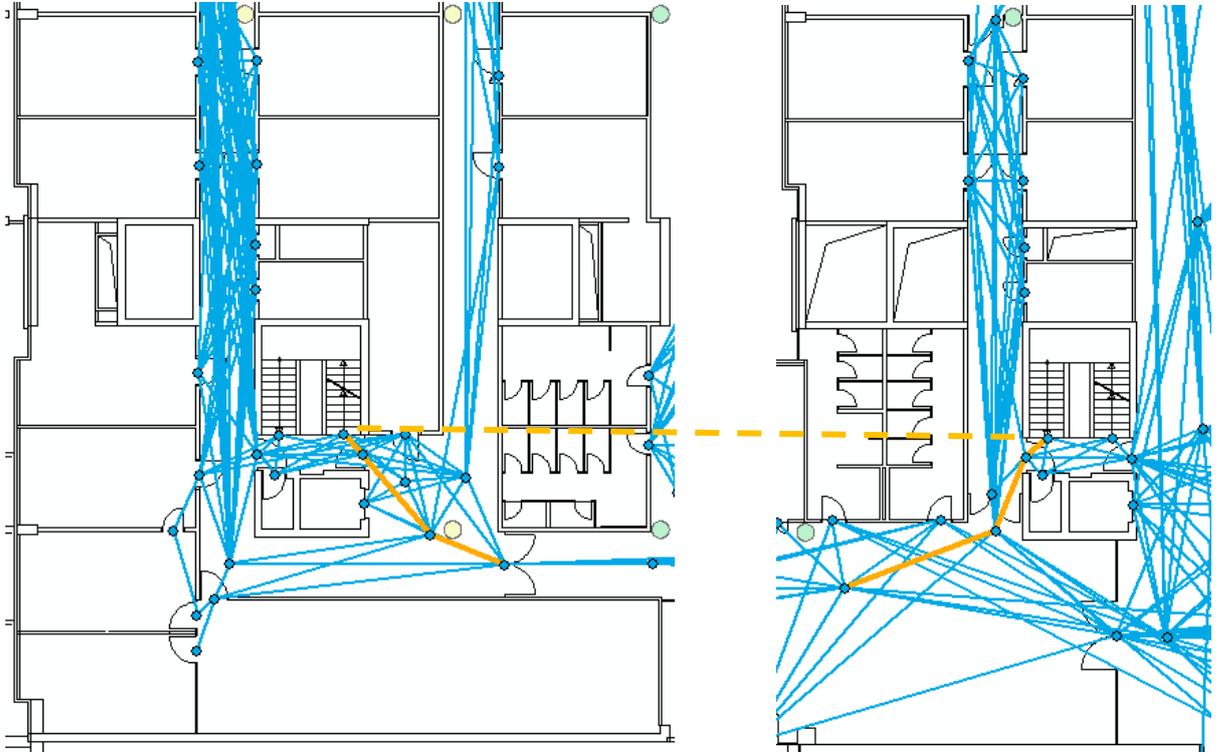
Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (M3) in der Treppen-Umgebung (U3):

Abbildung 90: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).

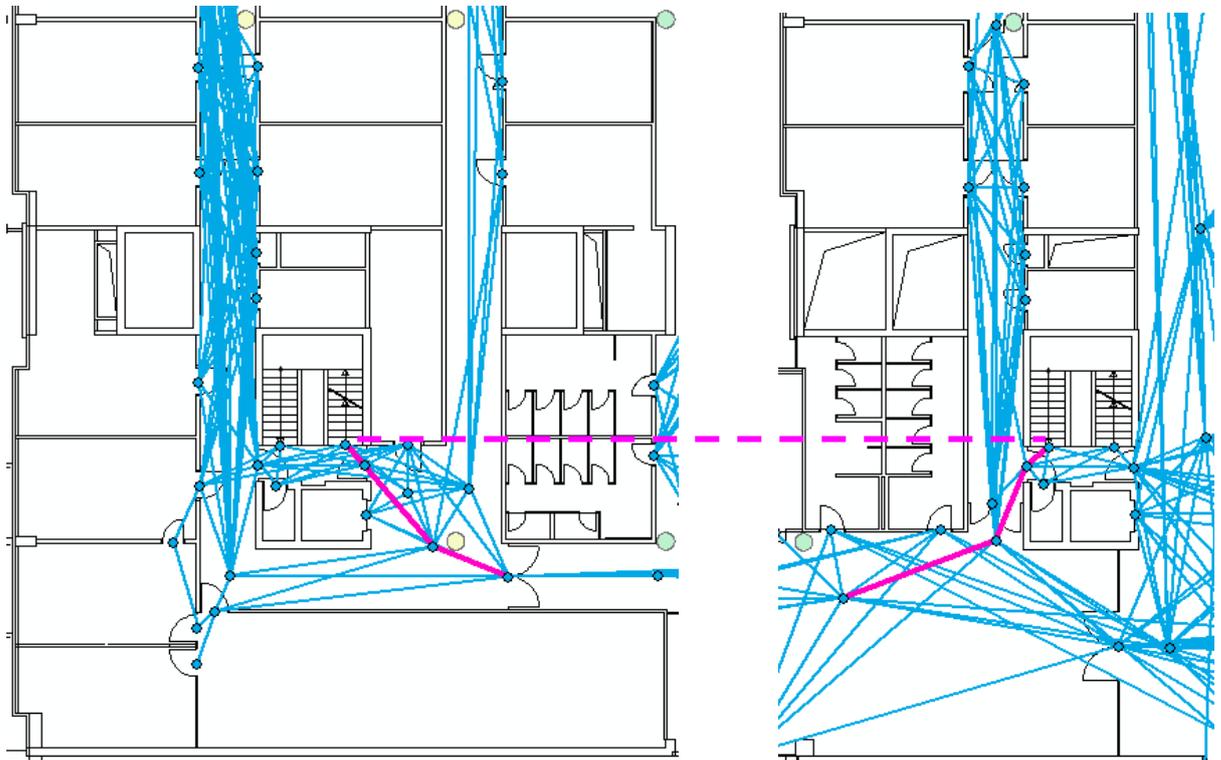


Abbildung 91: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).

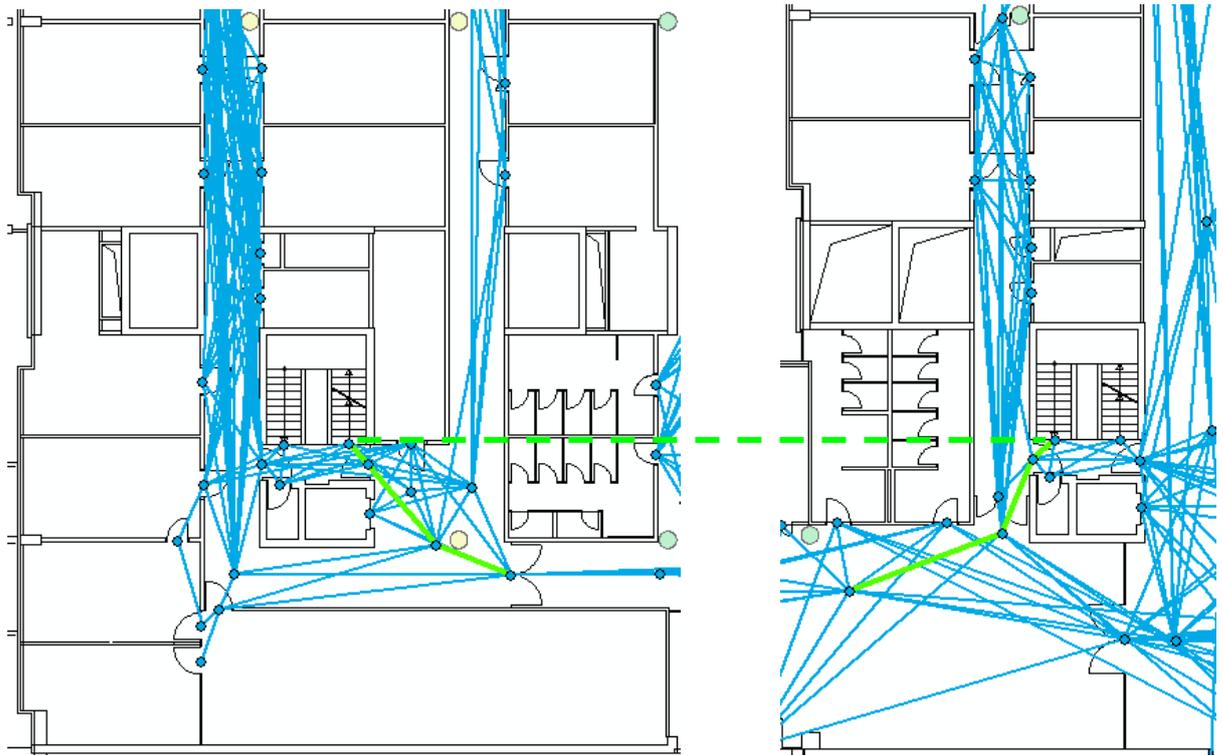


Abbildung 92: Das Sichtbarkeits-Netzwerkmodell (blau) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).

II.b Transformations-Workbench FME

Sub-Transformatoren: Zugangspunkte

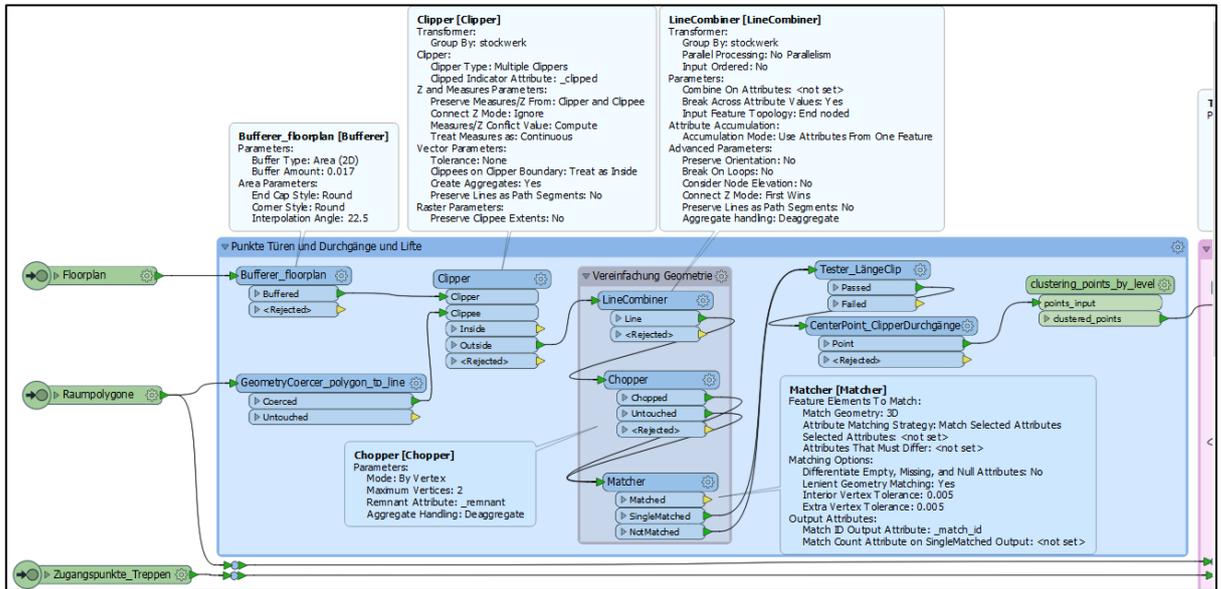


Abbildung 93: Erster Teil des Transformators "Zugangspunkte", der die Zugangspunkte bei Türen, Aufzügen und Durchgängen eruiert.

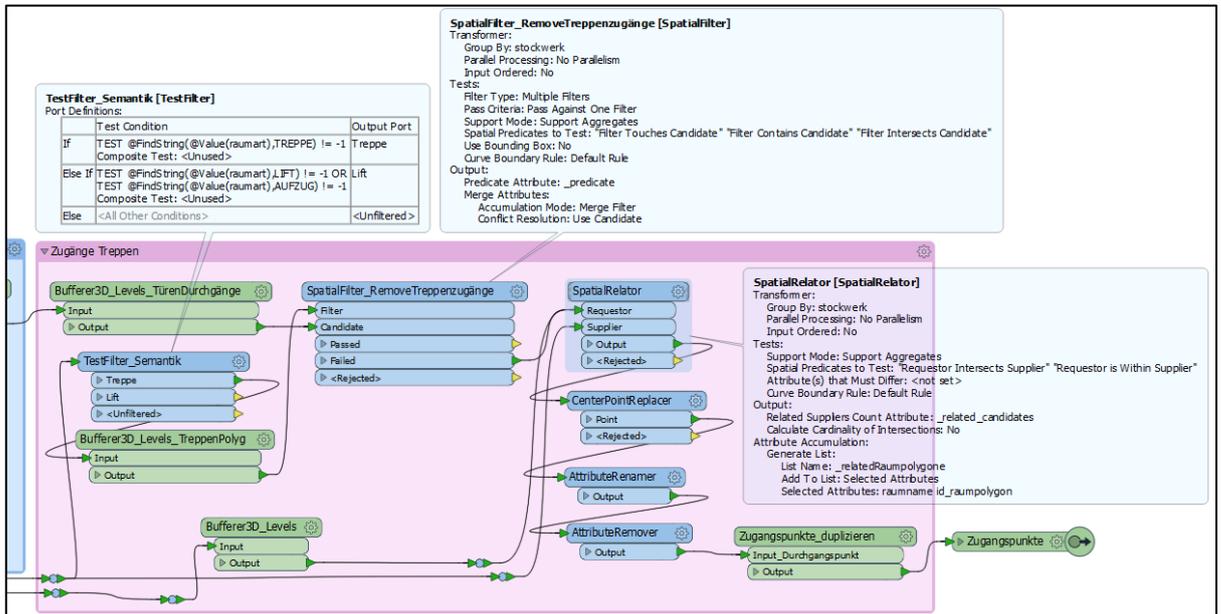


Abbildung 94: Zweiter Teil des Transformators "Zugangspunkte", der die Zugangspunkte bei Treppen ermittelt.

Sub-Transformatoren: TreppenLifte

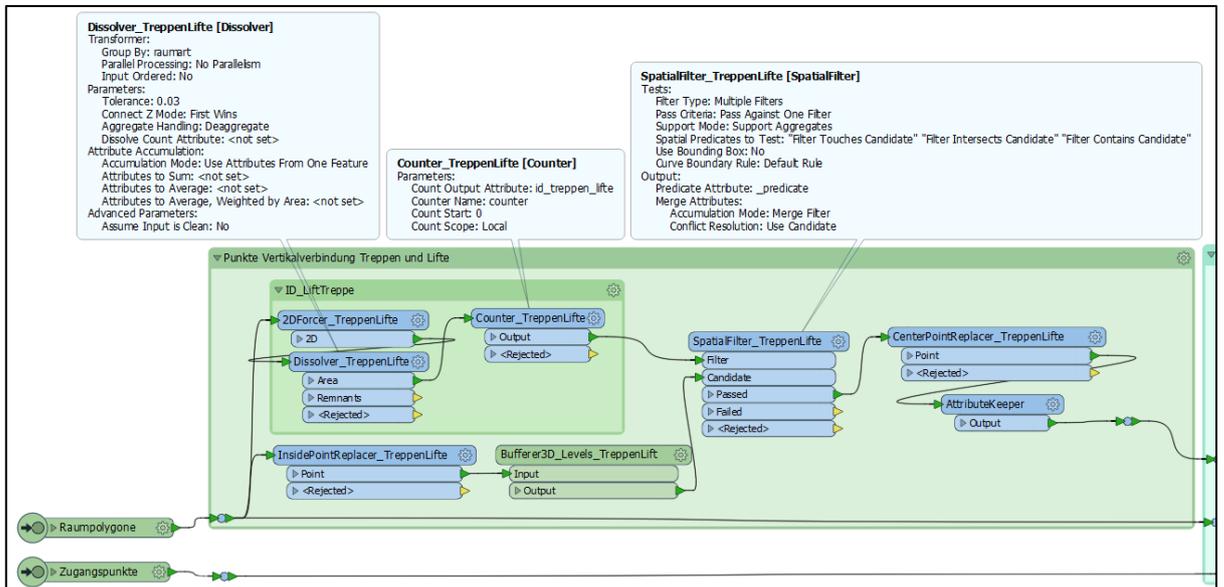


Abbildung 95: Erster Teil des Transformators "TreppenLifte", der die Vertikalverbindungen der Treppen und Lifte erstellt.

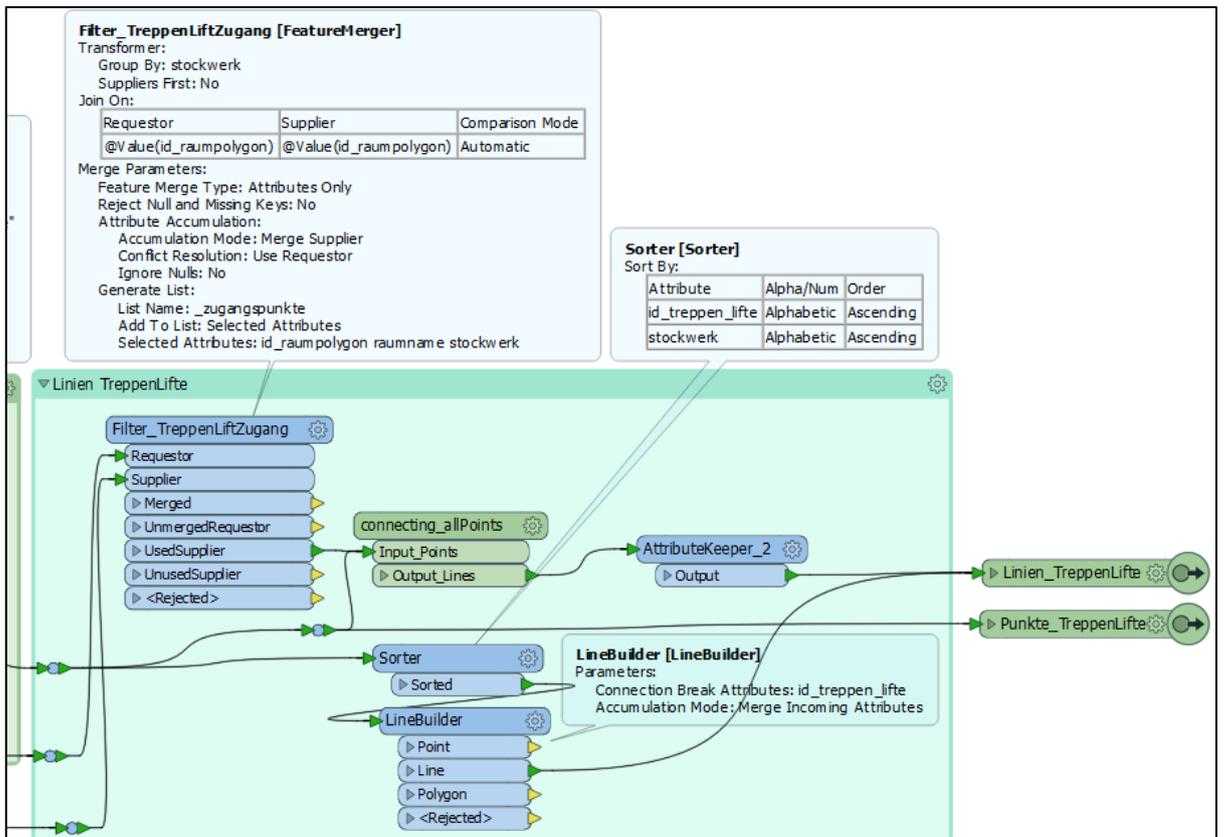


Abbildung 96: Zweiter Teil des Transformators "TreppenLifte", der die Zugangslinien und Punkte der Treppen und Lifte erstellt.

Sub-Transformatoren: Korridore

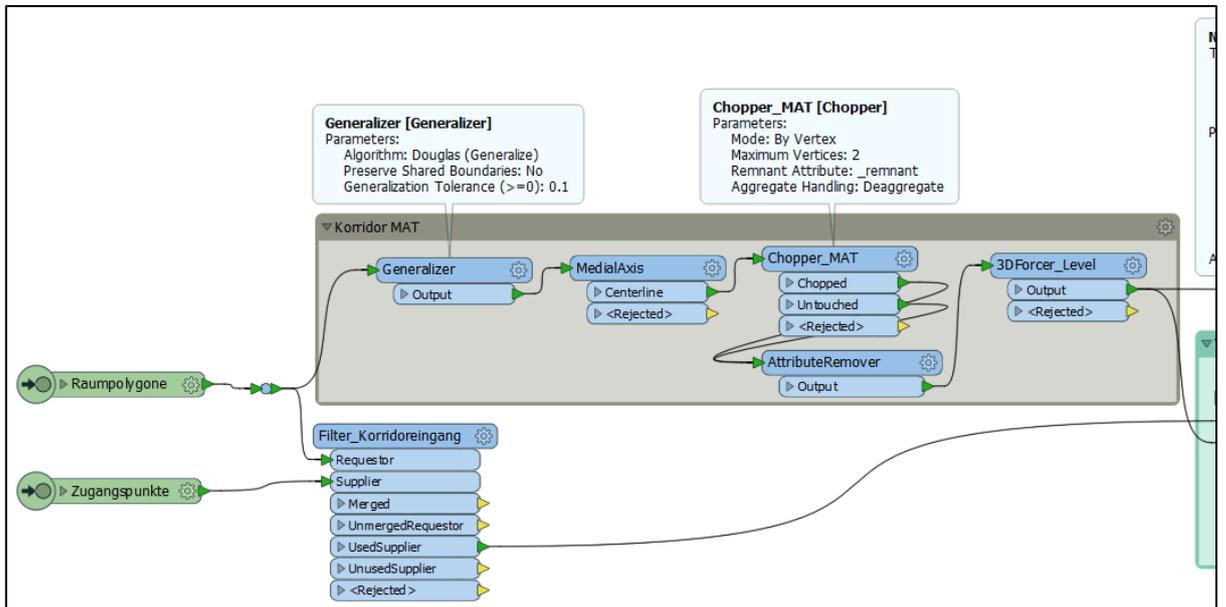


Abbildung 97: Erster Teil des Transformators "Korridore", der die Mittellachsen der Korridore generiert.

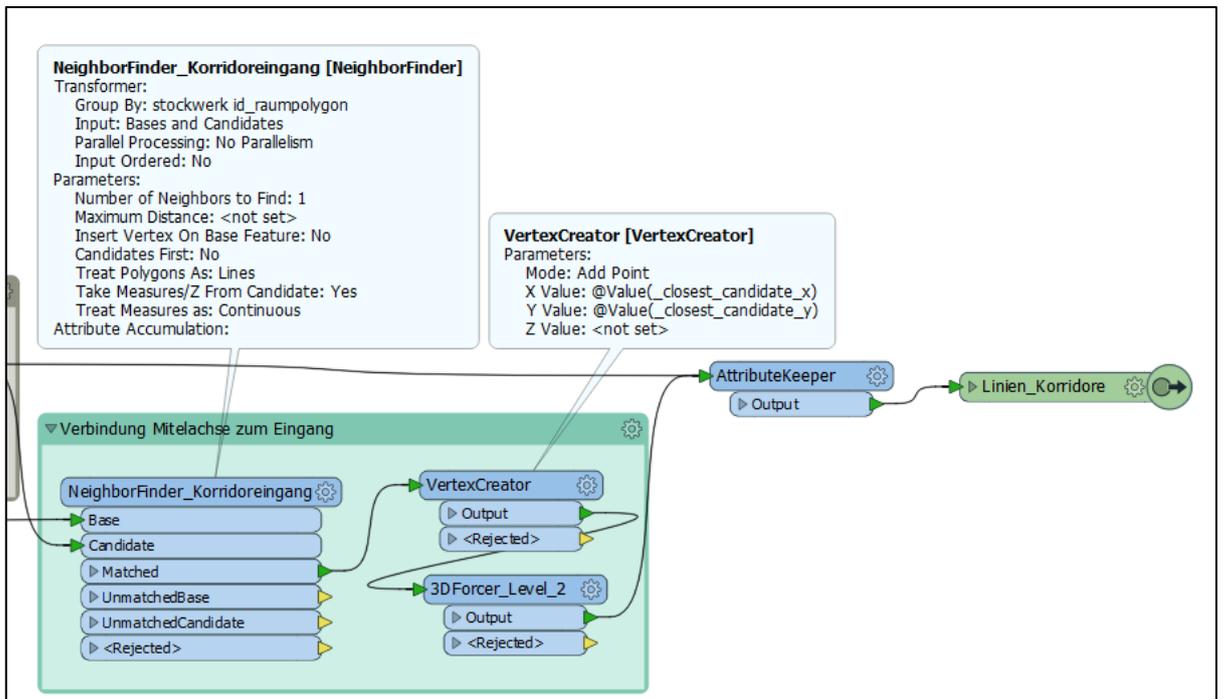


Abbildung 98: Zweiter Teil des Transformators "Korridore", der die Verbindungen der Zugangspunkte zu der Mittelachse herstellt.

Sub-Transformatoren: Freiflächen

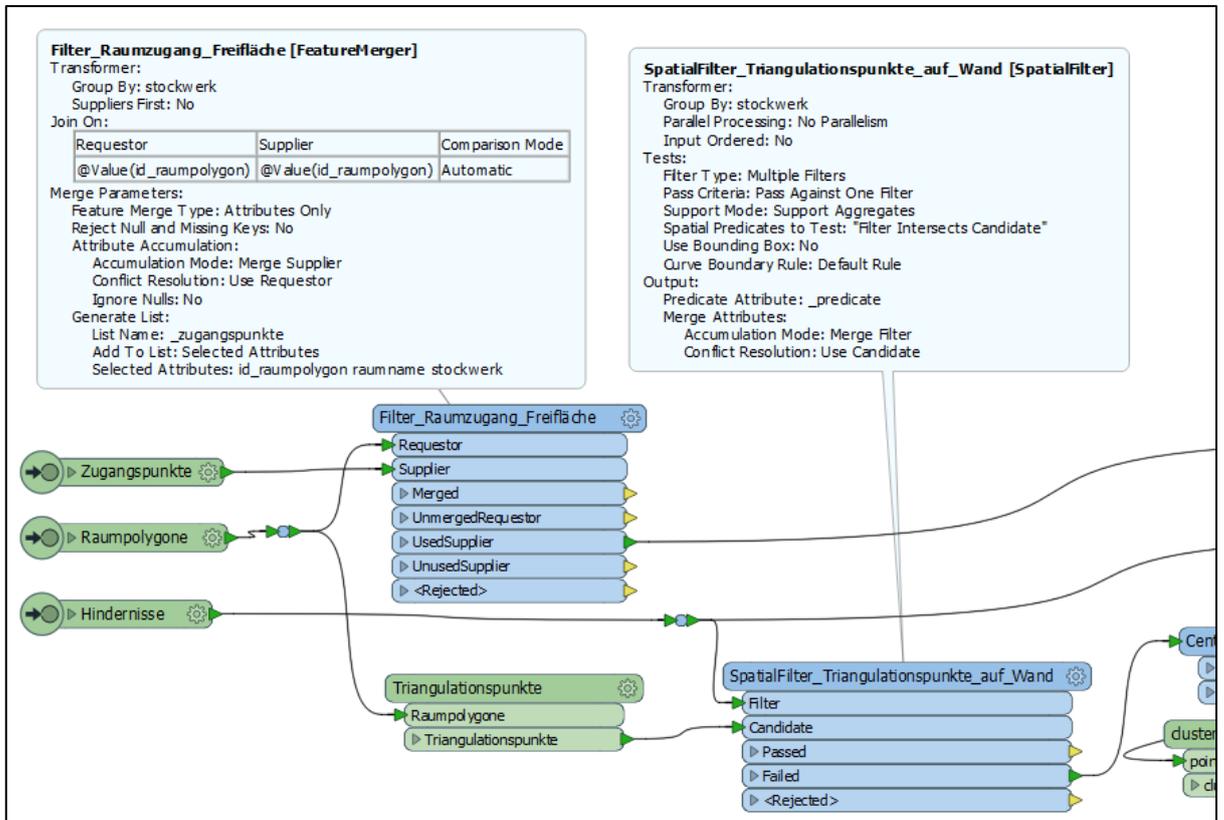


Abbildung 99: Erster Teil des Transformators "Freiflächen", der Vorbereitungen für die Sichtbarkeitslinien macht.

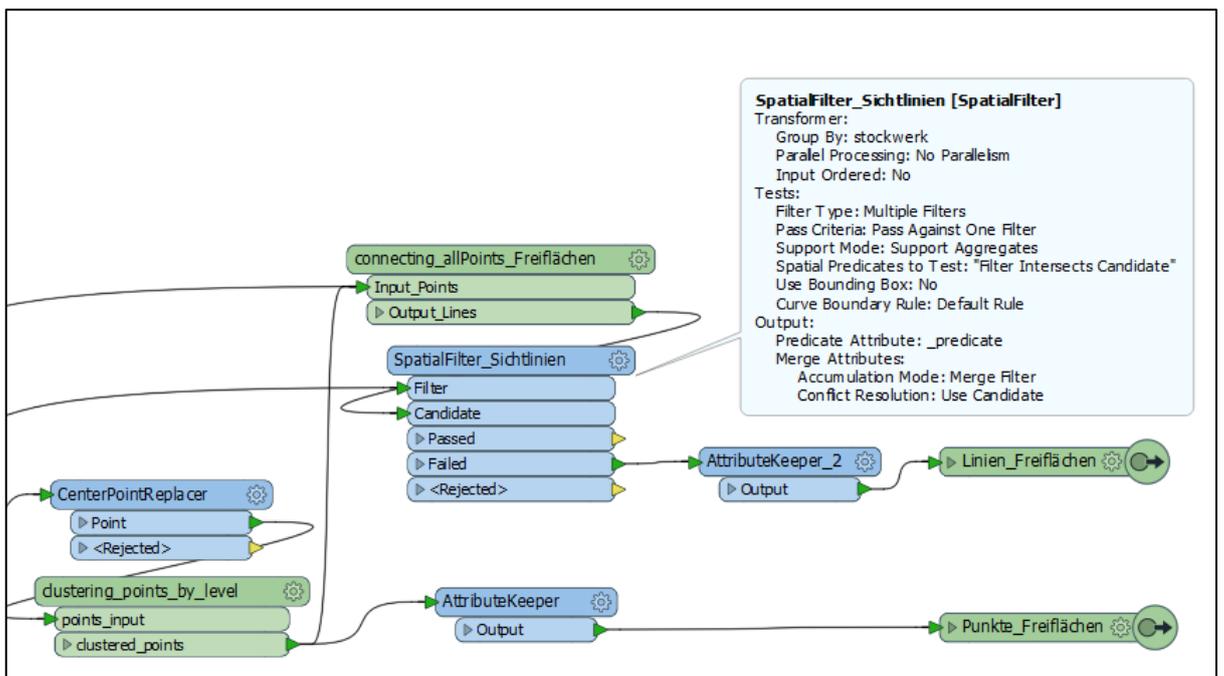


Abbildung 100: Zweiter Teil des Transformators "Freiflächen", der die Sichtbarkeitslinien erstellt.

Sub-Transformatoren: Raum

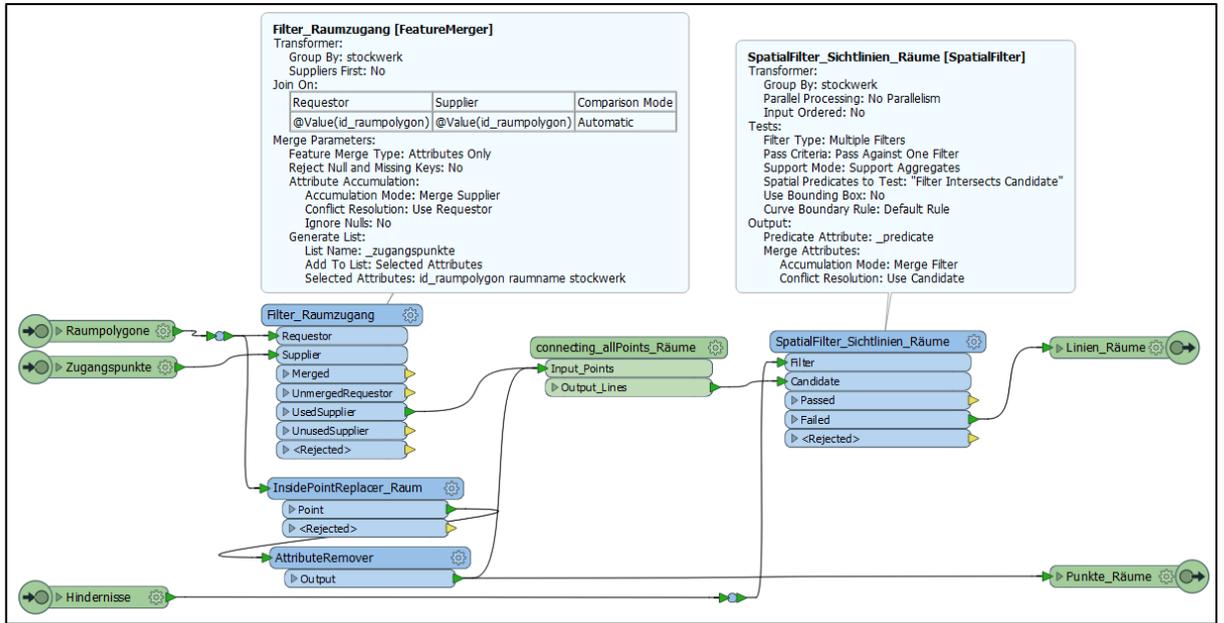


Abbildung 101: Transformator "Raum", der die Räume modelliert.

Funktionen

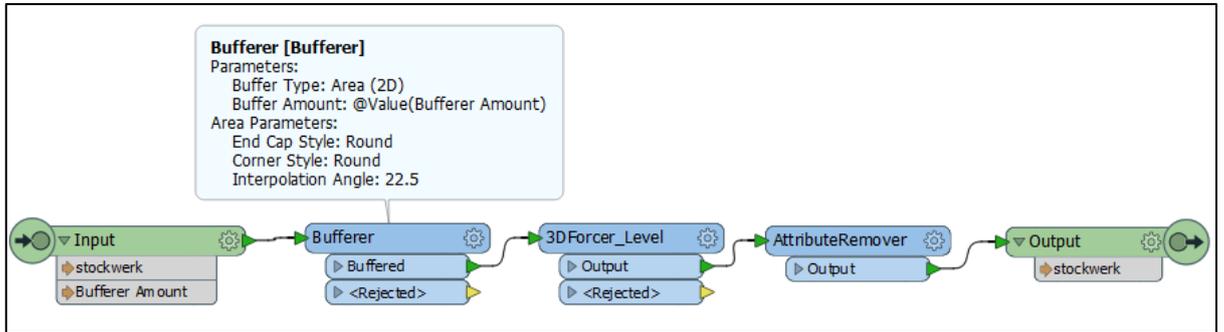


Abbildung 102: Der Transformator "Bufferer3D_Levels", der Punkte buffert und wieder auf das Stockwerk mappt.

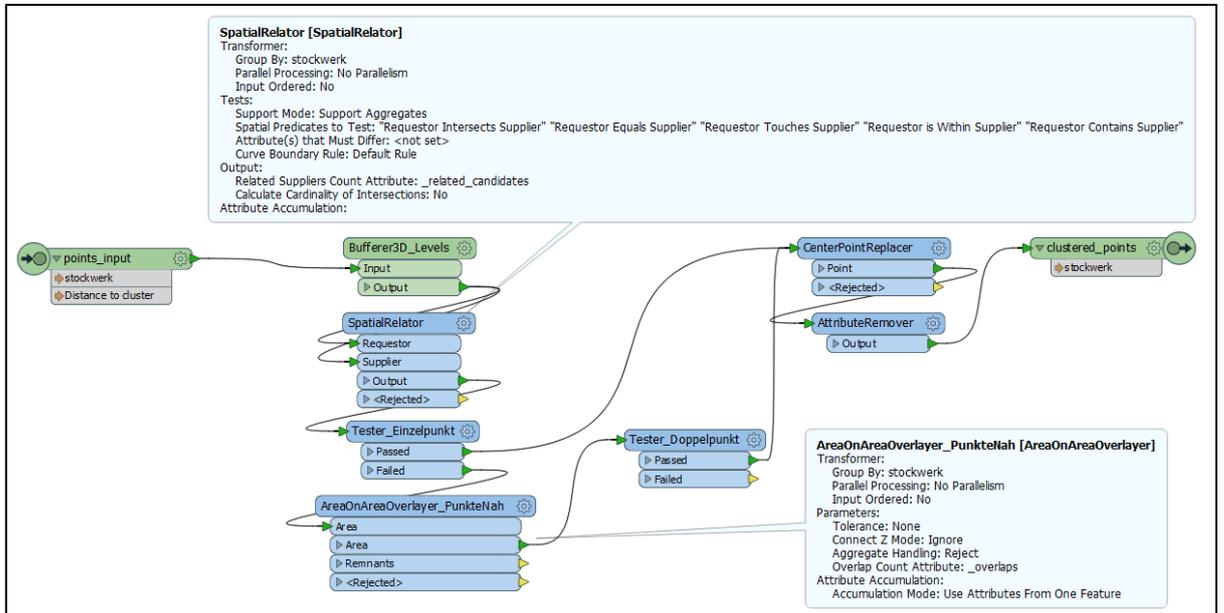


Abbildung 103: Der Transformator „Clustering_Points_By_Level“ der pro Stockwerk die Punkte in einer gewissen Distanz clustert.

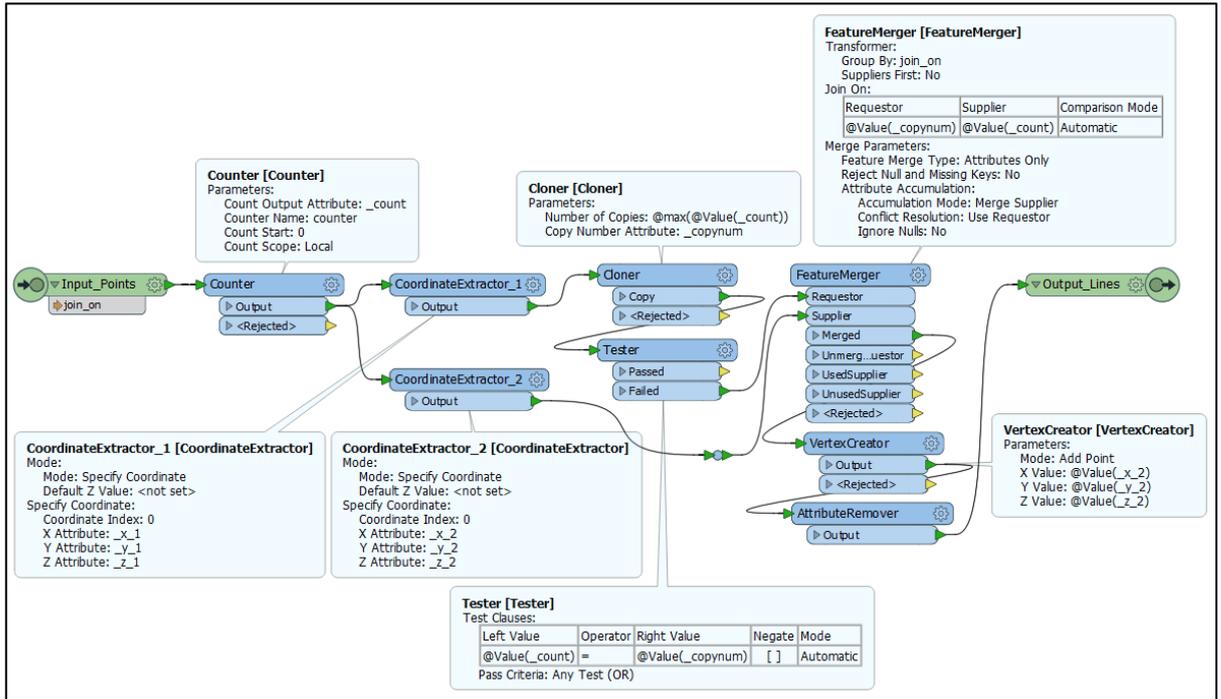


Abbildung 104: Der Transformator "Connecting_allPoints", der alle Punkte mit einem gleichen Attribut miteinander verbindet.

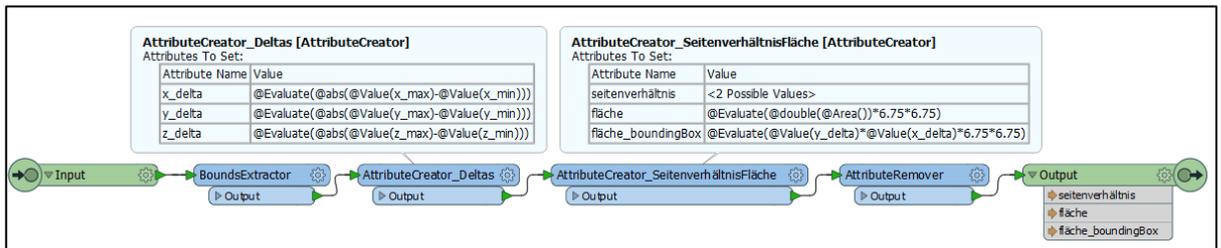


Abbildung 105: Der Transformator "Geometrie_Eigenschaften", der geometrische Eigenschaften der Raumeinheiten berechnet.

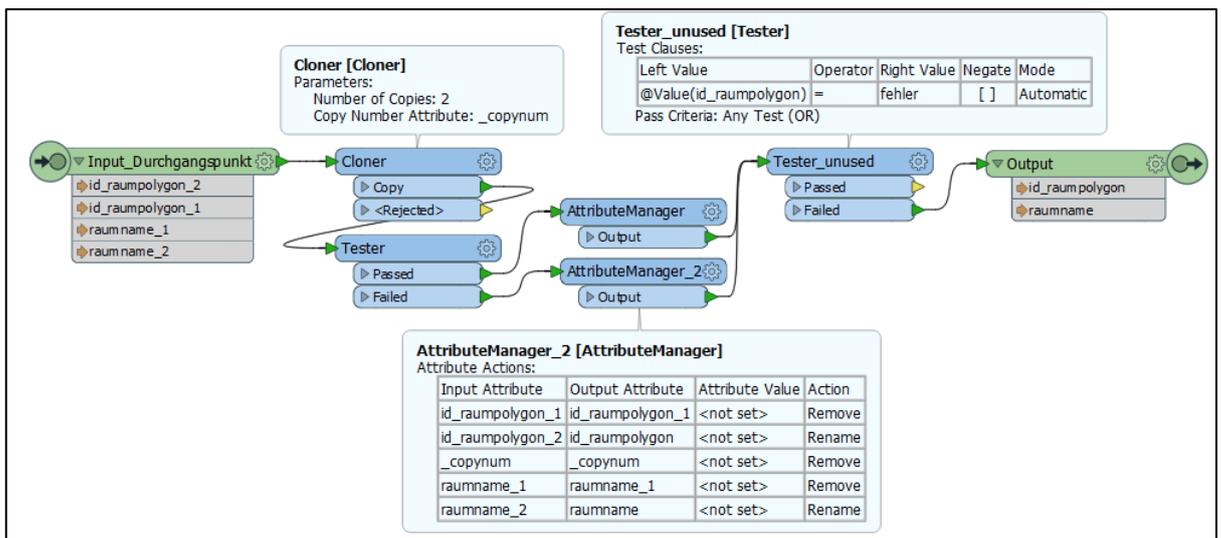


Abbildung 106: Der Transformator "Zugangspunkte_duplizieren", der Zugangspunkte dupliziert und somit eindeutig macht.

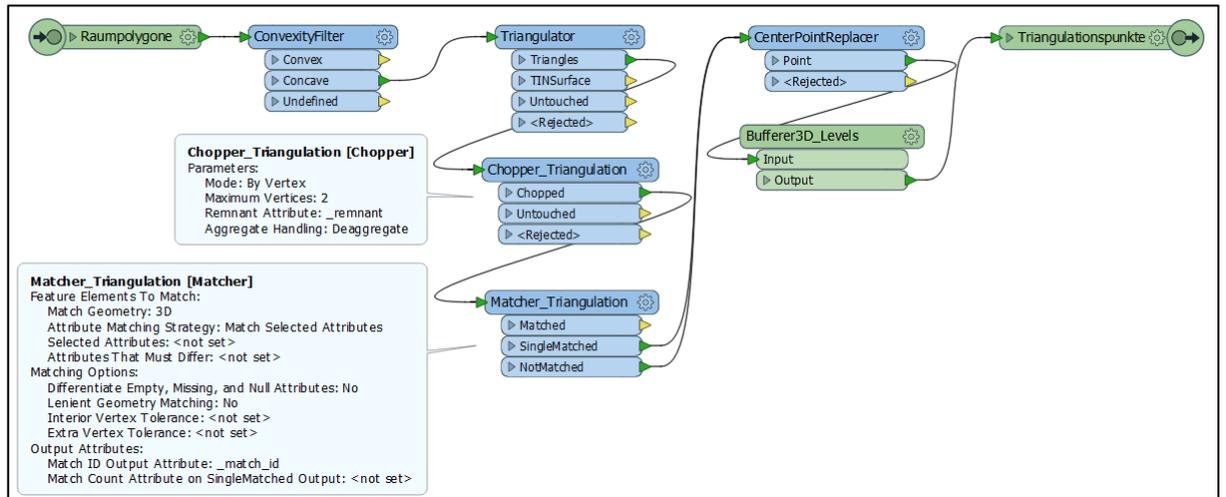


Abbildung 107: Der Transformator "Triangulationspunkte" trianguliert die Raumpolygone und setzt auf die Mitte der Dreiecksseiten einen Punkt.

II.c Netzwerkmodell-Studie des hybriden Ansatzes

Es sind die folgenden Pfade eingezeichnet:

- Kürzester Weg (R1)
- Abbiegungs-Algorithmus (R2)
- Einfachster Weg (R3)

Das hybride Netzwerkmodell in der Korridor-Umgebung (U1):

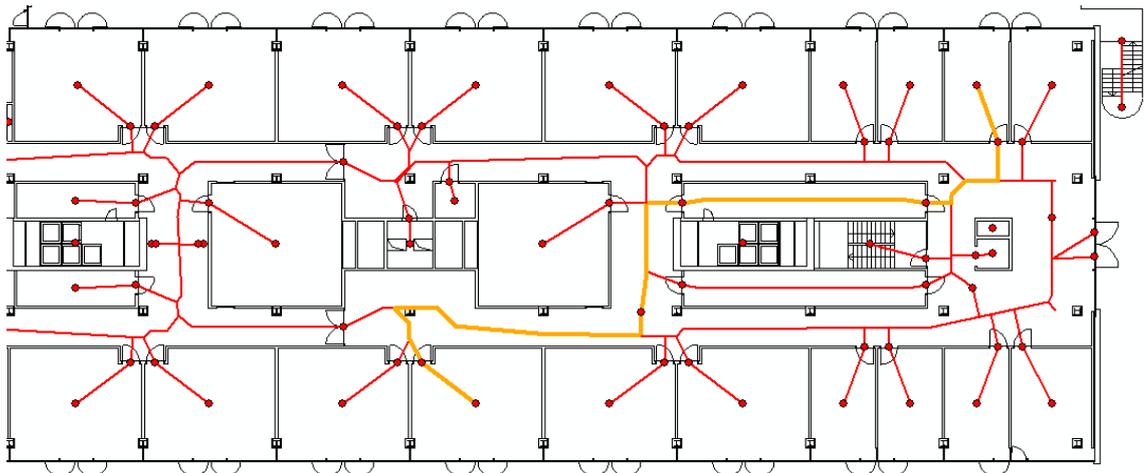


Abbildung 108: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).

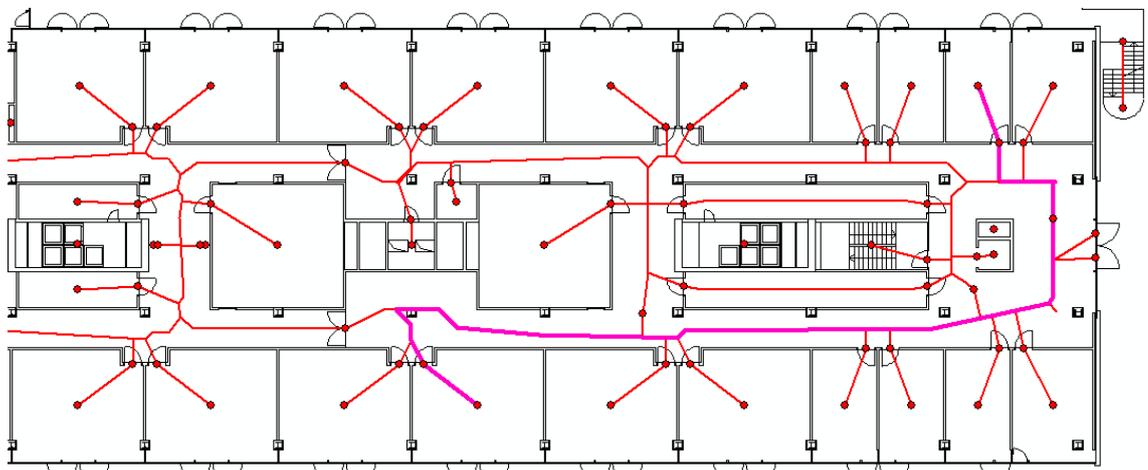


Abbildung 109: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).

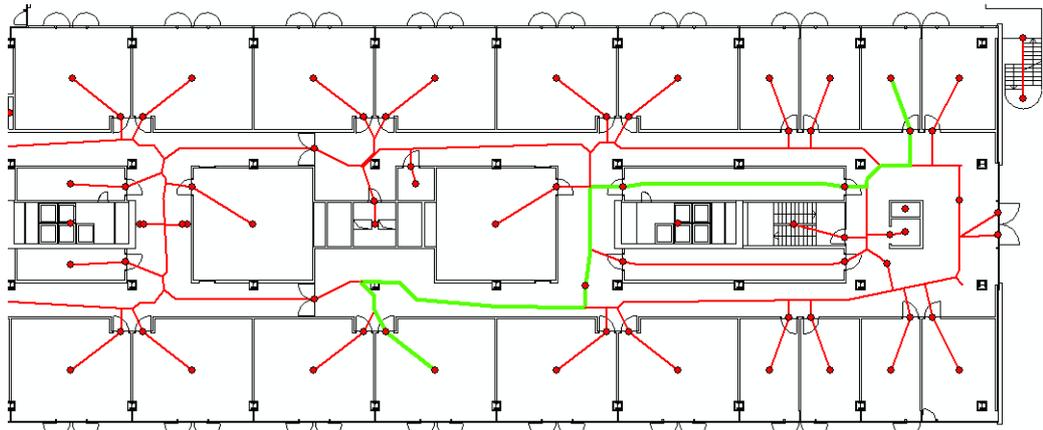


Abbildung 110: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Korridor-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).

Das hybride Netzwerkmodell in der Freiflächen-Umgebung (U2):



Abbildung 111: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).



Abbildung 112: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).



Abbildung 113: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Freiflächen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).

Das hybride Netzwerkmodell in der Treppen-Umgebung (U3):

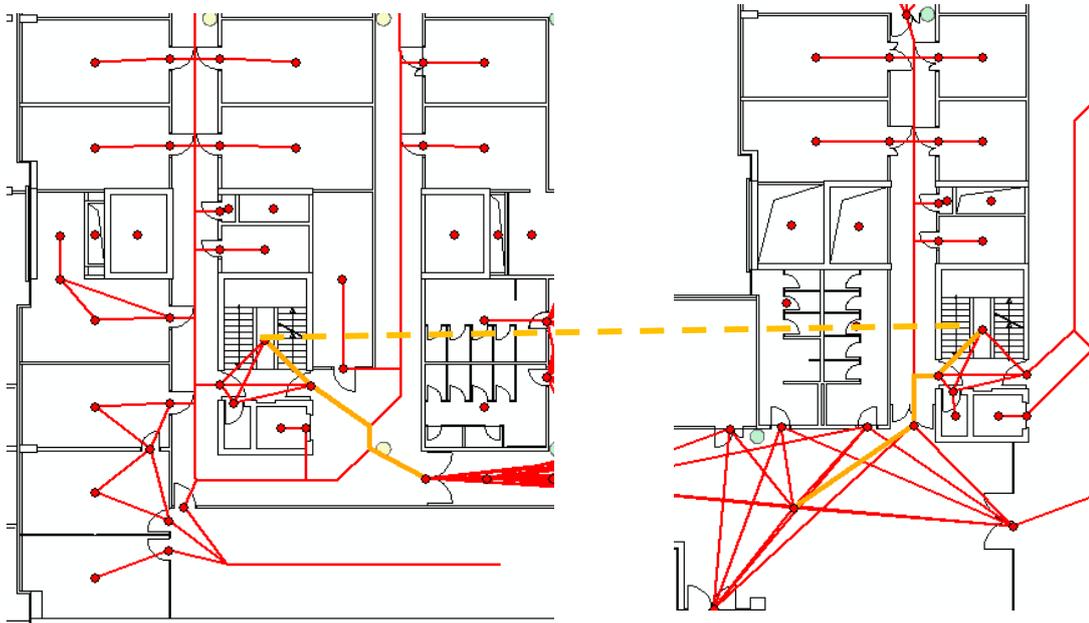


Abbildung 114: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Kürzesten-Weg-Algorithmus (orange).

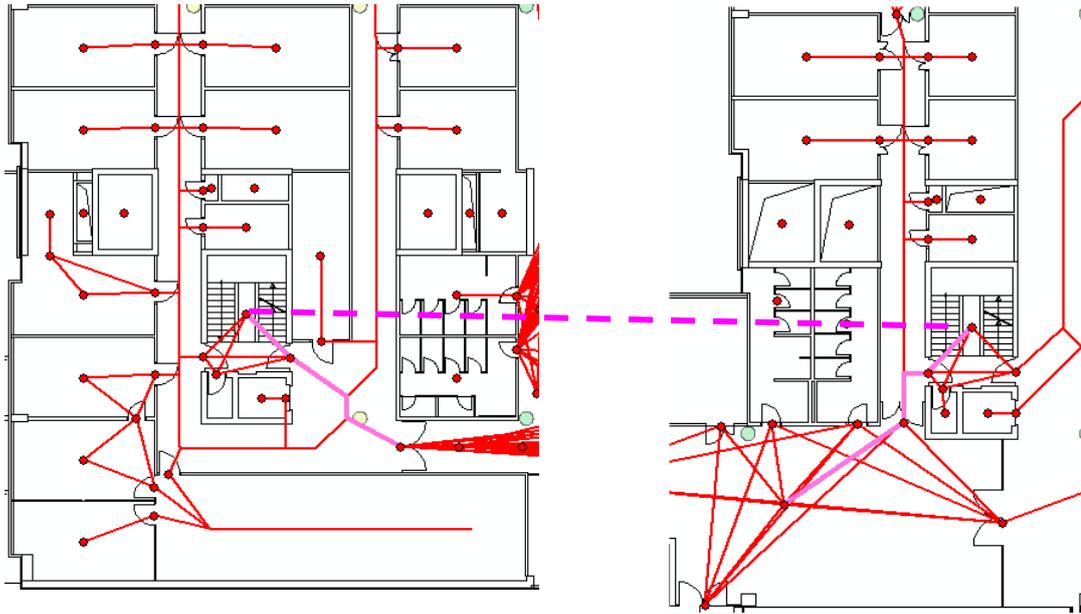


Abbildung 115: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Abbiegungs-Algorithmus (pink).

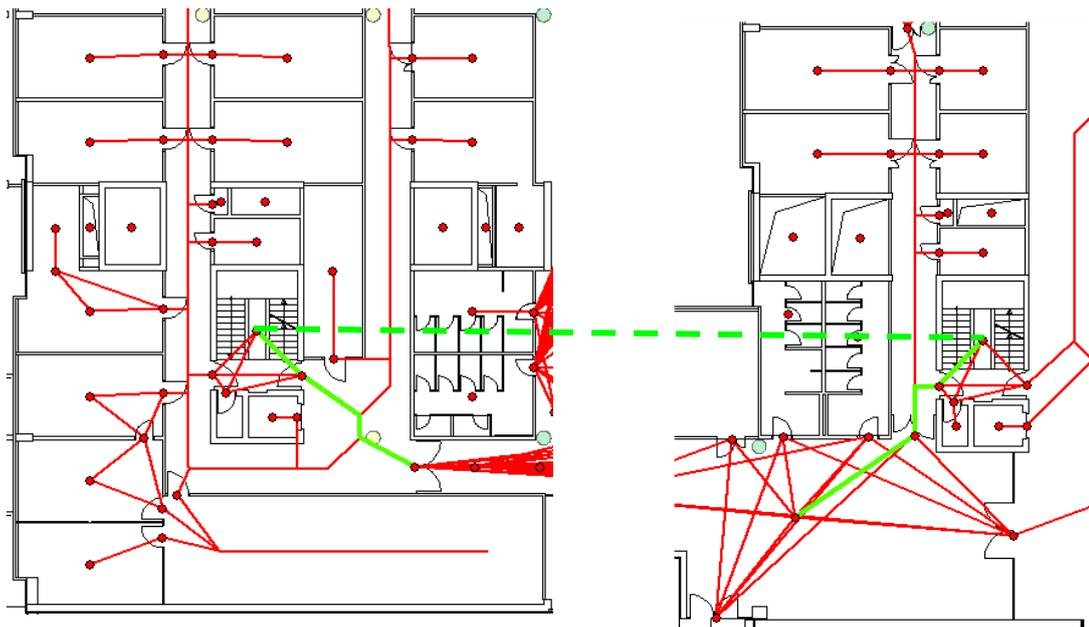


Abbildung 116: Das hybride Netzwerkmodell (rot) in der Treppen-Umgebung mit dem Pfad des Einfachsten-Weg-Algorithmus (hellgrün).



**Universität
Zürich**^{UZH}

Geographisches Institut

GEO 511 Masterarbeit – Selbstständigkeitserklärung

Persönliche Erklärung

Titel der Arbeit: Beurteilung von Netzwerkmodellen für die Indoor-Routenplanung

Leiter/-in der Arbeit: Prof. Dr. Robert Weibel

Name, Vorname: Melanie Willimann

Matrikelnummer: 12-102-968

Studiengang: Master of Science in Geography

Modul: GEO 511 Masterarbeit

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Hochdorf, 30. Juni 2018

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Willimann', written over a horizontal dotted line.

Unterschrift