universität wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Prozessorientiertes 3D Karten Design für den vertikal segmentierten Indoor Raum

Verfasst von / submitted by

Jonathan Gallagher, B.A.

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirenments for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2017

Studienkennzahl lt. Studienblatt / degree programme code as it appears on the student record sheet:	A 066 856
Studienrichtung lt. Studienblatt / degree programme as it appears on the student record sheet:	Kartographie und Geoinformation
Betreuer / Supervisor:	Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

Inhalt

Inhalt ..... **i**

Abbildungsverzeichnis ..... **iv**

Tabellenverzeichnis ..... **vii**

Glossar ..... **viii**

Kurzfassung ..... **x**

Abstract ..... **xi**

Vorwort ..... **xii**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation 2

1.2 Zielsetzung und Fragestellung 6

1.3 Aufbau und Struktur 7

2 Theoretische Grundlagen **9**

2.1 Typen kognitiver Repräsentation von Raum 9

2.2 Rolle der Perspektive 10

2.3 Bedeutung von Landmarken 12

2.4 Der vertikal segmentierte Indoor Raum 14

2.5 Die kognitive Codierung des vertikalen Raums 15

2.6 Bedeutung von vertikalen Transitionselementen 17

3 Aspekte des 3D Karten Designs **19**

3.1 Kartenelemente und graphische Variablen 19

3.2 Einordnung von 3D Karten 22

3.3 Prozesskette zur Erstellung von 3D Karten 24

3.4 Gestaltungsaspekte und -variablen von 3D Karten 27

4 Designimplikationen für 3D Indoor Karten **30**

4.1 Grad der Generalisierung 30

4.2 Selektion der Kartenobjekte 35

4.3 Genauigkeit der Datenerfassung 36
4.4 Erfasste Attribute....37
4.5 Erfassungstechnik....39
4.6 Digitalisierungsaspekte 40
4.7 Modellierung des DGMs und der Z-Achse 43
4.8 Modellierung der topographischen Kartenobjekte 45
4.9 Symbolisierungsaspekte der äußeren Erscheinung 47
4.10 Oberflächenaspekte der Symbolisierung....52
4.11 Symbolisierungsaspekte von Schriftobjekten 56
4.12 Visualisierungsaspekte der Kamera 57
4.13 Licht, Schatten und atmosphärische Effekte 59
4.14 Zusammenfassung der Design Implikationen 64
5 Erfassung und Digitalisierung in der OpenStreetMap 67
5.1 Grundlagen der OSM 67
5.2 Indoor Daten in der OSM....69
5.3 Simple Indoor Tagging und Erweiterungen 70
5.4 Datenerfassung vor Ort 76
5.5 Digitalisierung mit JOSM 80
6 3D Modellierung mit Python 85
6.1 Datenextraktion und manuelle Aufbereitung 86
6.2 Datenklassifikation....87
6.3 Höhenpunkte und -differenzen....89
6.4 Berechnung der Etagenhöhen....90
6.5 Geometrische Transformationen 93
7 Symbolisierung und Visualisierung der 3D Modelle 97
7.1 Erstellung der 3D Symbole 97
7.2 Extrusion und Konvertierung mit qgis2threejs 99
7.3 Visualisierung mit Cinema 4D....100

8 Zusammenfassung 103

8.1 Beantwortung von Forschungsfrage I 104

8.2 Beantwortung von Forschungsfrage II 104

8.3 Beantwortung von Forschungsfrage III 107

8.4 Beantwortung von Forschungsfrage IV 107

8.5 Ausblick 108

9 Literatur 109

10 Online Ressourcen 115

11 Anhang 117

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Indoor Karte des 1. Untergeschosses des Wiener Hauptbahnhofs bei Google (links) und OpenLevelUp! (rechts) 3

Abb. 2: 3D Darstellung bei CHITTARO & VENKATARAMAN (2006) 4

Abb. 3: 3D Darstellung bei MÜNZER & STAHL (2008) 4

Abb. 4: 2D Darstellung bei MÜNZER & STAHL (2008) 4

Abb. 5: 2D Darstellung bei LI & GIUDICE (2013) 4

Abb. 6: 3D Darstellung bei LI & GIUDICE (2013) 4

Abb. 7: 2D Darstellung bei CHITTARO & VENKATARAMAN (2006) 4

Abb. 8: 3D Routenvisualisierung (LORENZ 2013) 5

Abb. 9: 2D Routenvisualisierung (LORENZ 2013) 5

Abb. 10: Zwei idente Karten mit, der Blickrichtung entgegengesetzter Ausrichtung (links) und entsprechender Ausrichtung (rechts). (LEVINE ET AL. 1984) 11

Abb. 11: Horizontal metrische skalierte Karte mit einem nicht-metrischen Maßstab in der vertikalen Dimension (JEFFERY ET AL. 2012) 17

Abb. 12: Mehrschichtiger Indoor Raum mit Transitionselementen (C1=Stiege, C2=Aufzug) (LI & GIUDICE 2012A) 17

Abb. 13: Graphische Variablen von BERTIN (1974) und MACEACHREN (1995) (SEMMO 2016) 21

Abb. 14: Die vier Darstellungsprinzipien nach ARNBERGER (1966) 22

Abb. 15: Blockbild (Imhof), Vogelschaukarten der Südalpen (Berann) und des Aletschgletscher (Hölzel) (HÄBERLING 2004) 22

Abb. 16: Erweiterte Prozesskette für die Erstellung von 3D Karten (abgeändertes Diagramm von TERRIBILINI 2001) 26

Abb. 17: Sechs Abstraktionsgrade für die Darstellung einer Kirche (ELIAS ET AL. 2005) 33

Abb. 18: Digitales Winkelmessgerät (EBAY) 39

Abb. 19: Zwei auf dem Luftbild erkennbare Abgänge am Karlsplatz, Wien (BASEMAP) 41

Abb. 20: Übersicht der Tastenkürzel für JOSM (OPENSTREETMAP WIKI D) 42

Abb. 21: Ungefilterte OSM Rohdaten, wie sie in JOSM erscheinen. Fünf unterirdische Etagen und die Oberfläche an der Kreuzung Friedrichstraße / Kärntner Straße 43

Abb. 22: 2D Ausschnitt der U-Bahn-Station Karlsplatz nach der 3D Modellierung 46

Abb. 23: Perspektivische Ansicht eines Modellausschnitts nach der Extrusion in ArcScene 48

Abb. 24: Der Wiener U-Bahn Würfel (WIEN.AT) 50

Abb. 25: 3D Symbole für punkt- und flächenhafte POIs in Cinema 4D 50

Abb. 26: Der Texturgradient und sein Einfluss auf die Tiefenwahrnehmung (HÄBERLING 2004) 53

Abb. 27: Beschriftete Objekte werden durch einen transparenten Schein in den Vordergrund gerückt (VAARANIEMI ET AL. 2013) 54

Abb. 28: Straßen leuchten durch die Objekte im Vordergrund durch (VAARANIEMI ET AL. 2013) 55

Abb. 29: Externe und interne Methoden der 2D (a und b) und 3D Beschriftung (c und d) (VAARANIEMI ET AL. 2013) 57

Abb. 30: Beleuchtungssituation in der U-Bahn-Station Karlsplatz (begehbare Flächen und Korridore) 60

Abb. 31: Beleuchtungssituation in der U-Bahn-Station Karlsplatz (Bahnsteige und Rolltreppen) 61

Abb. 32: Rendering eines Treppenaufgangs ohne Ambient Occlusion und mit harten Schatten (Renderzeit: 43 Sekunden) 62

Abb. 33: Rendering eines Treppenaufgangs mit Ambient Occlusion und Flächenschatten (Renderzeit: 8 Minuten und 43 Sekunden) 62

Abb. 34: Vereinfachtes OSM Datenschema (RAMM & TOPF 2009) 69

Abb. 35: Illustration der vier Ausprägungen des Indoor Tags (OPENSTREETMAP WIKI E) 71

Abb. 36: Manuell modellierte Wände mit Aussparungen an Bahnsteigkanten und Transitionselementen 72

Abb. 37: Multipolygon der Bahnsteigetage der U1 in JOSM 73

Abb. 38: Horizontale Ausdehnung der U-Bahn-Station Karlsplatz (Overpass Abfrage) 77

Abb. 39: Skizzenausschnitt der Opernpassage am nördlichen Stationsende 78

Abb. 40: Geostetes Skizzenblatt mit Elementen des ersten und zweiten Untergeschoßes 79

Abb. 41: Auswahl des Bearbeitungsgebiets in JOSM 80

Abb. 42: Rohdaten des gesamten Testgebiets in JOSM 81

Abb. 43: Links die Opernpassage ohne Filter, rechts mit dem Filter „level=-1“ 81

Abb. 44: Nördlicher Zugang zur Opernpassage mit hinterlegtem Orthophoto nach der Digitalisierung 83

Abb. 45: Der Relationeneditor von JOSM zur Erstellung von Mulitpolygonen 84

Abb. 46: Würfel und Kugel im Verhältnis 1:1,4 mit identem Koordinatenursprung.....98

Abb. 47: Interaktive Visualisierung der U-Bahnstation Karlsplatz mittels ThreeJS (WebGL) im Browser 99

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Kartographische Gestaltungsmittel und ihre graphischen Variablen (HAKE & GRÜNREICH 1994) 20

Tab. 2: Design Vorschläge für Landmarken (ELIAS ES AL. 2005) 33

Glossar

API	Application Programming Interface
COLLADA	Collaborative Design Activity
DGM	Digitales Geländemodell
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy
ESRI	Environmental Systems Research Institute, Inc.)
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GeoJSON	Geographic JavaScript Object Notation
GeoTIFF	Geographic Tagged Image File Format
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HTML	Hypertext Markup Language
JOSM	Java OpenStreetMap
KML	Keyhole Markup Language
MapCSS	Map Cascading Style Sheets
OGD	Open Government Data
OGR	OpenGIS Simple Features Reference Implementation
OSM	OpenStreetMap
POI	Point of Interest
SIT	Simple Indoor Tagging
SVG	Scalable Vector Graphics
TIN	Triangulated Irregular Network
URL	Uniform Resource Locator
VGI	Volunteered Geographic Information
WebGL	Web Graphics Library
WGS84	World Geodetic System 1984
WLAN	Wireless Local Area Network
WMS	Web Map Service

Kurzfassung

Satellitengestützte, mobile Navigationssysteme haben die Art und Weise, wie wir navigieren revolutioniert. Bisher betrifft das in erster Linie die Fahrzeugnavigation unter freiem Himmel. Zunehmend jedoch, greift diese Technologie auch auf Fußgänger über. Von dort ist es kein weiter Schritt mehr, dass diese auch innerhalb von Gebäuden genutzt wird. Tatsächlich schreitet die Forschung zur Entwicklung von Indoor Navigationssystemen mit großen Schritten voran. Ein Aspekt, der dabei zu kurz zu kommen droht, ist jener der Karten, die diese Systeme eines Tages stützen müssen. Während die traditionelle Kartographie auf Jahrhunderte der Entwicklung von Konventionen und Richtlinien zurückblickt, sind diese für Indoor Karten noch nicht vorhanden. Die sich fundamental unterscheidende Beschaffenheit des Indoor Raums, macht es jedoch notwendig, auch außerhalb dieser Konventionen zu denken. Der durch mehrere Etagen, vertikal segmentierte Raum, kann auf einer herkömmlichen Karte nicht in seiner Gesamtheit erfasst werden. Die Kognitionspsychologie kann dabei helfen, ein besseres Verständnis der menschlichen Strukturierung von Raum, insbesondere in der vertikalen Dimension, zu entwickeln. Dadurch sind Rückschlüsse auf die Frage möglich, ob nicht dreidimensionale, kartographische Darstellungen besser geeignet sind, um die Beschaffenheit des Indoor Raums abzubilden.

Um diese Frage auch empirisch beantworten zu können, ist es notwendig einen theoretisch fundierten Designvorschlag für 3D Indoor Karten zu entwickeln. Dieser Aufgabe widmet sich diese Arbeit. Dafür werden Designvariablen identifiziert, deren spezifische Ausprägung systematisch abgearbeitet werden. Gleichzeitig wird ein Workflow vorgestellt, der von der Datenerfassung und -digitalisierung, über die 3D Modellierung, bis zur kartographischen Symbolisierung und Visualisierung reicht und darauf abzielt, von Mitgliedern des OpenStreetMap Projekts replizierbar zu sein. Die OSM wird als Plattform identifiziert, die eine erstaunlich große und stetig wachsende Menge an Indoor Daten, in einem einheitlichen Schema und Raumbezug bietet und sich damit zu einer wichtigen Datenquelle für dieses noch junge Forschungsfeld entwickelt. Die 3D Modellierung der OSM Rohdaten wurde mithilfe eines eigens angefertigten Python Skripts voll automatisiert, wodurch sich für die kartographische Aufbereitung zahlreiche Möglichkeiten, vom Export in WebGL für den Browser, bis zur Weiterverarbeitung mit moderner 3D Software, eröffnen.

Abstract

Satellite-based, mobile navigation systems have revolutionized the way we navigate. Above all this has affected vehicle navigation in open spaces. Increasingly however, this technology also extends to the realm of pedestrian navigation. From there, it is only a small step to utilizing it in indoor environments. In fact, research on the development of indoor-navigation systems is rapidly advancing. One aspect, which is in danger of falling short in this discussion, concerns maps, which one day must support those systems. While traditional cartography can draw on centuries of developed conventions and guidelines, these are not yet developed for indoor maps. The fundamentally different nature of indoor space, however, makes it necessary to think outside of those conventions. The vertically segmented space of a multi-level building, for example, cannot be represented on a conventional map. Cognitive psychology can contribute to developing a better understanding of the human structuring of space, especially in its vertical dimension. It can help us explore whether three-dimensional, cartographic representations are better suited to depicting indoor space.

Answering this question empirically requires one to develop a theory-based design-proposal for 3D indoor maps. This is the purpose of this thesis. It will identify the design-variables and systematically work through their specifications. At the same time, it will present a workflow, which covers all steps in the process, from data acquisition and digitization over 3D modelling to cartographic symbolization and visualization. The whole process is designed to be replicable by members of the OpenStreetMap project. OSM is identified as a platform which offers an extensive and growing amount of indoor data in a consistent schema and spatial reference, and which is evolving to an important data source for this young field of research. The 3D modelling of the raw OSM-data was automatized by a python script which opens numerous possibilities of cartographic preparation, such as a WebGL export for the browser, or further processing with modern 3D software.

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Zusammenhang mit meiner beruflichen Tätigkeit bei der Firma MENTZ GmbH, wo ich in der Aufbereitung von OpenStreetMap Daten tätig bin. MENTZ engagiert sich stark in der Nutzbarmachung freier Geodaten für Routingzwecke und der Kartenerstellung für Informationssysteme des öffentlichen Verkehrs. Dort kam ich erstmals in Berührung mit dem Themenkomplex Indoor Routing auf Basis von OSM Daten. Mit der, in dieser Arbeit präsentierten Vorgehensweise habe ich zahlreiche Bahnhöfe in Österreich, der Schweiz und Deutschland vermessen und in der OSM kartiert. Mein Interesse an einer alternativen Visualisierung entspringt daher einem fundierten Verständnis über Potential und Limitierung solcherart erfasster Indoor Daten, die nur darauf warten intensiver genutzt zu werden.

Mein ausdrücklicher Dank gilt der Firma MENTZ, die mir die Möglichkeit gab, mich in dieses zukunftsträchtige, aber oft vernachlässigte Forschungsfeld zu vertiefen.

1 Einleitung

Einer 2008 von der AMERICAN PHYSICAL SOCIETY (2008) veröffentlichten Studie zufolge, verbringt der durchschnittliche US-Amerikaner etwa 90 Prozent seines Lebens innerhalb von Gebäuden. Arbeit, Wohnen, Einkauf oder Unterhaltung – all diese Tätigkeiten finden auch in Europa mehrheitlich hinter Türen statt. Mit der Verlagerung unserer Tätigkeiten in das Innere von Gebäuden, werden auch die Ansprüche an diese höher. Neben technischen Aspekten betrifft das auch die räumliche Dimensionierung von Bauwerken und deren funktionale Gliederung. Dabei wird der Mensch mit immer weitläufigeren und strukturell komplexeren „Indoor Landschaften" konfrontiert, in denen die Orientierung zunehmend zur Herausforderung wird.

Man denke an große Krankenhäuser oder Einkaufszentren, die sich oft über mehrere Etagen über- und unterhalb der Erde erstrecken. Hier kann das Auffinden eines einzelnen Raumes zu einer ähnlich komplexen Angelegenheit werden, wie das Aufspüren einer Adresse in einer unbekannten Kleinstadt. Besonders kritisch wird dieses Problem, wenn der nicht ortskundige Besucher unter Zeitdruck steht. Die meisten Leser und Leserinnen kennen solche Situationen wohl am Ehesten von großen Umsteigestationen des Öffentlichen Verkehrs oder von Flughäfen. Das schnelle Auffinden des richtigen Abfahrtsbereichs ist hier kritisch, um seine Anschlussverbindung nicht zu verpassen.

Während sich unter freiem Himmel zunehmend die Navigation mit Hilfe digitaler Karten und GNSS Technologie (Global Navigation Satellite System) auf mobilen Computern (Smartphones, Tablets, Boardcomputer) durchsetzt, greift man im Inneren von Gebäuden nach wie vor auf stationäre, analoge Umgebungspläne (You-Are-Here Maps) und Wegweiser, als die wichtigsten Stützen der Wegfindung, zurück. All dies machte „Indoor" in den letzten Jahren zu einem vielbeachteten Thema innerhalb der Geoinformations-Wissenschaften.

Mit ihm verbunden ist eine Reihe an neuartigen Herausforderungen. Die prominenteste betrifft zweifelsohne die Frage nach der Positionierung in geschlossenen Räumen. Da für eine akkurate Standortbestimmung mittels GNSS, der direkte (Sicht-)Kontakt zu mindestens vier Satelliten gegeben sein muss, wird das Signal, so es innerhalb von Gebäuden überhaupt empfangen werden kann, zu stark abgelenkt, um für eine genaue Positionsauswertung brauchbar zu sein. Es gibt einige Technologien, die hier als Alternative herangezogen werden können. So wurden Verfahren entwickelt, welche eine ausreichend genaue Positionierung mit Hilfe von WLAN (Wireless Local Area Network), Bluetooth oder den Inertialsensoren eines Smartphones erlauben. Bisher konnte sich auf diesem Feld jedoch noch keine Technologie klar durchsetzen.

Ein weiteres Problem betrifft die geometrische Grundlage, auf der die herkömmliche Fahrzeugnavigation beruht. Während die Bewegung eines Fahrzeugs einen stark linearen

Charakter aufweist und auf das vorhandene Wegenetz beschränkt ist, besitzt der Fußgänger einen höheren Freiheitsgrad an Bewegung. Oft ist er mit großen, frei begehbaren Flächen konfrontiert, über die er den kürzesten Weg zu einem bestimmten Ziel finden muss. Er kann abrupt umdrehen oder die Richtung wechseln. Der ausschließlich lineare Charakter eines Routinggraphen müsste für die großmaßstäbige Indoor Navigation um die Möglichkeit eines „Flächenroutings“ erweitert werden, um die volle Bewegungsfreiheit eines Fußgängers abzubilden. Auch hier gibt es Lösungsansätze, jedoch ist dem Autor keine etablierte Konvention, geschweige denn marktreife Implementierung bekannt.

1.1 Motivation

Weniger Berücksichtigung in der Fachliteratur bekommt zurzeit die Frage nach der Visualisierung der errechneten Routen und ihrer (Indoor)Umgebung. Indoor Landschaften sind durch eine Reihe an Besonderheiten charakterisiert. Zum einen wäre da der meist sehr große Maßstab, der die Frage nach dem Ausmaß der Generalisierung und Detailtreue in der kartographischen Abbildung aufwirft. Desweitern stellt sich die grundsätzliche Frage, welche Objekte und Formen, welche Orientierungsfunktionen übernehmen und deshalb hervorgehoben, oder überhaupt erst in die Karte aufgenommen werden sollten. Der augenscheinlichste Unterschied zu herkömmlichen Karten besteht jedoch darin, dass Gebäude durch mehrere Stockwerke viel stärker vertikal segmentiert sind, als natürliche Landschaften. Die Routenvisualisierung, wie sie in herkömmlichen Navigationskarten gehandhabt wird, trägt dieser Besonderheit nur unzureichend Rechnung. Da unter- und übereinanderliegende Objekte durch die gängige allozentrische 2D-Sicht nicht erfasst werden können, geht ein wesentlicher Teil der Informationen über die unmittelbare Umgebung verloren. Durch das fehlende Wissen über die relative Position einzelner Objekte über Etagen hinweg, mag es schwerer fallen, ein räumliches Verständnis (eine kognitive Karte) für eine solche Indoor Landschaft zu entwickeln.

Es gibt im Wesentlichen zwei Strategien, um diesem Problem zu entgegnen. Zum einen, durch die Möglichkeit des Ein- und Ausblendens von verschiedenen Ebenen, die jeweils ein Stockwerk eines Gebäudes repräsentieren. Google, aber auch Bing und Spezialkarten wie OpenStationMap und OpenLevelUp! (Abb. 1) nutzen diese Technik, um ihre Karten, um die Innenräume von Gebäuden zu erweitern. Während so die nahtlose Zusammenführung von Indoor Karten in bestehendes Kartenwerk gelingt, ist es weiterhin nicht möglich, die räumliche Beziehung von Objekten unterschiedlicher Ebenen mit einem Blick zu erfassen. Gerade in Navigationsanwendungen könnte die ganzheitliche Visualisierung einer Route über Stockwerke hinweg kritisch sein, um ein räumliches Verständnis aufzubauen und die Wegfindung zu erleichtern.

Abhilfe können dreidimensionale Darstellungen schaffen. Durch sie ist es möglich vertikal segmentierte Gebäude in ihrer Gesamtheit wahrzunehmen und die einzelnen

Objekte in eine räumliche Relation zueinander zu setzten. Außerdem wird es möglich Anfangs-, Endpunkt und Verlauf einer Route mit einem Blick zu erfassen. Aufbauend auf Erkenntnissen von SIEGEL & WHITE (1975) sowie THORNDYKE & HAYES-ROTH (1982) zur Typisierung räumlichen Wissens, untersuchten zahlreiche Studien (CHITTARO & VENKATARAMAN 2006; FONTAINE 2001; HUANG ET AL. 2012; LI & GIUDICE 2013; MÜNZER & STAHL 2008; MÜNZER & STAHL 2011; OULASVIRTA ET AL. 2009, RADOCZKY 2004) die Effektivität von zwei- und dreidimensionalen Karten bei Wegfindungsaufgaben in mehrstöckigen Gebäuden. Die Ergebnisse dieser Studien sind widersprüchlich. Mal kommen sie zu dem Schluss, dass dreidimensionale Abbildungen den herkömmlichen, zweidimensionalen Plänen klar überlegen sind (FONTAINE 2001; MÜNZER & STAHL 2008; RADOCZKY 2004), mal sehen sie keinen der beiden Ansätze im Vorteil (HUANG ET AL. 2012; MÜNZER & STAHL 2011), oder aber den zweidimensionalen Abbildungen werden Vorzüge eingeräumt (CHITTARO & VENKATARAMAN 2006; LI & GIUDICE 2013; OULASVIRTA ET AL. 2009).

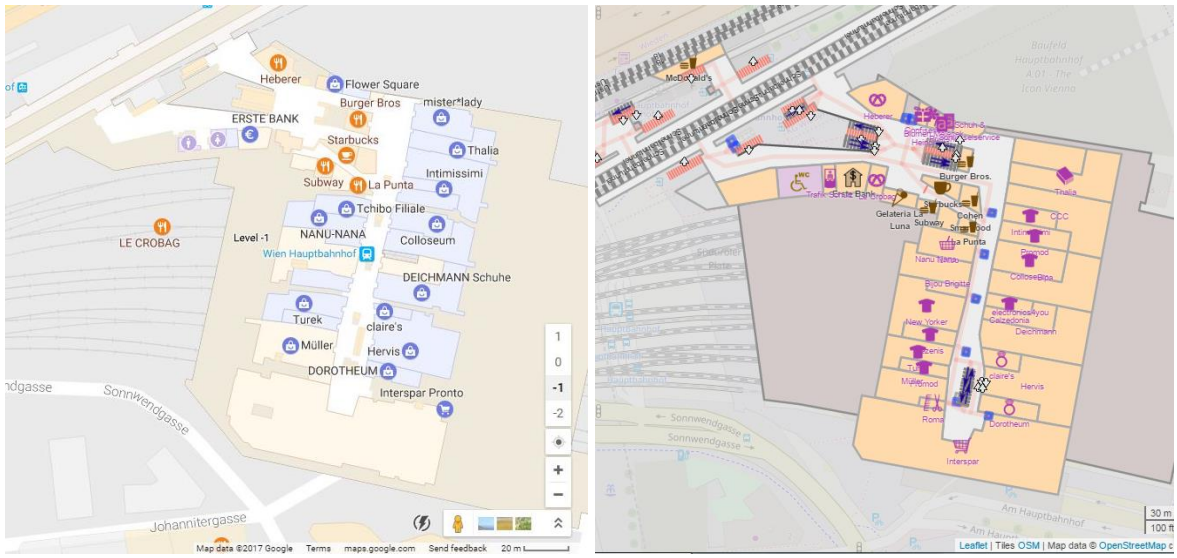


Abb. 1: Indoor Karte des 1. Untergeschosses des Wiener Hauptbahnhofs bei Google (links) und OpenLevelUp! (rechts)

Der Großteil dieser Studien versucht kognitionswissenschaftliche Annahmen zur Aneignung räumlichen Wissens anhand von bestehenden „(pseudo-) kartographischen Material“ (LORENZ ET AL. 2013) wie Raum- oder Bauplänen an Probanden zu überprüfen. Hinzu kommen eigens für die Studie angefertigte dreidimensionale Abbildungen oder Animationen von unterschiedlicher Qualität (Abb. 2-7). Ziel ist es wichtige kognitionswissenschaftliche Kategorien, wie Perspektive für die Studien zu simulieren. Einheitliches Design oder kartographische Grundsätze werden in den allermeisten Fällen nicht berücksichtigt. KUEH (2007) weist auf das Fehlen einer adäquaten Zusammenführung von Erkenntnissen der Kognitionswissenschaften und der Kartographie hin. Dies führt dazu, dass es oftmals unklar ist, ob die Vorteile einer der beiden getesteten Abbildungen von der Wahl der Perspektive und Berücksichtigung der dritten Dimension abhängig sind, oder ob sie auf besseres bzw. schlechteres Kartendesign zurückzuführen sind. Dies könnte ein wesentlicher Grund für die widersprüchlichen Ergebnisse der Studien sein.

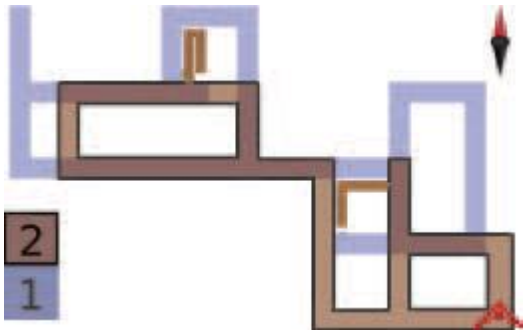


Abb. 5: 2D Darstellung bei LI & GIUDICE (2013)

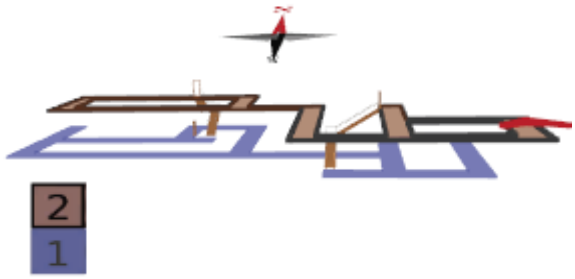


Abb. 6: 3D Darstellung bei LI & GIUDICE (2013)

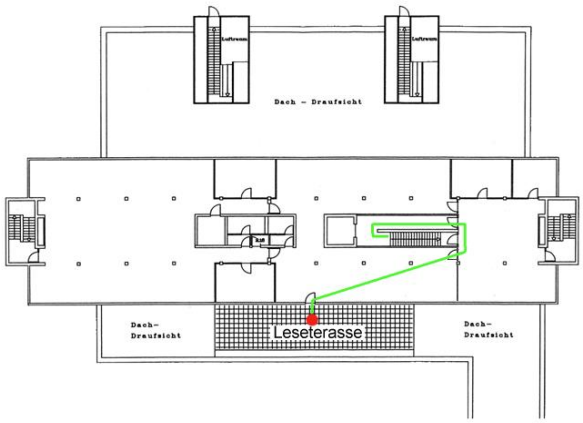


Abb. 4: 2D Darstellung bei MÜNZER & STAHL (2008)

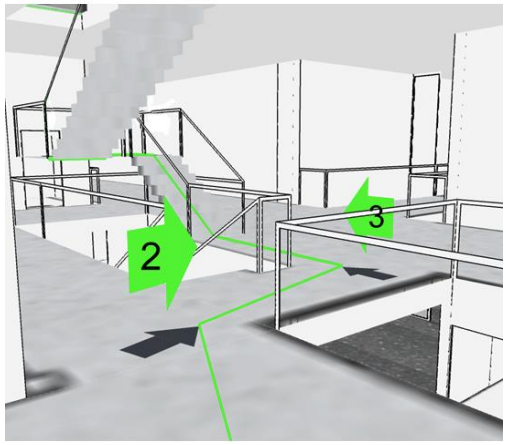


Abb. 3: 3D Darstellung bei MÜNZER & STAHL (2008)

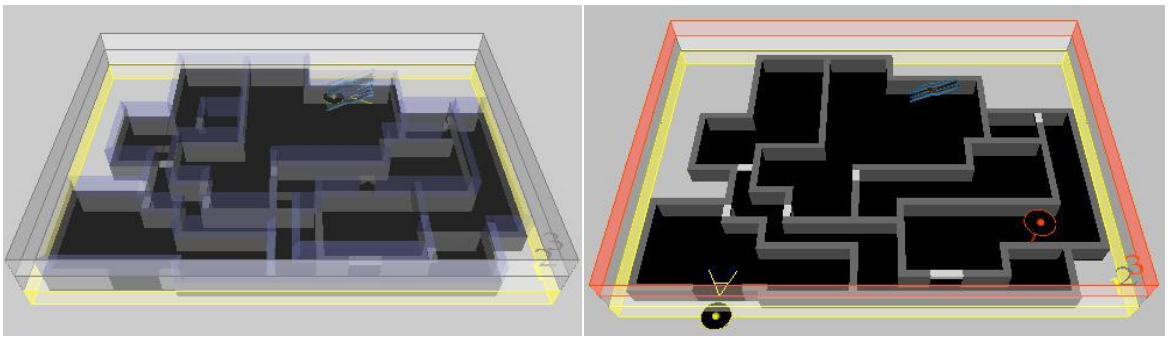


Abb. 2: 3D Darstellung bei CHITTARO & VENKATARAMAN (2006)

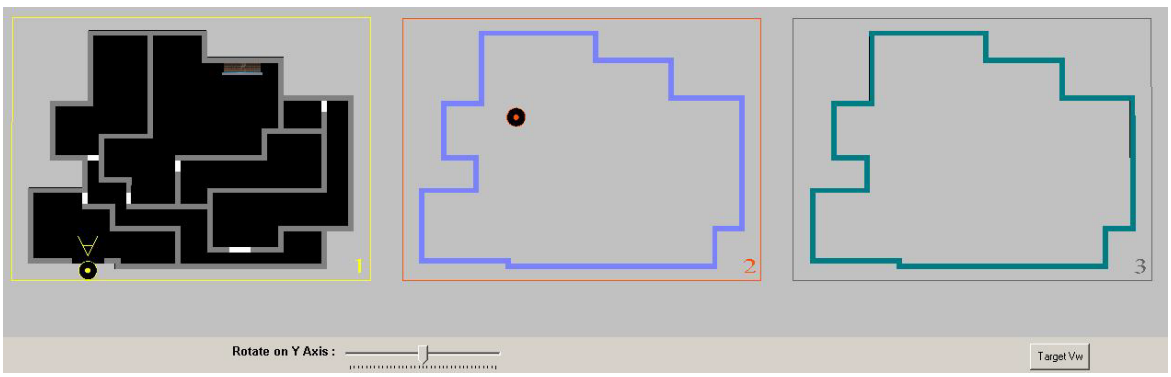


Abb. 7: 2D Darstellung bei CHITTARO & VENKATARAMAN (2006)

LORENZ, THIERBACH, BAUR & KOLBE (2013) erkannten dieses Defizit und legten eine eigene Studie vor, in der sie jeweils die 2D- und 3D Visualisierung einer Indoor Route (Abb. 8 und 9) in einem einheitlichen Design erstellten. Lorenz, die für das Karten Design verantwortlich war, berücksichtigte dabei die Selektion relevanter architektonischer Merkmale, geometrische Vereinfachung, die Überzeichnung wichtiger Details sowie die Zusammenfassung von Gebäudeteilen gemäß ihrer Funktion (LORENZ ET AL. 2013). Probanden wurden in zwei gleiche Gruppen geteilt, von denen eine mit einer 2D und die andere mit einer 3D Karte ausgestattet waren und der abgebildeten Route durch das Gebäude folgen sollten. Die Probanden, die der dreidimensionalen Routenabbildung folgten, konnten ihr Ziel wesentlich schneller finden und machten weniger Fehler. Während diese Studie mit dem einheitlichen, kartographischen Design eine Schwachstelle der vorangegangenen Studien entschärfte und so wichtige Erkenntnisse lieferte, verwies sie doch auf ein weiteres Problem, mit dem die Forschung zum kartographischen Design von Indoor Landschaften konfrontiert ist: Den Mangel an Daten und einer einheitlichen Datenquelle.

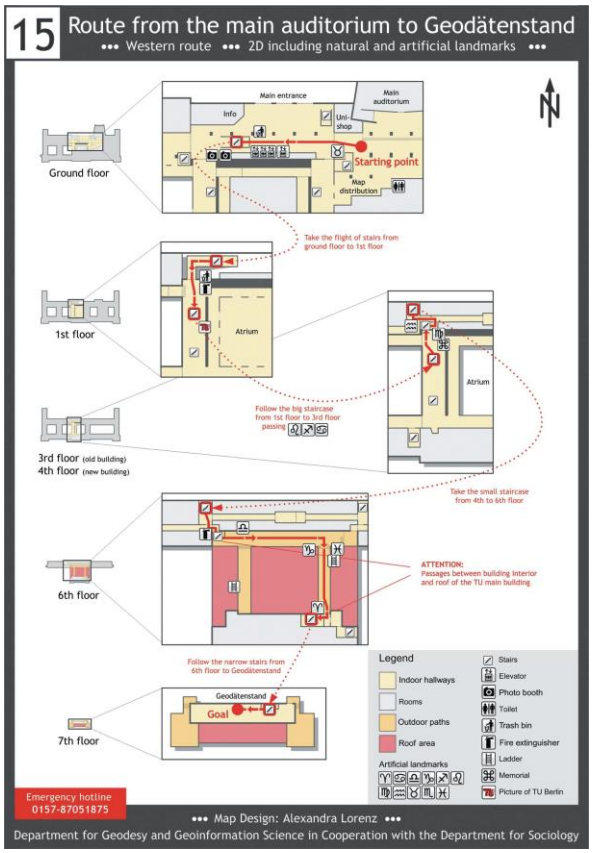


Abb. 9: 2D Routenvisualisierung (LORENZ 2013)

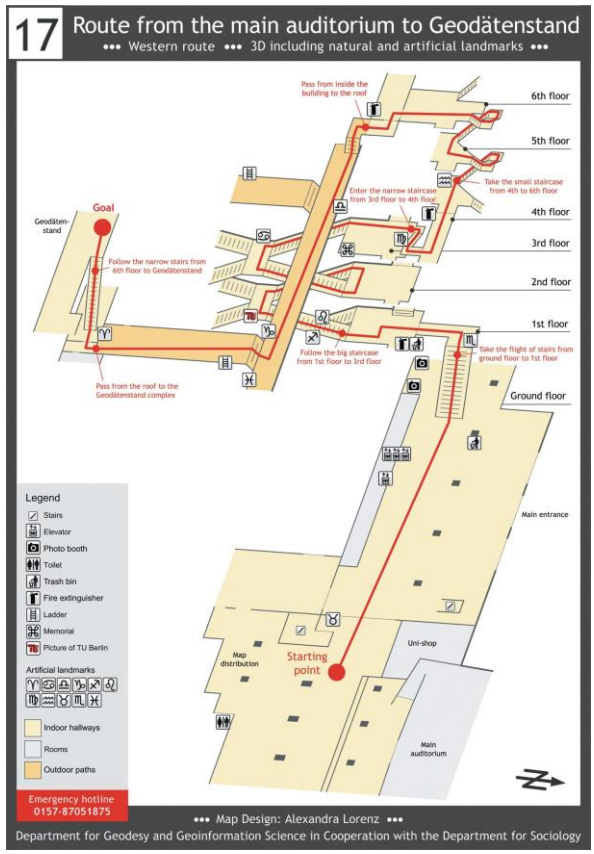


Abb. 8: 3D Routenvisualisierung (LORENZ 2013)

Die Visualisierung von Lorenz beschränkt sich auf die Darstellung einer einzelnen Route, ohne das restliche Gebäude abzubilden. Es handelt sich um Teilkarten (2D) und Insel-Darstellungen (3D), die speziell für den Studienzweck entworfen wurden, sich aber kaum in ein umfassenderes Navigationssystem integrieren lassen. Auch wenn das nicht

Zweck der Studie war, wäre es sinnvoll, von Beginn an auf potentielle Datenformate und –quellen zurückzugreifen, die die Integration in ein übergeordnetes System erlauben und ein einheitliches Schema aufweisen. Ein solches System könnte die OpenStreetMap (OSM) sein. Sie stellt eine der größten Quellen von Volunteered Geographic Information (VGI) dar und umfasst bereits Informationen über das Innere einiger Gebäude. Das Erfassen von Indoor Daten sowie deren Einpflegung in ein Geoinformationssystem (GIS) setzten entweder das Vorhandenseins eines Raum- oder Bauplanes, oder die direkte Datenerhebung vor Ort voraus. Anders als beim Kartieren unter freiem Himmel, kann hier nicht auf Luft- oder Satellitenbilder zurückgegriffen werden. Das macht es für kommerzielle Geodatenanbieter schwierig eigene Daten anzubieten, da eine immense Zahl an Arbeitskräften für die Erfassung vor Ort benötigt werden würde. GOETZ & ZIPF (2011) sehen hier den wesentlichen Vorteil von VGI, das auf „7 Milliarden potentielle, menschliche Sensoren“ (GOODCHILD 2007), zurückgreifen kann.

1.2 Zielsetzung und Fragestellung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Ablauf zu entwickeln, der von der Datenerfassung vor Ort über die Digitalisierung mit einem OSM Editor und dem automatisierten Export von 3D Modellen bis zur kartographischen Symbolisierung und Visualisierung der so gewonnenen Daten, reicht. Um dem Gedanken von VGI Rechnung zu tragen, soll der Workflow so gestaltet sein, dass er von Freiwilligen ohne spezielle Ausbildung oder vermessungstechnischen Gerät replizierbar ist. Die Datenerfassung wird im Wiener U-Bahn-Netz durchgeführt, wobei die Station Karlsplatz als größter Verkehrsknoten Wiens, als exemplarisches Testgebiet angeführt wird. Als Plattform wird die OSM dienen, in der Annahme, dass diese auch in Zukunft eine reiche Quelle an Indoor Daten darstellen wird.

In Anlehnung an kognitionswissenschaftliche Theorien zum räumlichen Lernen und kartographischer Praxis, werden Design Vorschläge entwickelt, die speziell dem Zweck der Wegfindung innerhalb von Gebäuden und der Aneignung räumlichen Wissens dienen sollen. Neben der Erarbeitung eines, von OSM Mitgliedern replizierbaren Arbeitsablaufs und der weitest gehenden Automatisierung der 3D Modellierung, liegt speziell die kartographische Aufbereitung im Forschungsinteresse dieser Arbeit. In Anbetracht der rasanten Entwicklung und intensiven Forschung in den anderen Problemfeldern der Indoor Navigation, ist davon auszugehen, dass marktreife Systeme in wenigen Jahren zur Verfügung stehen werden. Die Entwicklung kartographischer Standards für Indoor Karten ist damit höchst relevant, um nicht irgendwann vor fertigen Systemen zu stehen, ohne sie mit adäquaten Karten versorgen zu können.

Aus dieser Zielsetzung ergeben sich vier Forschungsfragen:

I. *Wie strukturiert der menschliche Verstand den Raum – im Allgemeinen und eine mehrgeschossige Indoor Umgebung im Speziellen –, um sich darin orientieren und gezielt bewegen zu können?*
II. *Welche Konsequenzen ergeben sich daraus, in Bezug auf das kartographische Design einer dreidimensionalen Indoor Karte?*
III. *Wie kann ein einfacher, kostengünstiger Arbeitsablauf aussehen, der es OSM Aktiven ermöglicht, Indoor Daten im Rahmen von VGI zu erfassen, zu digitalisieren und in eine offene Datenbank einzupflegen?*
IV. *Wie können aus diesen Daten automatisiert dreidimensionale Geometrien mit realistischen Höhenwerten berechnet werden, die sich zur Weiterverarbeitung als 3D Modell eignen?*

1.3 Aufbau und Struktur

Zur Beantwortung der Forschungsfrage I. wird zunächst eine detaillierte Literaturanalyse durchgeführt. Wie bereits weiter oben erwähnt gibt es einen recht breiten Fundus an Studien und Experimenten, die sich auf die theoretischen Überlegungen von Kognitionspsychologen wie Alexander Siegel oder Perry Thorndyke und Barbara Hayes-Roth stützen. Die Adaption dieser Theorien für eine vertikal gegliederte Indoor Umgebung, ist nicht endgültig geklärt, da Studien widersprüchliche Ergebnisse lieferten (siehe Seite 3). Allerdings gibt es stichhaltige Argumente, die den hypothetischen Ausgang dieser Diskussion vorzeichnen. Die Erörterung derselben wird den ersten Teil der Arbeit bilden.

Kapitel 3 beschäftigt sich damit, wie die Kartographie graphische Mittel einsetzt, um dem Menschen räumliche Zusammenhänge zu vermitteln und zu seiner Orientierung beizutragen. Hierbei sind insbesondere die Überlegungen von Jacque Bertin und seine Entwicklung einer graphischen Semiologie von Interesse. Nach einer Erörterung derselben wird versucht, sie auf die modernen Techniken der 3D Kartographie umzulegen. Wichtige Arbeiten in diesem Bereich stammen von den zwei Kartographen Andrea Terribilini und Christian Häberling der ETH Zürich. Sie waren die Ersten, die versuchten, die graphischen Variablen von Bertin für die digitale und insbesondere die dreidimensionale Kartographie zu adaptieren. Im Zuge dessen entwickelten sie sogenannte Gestaltungsvariablen für 3D Karten, die für diese Arbeit übernommen und um die Aspekte Datenerfassung und -digitalisierung erweitert werden. Sie bilden in weiterer Folge das Grundgerüst für die theoriegestützte Entwicklung von Gestaltungsvorschlägen für 3D Indoor Karten, die in Kapitel 4 vorgenommen wird und zur Beantwortung von Forschungsfrage II. dient. Dabei stellt die Aneignung von räumlichen Wissen und die Wegfindung das zentrale Gestaltungsmotiv dar. Außerdem stammt von Terribilini eine Prozesskette zur Erstellung von 3D Karten, an der sich der praktische Teil dieser Arbeit, ab Kapitel 5 orientieren soll.

Der praktische Teil der Arbeit beginnt mit einer Erläuterung des Begriffs VGI und einer Einführung in die OSM. Es werden erste Bemühungen zur Erweiterung von OSM durch Indoor Daten und die Entwicklung eines entsprechenden Datenschemas vorgestellt, die vor allem von Alexander Zipf und Marcus Goetz der Universität Heidelberg vorangetrieben wurden. Gestützt auf deren Arbeiten, wird ein erweitertes Datenschema entwickelt, auf dessen Grundlage die Datenerfassung, -digitalisierung sowie die automatische 3D Modellierung erfolgen soll. Zur Beantwortung der Forschungsfrage III. werden die technischen Schritte zur Erfassung der Primärdate und der Digitalisierung mit dem OSM Editor JOSM erläutert. Berücksichtigt wird dabei, dass weder anspruchsvolle und teure Instrumente, noch besonderes Know-How nötig sein sollen, um diese Schritte auszuführen.

Zur Beantwortung der letzten Forschungsfrage schließlich, wird ein Python Skript vorgestellt, welches aus den zuvor erhobenen und digitalisierten OSM Rohdaten und eines Digitalen Geländemodells (DGM) ein fertiges 3D Modell des jeweiligen Gebäudes berechnet. Die wichtigsten Module dieses Skripts sollen in Kapitel 6 beschrieben werden. Es wird versucht die grundlegenden Funktionsprinzipien in einer möglichst verständlichen Form darzustellen. Nach dem Durchlauf des Skripts, müssen die Modelle lediglich noch kartographisch aufbereitet werden, um als Indoor Karten verwendet werden zu können. Dieser letzte Prozessschritt wird in Kapitel 7 knapp dargestellt, wobei hier nur einige Möglichkeiten aufgezeigt, nicht jedoch ein „Best-Practice“-Ablauf mit einer tiefergehenden Analyse durchgeführt werden soll. Den letzten Teil der Arbeit bildet eine Zusammenfassung und Evaluation der Ergebnisse sowie Überlegungen zu weiterführender Forschung und Einsatzmöglichkeiten.

2 Theoretische Grundlagen

Mit einem illustrativen Beispiel veranschaulichte Francis Lord bereits 1941, wie der Mensch räumliches Wissen speichert und verarbeitet, um in weiterer Folge Richtungsangaben zu machen: Man fordere eine Person auf, in die Richtung der Freiheitsstatue zu zeigen und danach in die Richtung des nächstgelegenen Flughafens. Für die erste Aufgabe wird sich die Person eine Karte vorstellen, sich selbst darauf positionieren und über die Einschätzung der eigenen Orientierung, die Richtung der Freiheitsstatue berechnen. Für die zweite Aufgabe, nutzt die Person vorhandenes Wissen über die Route vom derzeitigen Standort zum Flughafen, um sie im Geiste nachzufahren und eine Richtungsangabe zu machen. (LORD 1941)

2.1 Typen kognitiver Repräsentation von Raum

Daraus lassen sich drei Annahmen über das räumliche Verständnis des Menschen ableiten. Erstens, besitzt der Mensch je nach Quelle (z.B. Karten, verbale Wegbeschreibungen oder eigene Navigationserfahrung) eine andere Art von kognitiver Repräsentation des Raumes (auch kognitive Karte oder engl. „cognitive map“). Zweitens nutzt der Mensch verschiedene Strategien, um ein räumliches Urteil zu fällen, abhängig von der Art seines räumlichen Verständnisses. Und drittens hängt die Genauigkeit dieses Urteils sowohl von der Richtigkeit der zugrundeliegenden Repräsentation als auch der angewandten Strategie ab. (THORNDYKE & HAYES-ROTH 1982)

Die Bezeichnungen für die zwei Arten kognitiver Repräsentation wurden von ALEXANDER SIEGEL & SHELDON WHITE (1975) geprägt und haben sich seither als wissenschaftliche Begriffe in der relevanten Forschung etabliert. So bezeichnen sie die Repräsentation, die auf Grundlage des Studiums einer Karte oder eines Plans erworben wurde als *konfigurales Wissen* (engl. „survey knowledge“ (SIEGEL & WHITE 1975) oder „configural knowledge“ (GÄRLING ET AL. 1986)). Repräsentationen, die durch Erfahrung aus der Navigation und Begehung eines Gebietes erworben wurden, werden als *prozessuales Wissen* (engl. „procedural knowledge“ oder „route knowledge“) bezeichnet. (SIEGEL & WHITE 1975)

1983 führte Sarah Golding zusammen mit Thorndyke einen weiteren Typ räumlichen Wissens ein. Es handelt sich um jenes Wissen, das dazu dient einen Ort wiederzuerkennen und wird als *Landmarken Wissen* (engl. „landmark knowledge“) bezeichnet. Es nimmt die Form von Abbildern, der in der Natur beobachteten Objekte an und wird durch direkte Beobachtung vor Ort oder durch Beobachtung indirekter Repräsentationen wie Photographien oder Filmen erworben. Dabei handelt es sich in der Regel um besonders auffällige und einzigartige Objekte. (GOLDIN & THORNDYKE 1983)

Konfigurales Wissen zeichnet sich dadurch aus, dass die individuelle Perspektive auf die kognitive Repräsentation des Raums, der allozentrischen Perspektive entspricht, die man einnimmt, wenn man eine Karte betrachtet. Diese Perspektive erlaubt es, die Objekte der

Umwelt in Relation zueinander bzw. zu einem globalen oder regionalen Referenzsystem zu setzen. Damit kann auf Himmelsrichtungen Bezug genommen werden und euklidische (geradlinige) Distanzen eingeschätzt werden. Prozessuales Wissen hingegen, wird während der Navigation zwischen zwei Orten als sequentielle Abfolge von Handlungen und beobachteten Objekten erworben. Eine typische Handlung in einer solchen Sequenz wäre die Richtungsänderung an einem bestimmten Ort. Die Perspektive auf diese kognitive Repräsentation einer Route, entspricht der egozentristisch, horizontalen Perspektive, die man einnimmt, wenn man sich zu Fuß in der Umgebung bewegt. Das prozessuale Wissen umfasst folglich einen Eindruck über Distanzen der einzelnen Teilstücke einer Route, die Winkel zwischen ihnen sowie Wissen über Details an verschiedenen Stellen des Weges. Es eignet sich aber schlecht, um euklidische Distanzen einschätzen zu können. (THORNDYKE & HAYES-ROTH 1982)

Während mit konfiguralen Wissen die räumliche Konfiguration einzelner Objekte, aufgrund ihrer relativen Position zu einem übergeordneten Referenzsystem relativ gut und ohne großen Aufwand abgeschätzt werden kann, ist für dieselbe Einschätzung auf Grundlage prozessualen Wissens sehr viel mehr Rechenaufwand notwendig. Das Wissen über die zurückgelegte Route, ist die einzige Referenz, auf die bei der Lokalisierung einzelner Objekte Bezug genommen werden kann. Die räumliche Beziehung zweier Orte besteht also einzig und allein in der Route, die sie miteinander verbindet. Das Einschätzen euklidischer Distanzen (Luftlinie) wird dadurch zu einer trigonometrischen Rechenaufgabe und fällt wesentlich ungenauer aus, als bei Personen, die zuvor eine Karte studierten. Thorndyke und Hayes-Roth gehen allerdings davon aus, dass Individuen eine solche Berechnung nicht tatsächlich durchführen, sondern auf informelle Äquivalente, als Annäherung an dieselbe zurückgreifen. Umgekehrt müssen Personen, die auf konfigurales Wissen zurückgreifen, zusätzlichen Rechenaufwand leisten, um die Länge einer, nicht geradlinig verlaufenden Route einschätzen zu können, während jene, die über prozessuales Wissen verfügen diese direkt ableiten können. (THORNDYKE & HAYES-ROTH 1982)

2.2 Rolle der Perspektive

Um auf das Beispiel vom Anfang des Kapitels zurückzukommen, mag es nicht sonderlich überraschen, dass Personen mit prozessualem Wissen, die Richtung des gesuchten Ortes (Flughafen) besser einschätzen, als solche, die die Position des Ortes auf einer Karte kennen, die Route dorthin aber nicht. Dies kann vor allem mit dem Wechsel der Perspektive, den letztere Personen vollziehen müssen, erklärt werden. Demnach müssen sie sich, nachdem sie die kognitive Repräsentation der studierten Karte abgerufen haben, erstens selbst darauf lokalisieren. Zweitens *müssen sie ihre kognitive Karte durch Rotation gemäß der aktuellen Blickrichtung ausrichten*, drittens den gesuchten Ort lokalisieren, viertens den Winkel ausgehend von der eigenen Blickrichtung zum gesuchten Ort bestimmen und fünftens *die, aus einer vertikalen Perspektive bestimmte Position des gesuchten Ortes in eine Richtungsangabe aus horizontaler Perspektive übersetzen.* THORNDYKE & HAYES-ROTH (1982) gehen davon aus, dass gerade der zweite und der letzte Schritt, der von Personen, die über Navigationserfahrung verfügen nicht ausgeführt

werden muss, eine große kognitive Herausforderung darstellt und zu Fehlern führt. Die Perspektive, aus welcher man den Raum wahrnimmt, stellt also eine kritische Größe für das Verständnis und das Erlernen räumlicher Beziehungen sowie von Routen und daraus abgeleiteten Navigationsentscheidungen dar.

Auch MARVIN LEVINE ET AL. (1984) machten darauf aufmerksam, wie essentiell die Perspektive für das Lernen von Routen, räumlichen Zusammenhängen und die Wegfindung ist. Sie stellten Probanden zwei You-Are-Here Karten gegenüber, die in Bezug auf ihre Umgebung unterschiedliche Orientierungen aufwiesen. Sie fanden heraus, dass sich die Probanden bei einer einfachen Wegfindungsaufgabe signifikant schwerer taten diese zu lösen, wenn die Ausrichtung der Karte nicht mit ihrer eigenen Blickrichtung übereinstimmte (Abb. 10). Der zusätzliche kognitive Schritt der Kartenrotation um 180 Grad, den die linke Person in Abbildung 10 vollziehen muss, verdoppelte die Anzahl der Fehler, die diese Probanden machten. (LEVINE ET AL. 1984) WARREN & SCOTT (1993) nannten dieses Phänomen Ausrichtungseffekt (engl. „alignment effect“). Prozessuales Wissen ist weit weniger vom Ausrichtungseffekt betroffen. Es kann relativ unabhängig von der Perspektive abgerufen werden und ist daher relativ flexibel einsetzbar. (PRESSON & HAZELRIG 1984)

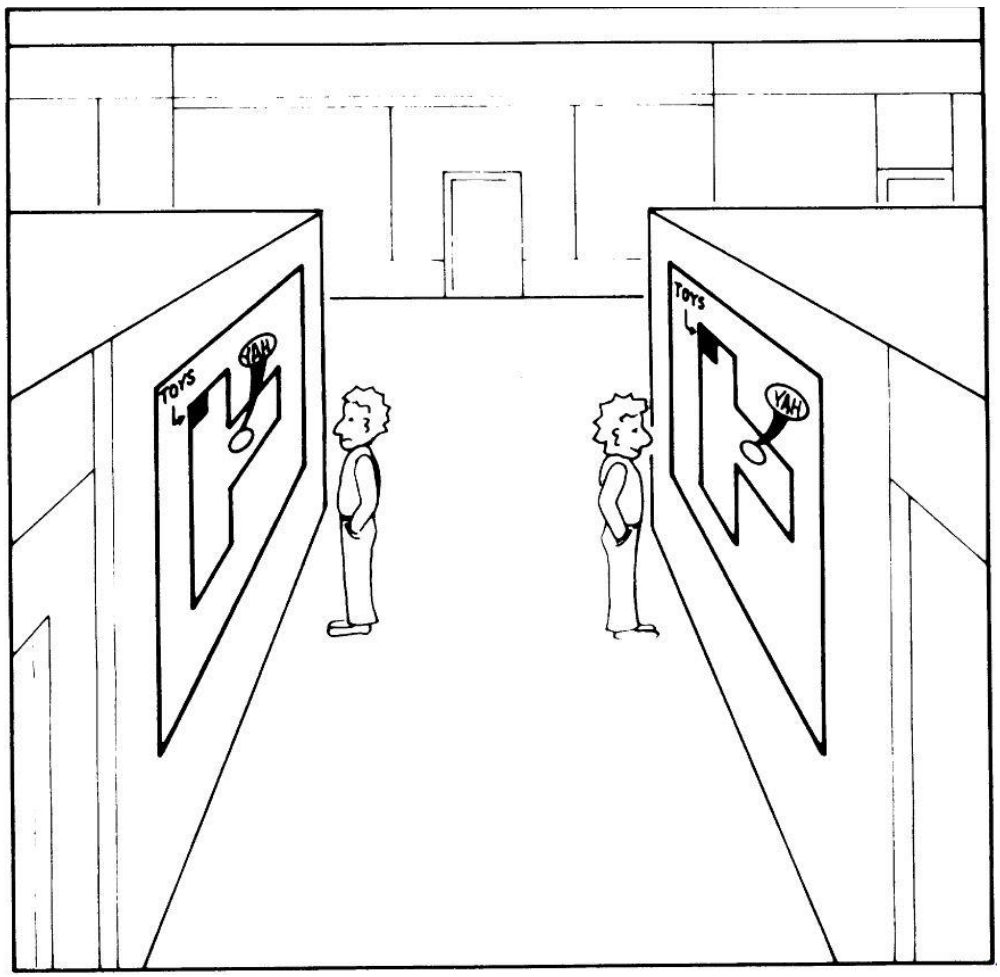


Abb. 10: Zwei idente Karten mit, der Blickrichtung entgegengesetzter Ausrichtung (links) und entsprechender Ausrichtung (rechts). (LEVINE ET AL. 1984)

DARKEN & SIBERT (1996) empfehlen deshalb drei grundsätzliche Prinzipien im Design von kartenbasierten Navigationsanweisungen zu berücksichtigen:

- Das *Zwei-Punkte Prinzip*, welches besagt, dass der Kartenleser mindestens zwei Punkte seiner unmittelbaren Umgebung, auf dieselben beiden Punkte in der Karte beziehen können muss.
- Das *Ausrichtungsprinzip* besagt, dass die Karte am Gelände ausgerichtet sein muss. Das vordere Ende einer horizontalen Karte, muss der Vorwärtsrichtung des Kartenlesers entsprechen. Eine Linie zwischen zwei Punkten auf der Karte, muss parallel zur selben Linie in der Realität sein.
- Das *Vorwärts-oben Prinzip* besagt, dass der nach oben zeigende Teil einer Karte (unter der Annahme, dass diese senkrecht zum Boden steht) immer das zeigen muss, was der Betrachter vor sich hat.

Diese Prinzipien spiegeln die Notwendigkeit der Übereinstimmung der Karte mit ihrer Umgebung wider. Durch eine Reduktion der notwendigen Perspektivwechsel wird es dem Beobachter ermöglicht, seine Position und Orientierung auf der Karte und in weiterer Folge in seiner Umgebung schnell zu erkennen. (DARKEN & SIBERT 1996) Ein wenig aufgeweicht werden diese Prinzipien im Falle von digitalen Karten. Hier ist es möglich die Perspektive der Karte interaktiv oder automatisch an der Bewegungsrichtung des Nutzers auszurichten und sogar dessen aktuelle Position darin zu zeigen. Außerdem ist es möglich von einer allozentrischen zu einer egozentristischen Perspektive zu wechseln.

2.3 Bedeutung von Landmarken

Analog zu den drei Typen räumlichen Wissens zeigt CAROL LAWTON (1996) die zwei Strategien auf, die angewandt werden, wenn eine Person navigiert. Falls die Person über konfigurales Wissen verfügt, tendiert sie dazu auf globale Referenzpunkte wie den Sonnenstand, einen Berg in der Ferne, ein großes, weithin sichtbares Gebäude oder der Kompass Richtung zurückzugreifen, um seine Orientierung aufrecht zu erhalten. Hier fungieren Landmarken als Referenzpunkte, die den Raum organisieren. Eine Person mit prozessualem Wissen orientiert sich an lokalen Landmarken und anderen Details entlang einer Route, um einstudierte Navigationsschritte zu setzen. Während die beiden Strategien ähnlich effektiv in spezifischen Wegfindungssituationen sind, haben Personen mit konfiguralem Wissen einen Vorteil, sollten sie von der geplanten Route abkommen. In solchen Situationen können sie auf eine global (oder zumindest überregional) verankerte Reihe an Referenzpunkten zurückgreifen, um ihre Position neu zu bestimmen. Personen, die auf lokale Landmarken und Hinweise angewiesen sind, verlieren eher die Orientierung, wenn diese Hinweise nicht vorhanden sind. (LAWTON 1996)

Landmarken, wie sie im prozessualen Wissen verankert sind, sind als physikalische Objekte zu verstehen, die entlang einer Route gefunden werden können und einen punkthaften Charakter aufweisen. Auch wenn sie streng gesprochen eine flächenhafte Ausdehnung besitzen, kann diese auf einen Punkt aggregiert werden. Dabei haben

Landmarken drei wesentliche Funktionen. Erstens dienen sie als Markierung für Orte, an denen eine bestimmte Handlung gesetzt werden muss. Im Falle der Wegfindung dienen sie meist als Referenzpunkte für Orte, an denen man die Richtung wechseln und sich neu orientieren muss. Die zweite Funktion besteht darin andere (möglicherweise weniger sichtbare) Landmarken, an denen bestimmte Handlungen auszuführen sind, zu lokalisieren. Diese Landmarken liegen nicht an den sogenannten Handlungspunkten, sondern entlang eines Teilstücks einer Route und werden von der navigierenden Person nur passiert. Die dritte Funktion dient als Bestätigung für die navigierende Person, dass sie sich auf der richtigen Route befindet. Während die erste Funktion zweifelslos die wichtigste ist, heben MICHEL & DENIS (2001) auch die Bedeutung der anderen Funktionen hervor. So machen Landmarken entlang einer Route (nicht an Handlungspunkten) bis zu 50 Prozent aller erwähnten Landmarken einer Wegbeschreibung aus. (LOVELACE ET AL. 1999)

Mehrere Studien weisen auf die außerordentliche Wichtigkeit von Landmarken für die Orientierung, Wegfindung und Routenbeschreibung hin. Etwa 70 Prozent aller Hinweise einer Wegbeschreibung betreffen in irgendeiner Form Landmarken. Weit abgeschlagen folgen Straßentyp, Kreuzungen, Straßennamen und Distanzangaben. Dieser Sichtweise zufolge handeln sich Personen in ihrer Navigation im Wesentlichen von Landmarke zu Landmarke, die sie sich als Sub-Ziele setzen, bevor sie das endgültige Ziel erreichen. (MAY ET AL. 2003; MICHON & DENIS 2001) Damit überein stimmen auch Darken und Sibert, wenn sie empfehlen im Kartendesign eine organisatorische Strukturierung der Umwelt vorzunehmen, um die Navigation zu erleichtern.

- Teile den Raum in kleine, unterscheidbare Bereiche. Vorzugsweise sollten die Einzelteile in einer hierarchischen Beziehung zueinanderstehen.
- Organisiere die Einzelteile nach einem einfachen Organisationsprinzip, wie einem Gitternetz oder einer logischen, räumlichen Ordnung.
- Inkludiere viele Richtungshinweise, in Form von Landmarken.

(DARKEN & SIBERT 1996)

ASLAN ET AL. (2006) erklären die visuelle Verknüpfung von Landmarken sogar zur dominanten Strategie der räumlichen Orientierung. Der Aufbau einer kognitiven Karte und die Erlangung von konfiguralem Wissen sind demnach nur von untergeordneter Bedeutung. (ASLAN ET AL. 2006) Dies gelte jedoch primär in Gebieten, die der navigierenden Person unbekannt, oder nur wenig vertraut sind. Verfügt sie erst mal über konfigurales Wissen, so wird bei der Navigation auch auf dieses zurückgegriffen. Auch hier spielen Landmarken eine wichtige Rolle, allerdings eher in ihrer Funktion als globale Referenzpunkte und weniger als lokale Indikatoren für Navigationsentscheidungen. Es ist unbestritten, dass konfigurales Wissen etliche Vorteile gegenüber einem rein prozessualen Wissen hat, da man sich unabhängig vom Standort orientieren und fundierte Navigationsentscheidungen treffen kann. (MOESER 1988) Gerade Karten ermöglichen es, den langwierigen Prozess zum Aufbau konfiguralen Wissens zu umgehen und relativ schnell einen Eindruck der räumlichen Beziehung einzelner Objekte zu erlangen.

2.4 Der vertikal segmentierte Indoor Raum

Das Ziel räumlichen Lernens ist sowohl im Indoor als auch im Outdoor Bereich dasselbe. Die navigierende Person hat in der Regel ein Ziel und will dieses in einer sicheren und effizienten Weise erreichen. Es existieren jedoch beträchtliche Unterschiede hinsichtlich der Umgebung, mit der man innerhalb und außerhalb eines Gebäudes konfrontiert ist. Viele dieser Unterschiede erschweren das konfigurale Verständnis des Indoor Raums. Einer der zentralen Unterschiede betrifft die Auswahl möglicher Landmarken. Während es im Outdoor Raum möglich ist, sich an globalen Referenzpunkten zu orientieren und konfigurales Wissen anzuwenden, fällt dies im geschlossenen Raum schwer (oder komplett weg). Da die Sicht durch Indoor Elemente, wie Wände und Decken stark eingeschränkt ist, muss sich die navigierende Person stärker an kleinen, lokalen Landmarken orientieren. Dies betrifft nicht nur die vertikale Dimension eines Bauwerks, sondern oft auch die horizontale. Dadurch fällt es in Gebäuden wesentlich leichter prozessuales Wissen aufzubauen als konfigurales Wissen. (GIUDICE ET AL. 2010)

Der zweite Unterschied, wie bereits in der Einleitung angesprochen, betrifft die vertikale Segmentierung eines (mehrstöckigen) Gebäudes. Es ist unklar, ob der Mensch konfigurales Wissen auch in der vertikalen Dimension aufbaut, oder sich dieses auf die Ebene beschränkt. Zweifellos wäre es für Orientierung und Wegfindung von Vorteil auch in der Vertikale ein konfigurales Verständnis räumlicher Beziehungen zu haben. Ob der Mensch ein solches entwickelt, ist nicht endgültig geklärt. Es gibt jedoch einige Untersuchungen, die eher dagegensprechen. Im Folgenden soll ein Überblick über diese Diskussion gegeben werden.

Seit der einflussreichen Studie von SIEGEL UND WHITE (1975) wird davon ausgegangen, dass die drei Typen räumlichen Verständnisses in einer hierarchischen Beziehung zueinanderstehen. So wird mit zunehmender Erfahrung aus Landmarken Wissen, prozessuales und in weiterer Folge konfigurales Wissen. Separat erlernte Routen werden dabei zu komplexen Clustern und Netzwerken zusammengefasst. Integriert man diese Routencluster in ein einheitliches Referenzsystem resultiert daraus konfigurales Wissen. (MONTELLO & PICK 1993) Für den Outdoor Raum wurde diese Theorie in vielen Studien bestätigt (z.B. GÄRLING ET AL. 1983; HANLEY & LEVINE 1983; HERMAN ET AL. 1987; HOLDING & HOLDING 1989; LEVINE ET AL. 1984; PASSINI 1984) und man ging davon aus, dass sie auch für das räumliche Lernen von Indoor Umgebungen zutreffen würde.

SHANNON MOESER (1988) machte erstmals darauf aufmerksam, dass dies möglicherweise nicht der Fall ist. Sie führte eine Studie durch, in der sie zwei Gruppen von Personen in einem komplexen fünfstöckigen Gebäude verschiedene Aufgaben stellte, die ihr konfigurales Wissen abprüfen sollten. Die Personen der ersten Gruppe kannten das Gebäude (ein Krankenhaus) gut, da sie bereits zwei Jahre darin arbeiteten. Sie hatten ein umfangreiches prozessuales Wissen aufgebaut und konnten problemlos im Gebäude navigieren. Der anderen Gruppe wurde lediglich ein Raumplan gezeigt, den sie eine Zeit lang studieren konnte. Die Probanden wurden nun gebeten von ihrem Standort im

Gebäude in die Richtung einer nicht sichtbaren Landmarke in einer anderen Etage zu zeigen und die Distanz dorthin einzuschätzen. Die Genauigkeit der Einschätzung dient dabei als Indikator für die Ausprägung von konfiguralen Wissen. Der Test wurde in zahlreichen Studien angewandt und gilt als aussagekräftig. Für Moeser war es überraschend, dass beide Aufgaben von der Gruppe, die lediglich den Raumplan studiert hatte, signifikant besser gelöst wurden. Die Probanden, die schon seit zwei Jahren in dem Gebäude arbeiteten und von denen man annahm, dass sich die Menge an prozessualem Wissen zu einer umfassenden kognitiven Karte zusammengefügt hatte, unterlag der Gruppe, die das Gebäude nur wenige Minuten auf der Karte studierte. (MOESER 1988)

MONTELLO & PICK (1993) konnten immerhin beweisen, dass Probanden, die 30 Minuten auf zwei separaten Routen durch ein unbekanntes Gebäude geführt wurden, nicht sichtbare Landmarken auf derselben Route mit einer Genauigkeit lokalisieren konnten, die ein reines Raten übertraf. Dies war auch der Fall für Landmarken, die auf der separat erlernten und durch eine andere Etage führenden Route lagen. Die Probanden wurden erst im Nachhinein über die räumliche Beziehung der beiden Routen durch einen gemeinsamen Referenzpunkt aufgeklärt. Es konnte also gezeigt werden, dass Personen prozessuales Wissen bereits nach einer 30-minütigen Begehung in ein konfigurales Verständnis über ein mehrgeschossiges Gebäude integrieren konnten. Allerdings war die Genauigkeit der Richtungsschätzung zu Landmarken auf derselben Route wesentlich höher als jene zu Landmarken, die auf der Route lagen, auf der sich der Proband zum Zeitpunkt der Schätzung nicht befand. Diese Ergebnisse wurden von RICHARDSON ET AL. (1999) und WITMER ET AL. (1996) bestätigt. Sie sahen Rotationsbewegungen, die beim Etagenwechsel im Stiegenhaus notwendig waren, als einen möglichen Auslöser für die Desorientierung. (LI & GIUDICE 2012B; MONTELLO & PICK 1993; RICHARDSON ET AL. 1999; WITMER ET AL. 1996)

2.5 Die kognitive Codierung des vertikalen Raums

Um das Verhältnis konfiguralen Wissens in der Ebene und im vertikal segmentierten Raum besser verstehen zu können, führten CHRISTOPH HÖLSCHER ET AL. (2006) eine wegweisende Studie durch. Sie identifizierten drei Strategien, die Personen anwenden, um eine Wegfindungsaufgabe über mehrere Stockwerke eines komplexen Gebäudes hinweg zu bewältigen:

- Bei der *zentralen- Punktstrategie* orientieren sich die Probanden an Orten oder Teilen des Gebäudes, die sie gut kennen. Das kann etwa der Eingangsbereich oder ein zentraler Verbindungsweg sein. Die Probanden versuchen dabei, möglichst nah an diesen zentralen Punkten zu bleiben, auch wenn das bedeutet Umwege in Kauf zu nehmen.
- Bei der *Richtungsstrategie* wählen die Probanden Routen, die in Richtung der horizontalen Position des Ziels führen. Sie wählen diese Richtung unabhängig davon, in welcher Etage sie sich gerade befinden.
- Bei der *Ebenenstrategie* versuchen die Probanden den Weg zur Zieletage möglichst direkt zu finden, unabhängig von der horizontalen Position des Zieles.

> Sie peilen also pro Ebene, jeweils das vertikale Verbindungselement (Stiege, Rolltreppe oder Aufzug) an.

Am weitaus effektivsten im nachfolgenden Experiment schnitten jene Personen ab, die eine Ebenenstrategie anwandten, gefolgt von der Richtungsstrategie und der zentralen-Punktstrategie. Personen, die das Gebäude gut kannten, schnitten bei der Richtungs- und Distanzabschätzung zu nicht sichtbaren Landmarken (wie schon bei MOESER (1988)) nicht besser ab, als Personen, die es zum ersten Mal betraten, was gegen die Entwicklung von konfiguralem Wissen, über Etagen hinweg, hindeutet. (HÖLSCHER ET AL. 2006)

Die Ebenenstrategie entspricht der kognitiven Repräsentation von Raum, die schon DARKEN & SIBERT (1996) sowie MICHON & DENIS (2003) identifiziert haben: Menschen zerkleinern eine Wegfindungsaufgabe in einzelne Teile und stecken sich Sub-Ziele. Im Fall der Ebenenstrategie, wird jede Etage einzeln betrachtet und der schnellste Weg auf die nächste Ebene gesucht. Es kommt dabei durchaus zum Einsatz von konfiguralem Wissen, allerdings beschränkt sich dieses auf eine Etage. Probanden, die die Richtungsstrategie anwandten verirrten sich öfter und schnitten schlechter ab, obwohl es die einzige Strategie ist, die tatsächlich konfigurales Wissen über Etagen hinweg erfordert. Es scheint also, als ob der Mensch tatsächlich über keine exakte, konfigurale Repräsentation des dreidimensionalen Raums verfügt. Vielmehr könnte er die einzelnen Ebenen eines Gebäudes als separate, kognitive Karten abgespeichert haben und sie je nach Bedarf abrufen. Durch die Ebenenstrategie umgeht der Mensch also den kognitiven Flaschenhals, der entsteht, wenn er sich durch einen vertikal segmentierten Raum bewegt, indem er einen hierarchischen Planungsprozess anwendet: Erst wechselt er auf die richtige, vertikale Ebene, indem er sich von Aufgang zu Aufgang bewegt. Und sobald er die richtige Ebene erreicht hat, ist die Feinplanung auf eine zweidimensionale Ebene reduziert worden. (HÖLSCHER ET AL. 2006)

Die Neurowissenschaftlerin Kathryn Jeffery forscht intensiv zu der Frage, wie Säugetiere (inklusive des Menschen) komplexe, dreidimensionale Räume kognitiv verarbeiten. Sie plädiert dafür, dass die vertikale Dimension zwar in unsere kognitiven Karten integriert, aber anders kodiert wird als die horizontale Ebene. *Während wir für die Ebene ein metrisches Verständnis entwickelt haben, in dem es möglich ist Winkel und relative Distanzen einzuschätzen, besitzen wir für die dritte Dimension nur eine nicht-metrische, ordinal skalierte Repräsentation.* Diese kann ohne Fremdschlüssel nicht exakt interpretiert werden. Um dies deutlicher zu machen vergleicht Jeffery die kognitive Repräsentation des vertikalen Raums mit einer Karte, in der die Geländehöhe mit einer hypsometrischen Farbgebung angedeutet wird. Die Höhe kann dabei nicht exakt bestimmt werden, allerdings wird es möglich zwischen „niedrig“, „hoch“ oder „sehr hoch“ zu unterscheiden. (Abb. 11) Auf Gebäude umgelegt, könnte eine solche, ordinal skalierte Codierung die Angabe der Etagenzahl sein, welche die kognitive Karte in der dritten Dimension strukturiert. (JEFFERY ET AL. 2012)

Auch BRANDT ET AL. (2015) und WILSON ET AL. (2004) stellen in jeweils eigenen Experimenten eine asymmetrische kognitive Codierung des Menschen im vertikalen Raum fest. Durch die mangelhafte Integration der dritten Dimension in unsere kognitiven Karten,

kommt den vertikalen Verbindungselementen (Stiegen, Rolltreppen, Aufzüge) in Gebäuden eine herausragende Bedeutung zu. Durch sie wird es möglich, die separaten konfiguralen Repräsentationen der einzelnen Ebenen miteinander zu verknüpfen. Sie stellen Referenzpunkte dar, um Etagen in Relation zueinander zu setzen. *Letztendlich determinieren sie unser ordinales Verständnis der dritten Dimension in mehrstöckigen Gebäuden.* Darüber hinaus dienen sie auch innerhalb einer Ebene als wichtige Landmarken. Meist sind sie weithin sichtbar und strukturieren eine Umgebung, die oft von einem Mangel an Referenzpunkten gekennzeichnet ist.

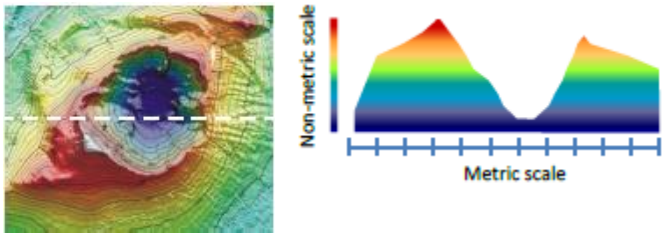


Abb. 11: Horizontal metrische skalierte Karte mit einem nicht-metrischen Maßstab in der vertikalen Dimension (JEFFERY ET AL. 2012)

2.6 Bedeutung von vertikalen Transitionselementen

LI UND GIUDICE (2012B) bezeichnen diese vertikalen Verbindungselemente als Transitionspunkte („transition points“), im Gegensatz zu Entscheidungspunkten, die Richtungswechsel im prozessualen Wissen markieren. Um einer Verwirrung über die geometrische Beschaffenheit dieser Elemente vorzubeugen, wird in weiterer Folge von *Transitionselementen* gesprochen. Transitionselemente stellen die Übergänge zwischen zwei vertikal gestaffelten, kognitiven Karten dar. Sie bestehen aus zwei Punkten und einer verbindenden Linie. Die beiden Punkte haben jeweils einen horizontalen Versatz, einen vertikalen Versatz und einen Transitionswinkel. (Abb. 12) Im Falle einer Stiege entspricht der horizontale Versatz der Länge der Stiege in der Ebene eines zweidimensionalen Koordinatensystems, beziehungsweise der Ankathete eines rechtwinkeligen Dreiecks. Der vertikale Versatz entspricht der Höhe der Stiege auf der Z-Achse, beziehungsweise der Gegenkathete im rechtwinkeligen Dreieck. Der Transitionswinkel ist gleich dem Neigungswinkel der Stiege bezogen auf die positive X-Achse. Im Falle eines Aufzugs ist der horizontale Versatz Null und der Transitionswinkel 90 Grad. (LI & GIUDICE 2012A)

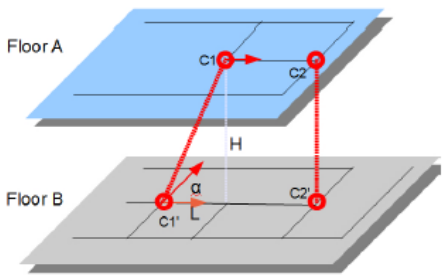


Abb. 12: Mehrschichtiger Indoor Raum mit Transitionselementen (C1=Stiege, C2=Aufzug) (LI & GIUDICE 2012A)

LI & GIUDICE (2012A) argumentieren, dass ein horizontaler Versatz größer Null und ein Transitionswinkel kleiner 90 Grad die Entwicklung einer exakten und über Etagen hinweg kohärenten, kognitiven Karte behindern. Sie empfehlen interaktive Karten, welche die visuelle Erfassung der mehrschichtigen Struktur eines Gebäudes ermöglichen und insbesondere die wichtige Funktion der Transitionselemente herausheben. Die visuelle Betonung der Transitionselemente soll die Funktion von Landmarken, als Referenzpunkte zwischen den unterschiedlichen Etagen hervorheben und so ihre Integration in eine *mehrschichtige kognitive Karte* fördern. (LI & GIUDICE 2012A)

Zusammengefasst besteht eine solche mehrschichtige kognitive Karte aus:

- *einer Reihe vertikal gestaffelter einzelner kognitiver Karten, die je eine Etage repräsentieren*
- *Informationen zu vertikalen Transitionselementen (Stiegen, Rolltreppen und Aufzügen)*
- *Informationen über die räumliche Beziehung und Ausrichtung von Elementen unterschiedlicher Ebenen (wodurch abgeschätzt werden kann, was sich direkt ober- oder unterhalb der eigenen Position befindet)*
- *einer groben, ordinalen Codierung der vertikalen Z-Achse*

(LI ET AL. 2016)

Diese aus den Kognitions- und Neurowissenschaften zusammengetragenen theoretischen Grundlagen, sollen das Fundament bilden, um in weiterer Folge Design Vorschläge für die Entwicklung von interaktiven Indoor Navigationskarten abzuleiten. *Ziel dieser Karten soll es einerseits sein, die Wegfindung innerhalb von Gebäuden zu unterstützen, andererseits aber auch konfigurales Wissen aufzubauen und eine mehrschichtige kognitive Karte zu entwickeln.* Wie in der Einleitung dargestellt, konnte trotz mehrerer Experimente kein eindeutiger Beweis für die Vorteile von dreidimensionalen Karten gegenüber herkömmlichen zweidimensionalen Karten gefunden werden. Ebenso wenig konnte jedoch bewiesen werden, dass sie diesen grundsätzlich unterlegen sind. Ich argumentiere, dass kartographische Designaspekte den Ausgang dieser Studien maßgeblich beeinflusst haben und für die widersprüchlichen Ergebnisse mitverantwortlich sind.

Da die Literaturanalyse gezeigt hat, dass die dritte Dimension in den kognitiven Karten des Menschen durchaus eine Rolle spielt und Karten ein effektives Medium für die Vermittlung konfiguralen Wissens darstellen, konzentriere ich mich in dieser Arbeit auf das Design von dreidimensionalen, perspektivischen Karten. Theoretisch fundierte Empfehlungen für das Design solcher Karten, könnten in Zukunft dazu beitragen aussagekräftigere Antworten auf die Frage nach deren Vorteilen zu erhalten.

3 Aspekte des 3D Karten Designs

Visualisierungen sind eines der wichtigsten Mittel, um dem Menschen komplexe Informationen verständlicher zu machen. Da ein Großteil aller Informationen einen geographischen Bezug hat, kommt kartographischen Darstellungen eine große Bedeutung zu. Durch sie können Muster erkannt werden, die andernfalls nur schwer vermittelbar wären. Dabei ist Visualisierung nicht gleich Visualisierung und rund um die optimale Vermittlung räumlicher Informationen in Form von Karten hat sich eine eigene Wissenschaft entwickelt. Der französische Kartograph JACQUE BERTIN (1974) hat mit seiner Monographie „Graphische Semiologie“ eines der grundlegenden Werke der modernen Kartographie vorgelegt. Das folgende Kapitel stützt sich, neben den Erkenntnissen des ersten Kapitels, größtenteils auf Überlegungen die in diesem Werk angestellt wurden sowie auf Adaptionen die im Zuge der Digitalisierung der Kartographie vorgenommen wurden.

Nachdem im zweiten Kapitel dargestellt wurde, wie der Mensch räumliche Informationen aus der physischen Welt extrahiert, strukturiert, verarbeitet und abspeichert, geht es nun darum, wie kartographische Visualisierungen diesen Prozess unterstützen und beschleunigen können. Ebenso wurden bereits einige Anmerkungen zu der Rolle der Perspektive und den hierarchischen Organisationsprinzipien einer Karte gemacht. (DARKEN & SIBERT 1996; LEVINE 1984) Nun soll es um die graphischen Aspekte der Karte gehen und wie diese zum räumlichen Verständnis des Menschen beitragen können. Zu Beginn dieses Kapitels werden deshalb die semiologischen Grundlagen der Kartographie erarbeitet. Seit etwa 15 Jahren wird versucht etablierte Konventionen für die digitale 3D Kartographie zu adaptieren. Diese Überlegungen sollen ebenso aufgegriffen werden, um ein theoretisches Grundgerüst zu entwerfen, anhand dessen Vorschläge für das Design von dreidimensionalen Indoor Karten abgeleitet werden können.

3.1 Kartenelemente und graphische Variablen

Eine herkömmliche Karte wird durch die Kartenelemente *Punkt, Linie, Fläche, Signatur, Diagramm, Halbtöne* und *Text* gestaltet. Diese grundlegenden Elemente werden durch graphische Variablen dargestellt, um eine gute Differenzierung, Bewertung oder Assoziation der Kartenobjekte zu erreichen. Die Formulierung der sechs graphischen Variablen (Abb. 13) erfolgte durch BERTIN (1974) und stellt eine wichtige Grundlage für die kartographische Visualisierung dar: *Größe, Helligkeit, Muster, Farbe, Richtung* und *Form;* Durch diese Variablen können Bertin zufolge alle graphischen Ausprägungen beschrieben werden. Jede dieser Variablen stellt eine eindimensionale Variationsmöglichkeit für die Gestaltung eines Kartenelements dar. Durch sie kann eine Karte objektiv gegliedert werden. Außerdem ermöglichen sie die subjektive Bewertung einzelner Elemente durch ein Betonen oder Zurückdrängen sowie eine verstärkte Anschaulichkeit auf Basis von Assoziationen. (TERRIBILINI 2001)

Die folgende Tabelle bietet einen Überblick über die primitiven Kartenelemente und wie diese mit den graphischen Variablen kombiniert werden können.

GESTALTUNGS-MITTEL	BESCHREIBUNG	MÖGLICHE VARIATIONEN
PUNKT	Graphische Punkte mit einem Mindestdurchmesser, welche die Lage eines Objektes angeben. Punkte werden oft in Kombination mit Signaturen eingesetzt.	Farbe, Größe
LINIE	Nicht unterbrochene Striche, die eine Lage angeben. Sie dienen zur Abgrenzung oder als Mittellinie von Objekten und zur Verbindung von Punkten gleichem Informationswert (Isolinien). Linien werden oft in Kombination mit Signaturen eingesetzt.	Farbe, Breite
FLÄCHE	Regionen, die in ihrer Ausdehnung in Farbe und Helligkeit konstant sind. Sie erlauben Lage und Qualität flächenhafter Diskreta, flächenbezogene Quantitäten und Wertstufen eines Kontinuums auszudrücken. Flächen werden oft in Kombination mit Signaturen eingesetzt.	Farbe, Helligkeit
SIGNATUR	Abstrahierte Objektbilder oder konventionelle Zeichen. Sie erlauben stets eine qualitative Angabe, in vielen Fällen eine Lageangabe und in manchen Fällen auch eine quantitative Angabe.	Form, Richtung, Größe, Farbe, Helligkeit, Muster
DIAGRAMM	Graphische Mittel zur Wiedergabe quantitativer (meistens statistischer) Daten. Diese können sich auf einen bestimmten Punkt oder auf eine Fläche beziehen	Typ, Größe, Farbe, u.a.
HALBTÖNE	Regionen mit wechselnden Helligkeitswerten (Schummerung). Ziel der Halbtöne ist eine formanschauliche Geländedarstellung	Farbe
TEXTE	Textinformationen. Sie besitzen eine sehr beschränkte geometrische Aussagemöglichkeit, sind aber das wichtigste erläuternde Element einer Karte	Schriftart, Lage, Breite, Größe, u.a.

Tab. 1: Kartographische Gestaltungsmittel und ihre graphischen Variablen (HAKE & GRÜNREICH 1994)

Die Variablen Form, Richtung und Farbe eignen sich zur Abbildung nominalskalierter Daten. Muster und Helligkeit können Hierarchien abbilden und eignen sich für die Darstellung von Ordinaldaten. Größe schließlich eignet sich für alle Skalierungen und kann neben den bereits genannten auch intervall- und rationalskalierte Daten abbilden. Die Wahl der graphischen Variablen hängt vom Thema der Karte ab. Dieses muss folglich gründlich analysiert werden. Es muss danach gefragt werden, was die Karte vermitteln soll, in welchen Situationen sie genutzt wird, aber auch wer die Benutzergruppe ist, was

ihr Kenntnisstand ist und was für spezifische Anforderungen sie an die Karte hat. (BERTIN 1974; HAKE & GRÜNREICH 1994; NOSSUM 2013; SPENCE 2007)

Um der wachsenden Bedeutung der Computergraphik Rechnung zu tragen, ergänzte MACEACHREN (1995) die sechs Variablen von Bertin um *Farbsättigung, Arrangement, Schärfe* (engl. „crispness"), *Auflösung* und *Transparenz.* Nachfolgende Abbildungen zeigen Bertins Variablen mit MacEachrens Ergänzungen.

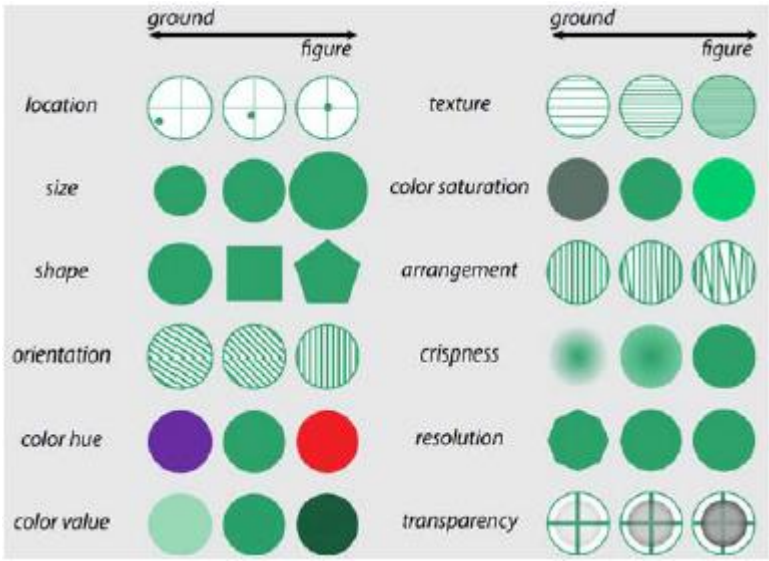


Abb. 13: Graphische Variablen von BERTIN (1974) und MACEACHREN (1995) (SEMMO 2016)

Neben den sieben Kartenelementen und den graphischen Variablen haben sich in der Forschung auch verschiedene Darstellungsprinzipien herausgebildet. Sie beschreiben grundsätzliche Gestaltungsmöglichkeiten, die gewissen Prinzipien folgen sollten. ARNBERGER (1966) identifizierte vier Hautprinzipien (Abb. 14):

- Das *topographische Prinzip* besagt, dass orts- und flächenbezogene Objekte möglichst lagetreu abgebildet werden müssen. (a)
- Das *Diagrammprinzip* besagt, dass die geometrischen Figuren eines Diagramms, ortsgebundene Objektinhalte möglichst verständlich ausdrücken sollen. Sie sollen leicht zu berechnen und auszumessen sein und einen quantitativen Vergleich ermöglichen. (b)
- Beim *bild-statistischen Prinzip* wird der Wert eines Objekts durch Signaturen ausgedrückt, die alle eine bestimmte Werteinheit besitzen. Die Anzahl der Signaturen gibt den Objektwert wieder. (c)
- Das *bildhafte Prinzip* definiert wie die graphische Darstellung einem Objekt eine semantische Bedeutung verleiht, indem sie möglichst assoziativ gestaltet wird. Es kann sich dabei um unterschiedlichste Ausprägungen von sehr abstrahiert bis photorealistisch, zweidimensionaler bis perspektivischer Ansicht handeln. (d)

(ARNBERGER 1966)

Neben diesen Hauptprinzipien werden noch weitere, wie das *Prinzip der Assoziationsfähigkeit,* das *Prinzip der naturnahen Gestaltung,* oder das *Prinzip der maßstabs- und inhaltsgerechten Generalisierung* genannt. Diese sind allerdings von untergeordneter Bedeutung und zum Teil bereits in oben genannten enthalten. (ARNBERGER 1966)

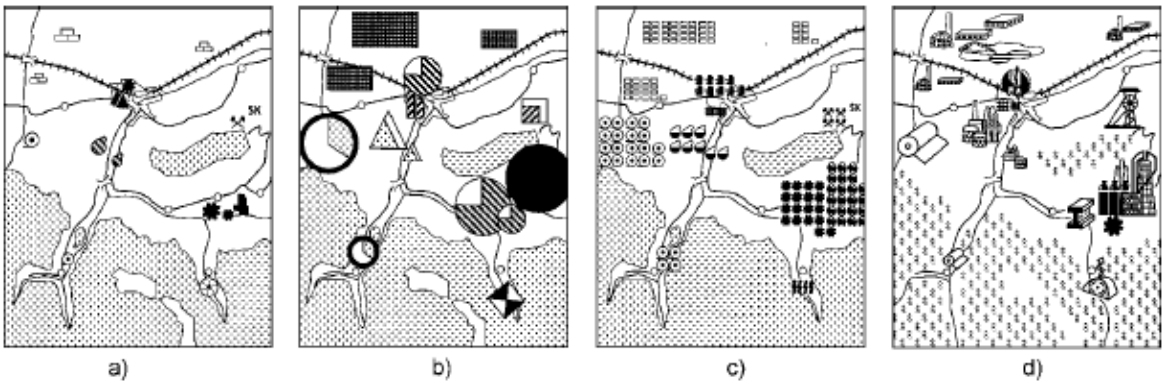


Abb. 14: Die vier Darstellungsprinzipien nach ARNBERGER (1966)

3.2 Einordnung von 3D Karten

Lange Zeit wurden perspektivische kartographische Darstellungen unter dem Begriff „kartenverwandte Darstellungen" geführt. Wie der Name bereits andeutet wurden sie dem Forschungsfeld der Kartographie nie direkt zugerechnet und unterlagen nicht denselben Gestaltungsprinzipien und Konventionen. Vielmehr wurden sie als künstlerische Ausdrucksform betrachtet, der nicht dieselbe analytische Funktion oder geometrische Präzession einer traditionellen allozentrischen Karte zugeschrieben werden konnte. Dies führte auch dazu, dass es bis vor Kurzem keine umfassenden theoretischen Abhandlungen über diese Darstellungsformen, die als Vorläufer dessen, was hier als 3D Karte bezeichnet wird, gab. (MACEACHREN 1995)

Abb. 15: Blockbild (Imhof), Vogelschaukarten der Südalpen (Berann) und des Aletschgletscher (Hölzel) (HÄBERLING 2004)

Darstellungen dieser Art erlebten ihren Höhepunkt im 19. und 20. Jahrhundert und ihre Meister, wie Eduard Imhof, Heinrich Berann oder Fritz Hölzel haben bis heute viele Verehrer. Ihre Produkte wurden als Blockbilder, Panoramen oder Vogelschaukarten (Abb. 15) bezeichnet und auch heute noch finden sie ihren Einsatz als Darstellungen von Ski-

oder Wandergebieten. Dabei fällt auf, dass sie augenscheinlich durchaus eine raumvermittelnde und routenbeschreibende Funktion einnehmen und in gewissen Fällen herkömmlichen Karten vorgezogen werden. Ihre Einsatzgebiete zeichnen sich dabei durch eine starke vertikale Strukturierung, in Form von Bergen und Tälern aus. Ihre Nutzergruppen sind gewöhnliche Urlauber, denen nicht per-se die Fähigkeit des Kartenlesens attestiert werden kann. Es ist also festzuhalten, dass perspektivische Darstellungen durchaus zum analytischen Gebrauch angefertigt werden und nicht als bloße Kunstwerke betrachtet werden können.

Mit dem Aufkommen leistungsstarker Computer und spezialisierter Software, ist es heute um ein Vielfaches einfacher Darstellungen solcher Art zu produzieren. Dies führt dazu, dass sie besonders im Internet eine weite Verbreitung erfahren haben. Die Notwendigkeit für die wissenschaftliche Einordnung und Neubewertung moderner dreidimensionaler Darstellungen und historischer kartenverwandter Darstellungen wurde damit offensichtlich.

Buchroithners Definition zufolge handelt es sich bei der 3D Kartographie, um kartographische Darstellungen, die beim Betrachter spontan einen dreidimensionalen, also räumlichen Eindruck erwecken. Er bezeichnet sie folglich als „kartographische Raumbilder“. Sie werden „perspektiv-monoskopisch“, mithilfe digitaler Mittel „auf einem flachen Display-Medium realisiert“. (BUCHROITHNER & SCHENKEL 2001) CHRISTIAN HÄBERLING (2004), der sich mit seiner Dissertation als einer der Ersten einer umfassenden theoretischen Abhandlung der 3D Kartographie widmete, schloss sich dieser Definition an und führte dafür den Begriff der 3D Karte ein. Eine 3D Karte wird demzufolge als eine kartographische Darstellung in perspektivischer Schrägsicht mit kartographischen Inhalt bezeichnet. (HÄBERLING 2004)

Die beiden Grenzfälle der perspektivischen Betrachtung von Null Grad (Profil) und 90 Grad (Orthogonalprojektion) werden bei Häberling explizit nicht berücksichtigt. Er merkt auch an, dass der 3D Karte wichtige Eigenschaften einer herkömmlichen Karte, wie Maßstäblichkeit und Messbarkeit fehlen. Die dargestellten Objekte und über weite Teile auch der Zweck entsprechen allerdings dem Inhalt traditioneller Karten. Die Objekte sind innerhalb des kartographischen Modells georeferenziert und generalisiert, ihre Erscheinung ist klassifiziert und in einer Legende symbolisiert. Damit sind für Häberling genug Kriterien einer traditionellen Karte erfüllt, um sie als solches zu bezeichnen. (HÄBERLING 2004; HÄBERLING ET AL. 2008) DÖLLNER (2001) verfolgt bei seiner Definition einer 3D Karte einen eher erstellungstechnischen und nutzerorientierten Ansatz. Er hebt das Digitale Geländemodell (DGM) als Grundlage für eine computergraphische Visualisierung hervor, in der Kartenaufbau und -gestaltung abhängig von der interaktiv und dynamisch festzulegenden Sichtsituation sind. (DÖLLNER 2001)

Ich möchte mich in dieser Arbeit dem bisher gesagten anschließen und weiterhin die Bedeutung der Z-Achse, als Trägerin aller vertikalen Information hervorheben. Aufgrund der im zweiten Kapitel erörterten, asymmetrischen Repräsentation der dritten Dimension im menschlichen Hirn und der perspektivischen Verzerrung durch die Schrägansicht, soll die Z-Achse allerdings nicht denselben geometrischen Exaktheitsanforderungen wie die

beiden anderen Achsen unterliegen. Vielmehr soll sie als globale, graphische Variable verstanden werden, deren Skalierung zugunsten von Anschaulichkeit und Informationsvermittlung angepasst werden darf.

Im Folgenden werden weitere Überlegungen von Christian Häberling und seinem Kollegen Andrea Terribilini zur Systematisierung der graphischen Aspekte von 3D Karten angeführt. Diese sollen helfen die eigenen Ableitungen dieser Arbeit in einen theoretischen Rahmen zu rücken und die Vorgehensweise zu strukturieren.

3.3 Prozesskette zur Erstellung von 3D Karten

Jacque Bertin selbst geht mit seiner graphischen Semiologie nicht auf die Aspekte der Bewegung oder der Dreidimensionalität ein. Er formuliert seine Überlegungen explizit für die zwei Dimensionen der Ebene, in der er jedes Kartenelement verortet. Darüberhinausgehende visuelle Variation durch Tiefenerkennung oder Perspektive erkennt er zwar grundsätzlich an, grenzt sein graphisches System aber ausdrücklich davon ab. (BERTIN 1974; HÄBERLING 2004) Erweitert man die Diskussion um moderne kartographische Erscheinungsformen von digitalen, interaktiven und auch 3D Karten, ist Bertins Systematik kaum mehr ausreichend und kann diese nicht mehr vollständig erfassen. All diese Erscheinungsformen haben Auswirkungen auf die primitiven Kartenelemente und graphischen Variablen. Im Falle von 3D Karten:

- können *Punkte und Linien* nicht optimal dargestellt werden. Durch Verzerrungen, die der Perspektive geschuldet sind, wird es schwierig ihre minimalen Dimensionen kohärent abzubilden. Stattdessen werden linien- und punkthafte Objekte oft in Polygone umgewandelt oder zur Anordnung von Signaturen verwendet.
- *Halbtöne* werden allein durch den dreidimensionalen Objektkörper, seine Materialeigenschaften und die Beleuchtung bestimmt. Sie geben im Gegensatz zu zweidimensionalen Karten die Form des Objekts exakt wieder.
- Zu den traditionellen bildhaften und abstrakten *Signaturen* zweidimensionaler Karten, kommen bei 3D Karten noch dreidimensionale Symbole hinzu.
- Die konstante Farbe und Helligkeit von *Flächen* fällt bei 3D Karten meist weg, da sie durch Form, Material und Beleuchtung beeinflusst wird.

(TERRIBILINI 2001)

Um 3D Karten mithilfe graphischer Variablen besser beschreiben zu können, führte HÄBERLING (2004) den Begriff *Gestaltungsvariable* (engl. „design variable“) und *Gestaltungsaspekt* (engl. „design aspects“) ein. Erstere kann als graphischen Variable für dreidimensionale Objekte, verstanden werden. Gestaltungsvariablen sind die elementarsten veränderbaren Größen im Gestaltungsprozess. Sie stellen eine Erweiterung von Bertins graphischen Variablen für die Erfordernisse von digitalen 3D Karten dar und werden den einzelnen Gestaltungsaspekten zugeordnet. Ein Gestaltungsaspekt setzt sich also aus einem Bündel bestimmter Gestaltungsvariablen zusammen und stellt einen unabhängigen

Gestaltungsbereich dar. Dieser kann sich auf ein bestimmtes äußeres Merkmal oder ein Verhaltensmerkmal einer 3D Karte oder ihrer Kartenobjekte beziehen. Es wird außerdem zwischen objektbezogenen und globalen Gestaltungsaspekten unterschieden. Objektbezogen Gestaltungsaspekte beeinflussen nur die Erscheinung eines einzelnen Objekts, während globale Gestaltungsaspekte Auswirkungen auf mehrere Objekte haben und erstere auch überschreiben können. (HÄBERLING 2004) Nach Terribilini kann jeder Gestaltungsaspekt in einer dreigeteilten Prozesskette zur Erstellung einer 3D Karte einem Prozessabschnitt zugeordnet werden: *Modellierung, Symbolisierung* oder *Visualisierung;* (TERRIBILINI 2001)

Die *Modellierung* bei TERRIBILINI (2001) beschreibt die algorithmische Anpassung von Datenstruktur und -format originärer Geodaten, sodass sie ein integriertes 3D Landschaftsmodell bilden. Bei den Rohdaten kann es sich um ein DGM oder um topographische, objektbeschreibende Vektordaten handeln. Objekte aus vorhandenen Datensätzen werden dabei zweckgebunden ergänzt, verändert und eliminiert. Die Modellierung kann dabei auch die Geometrie (Form, Größe), oder Position verändern, wodurch der Generalisierungsgrad schon in diesem Prozessschritt maßgeblich beeinflusst wird. (HÄBERLING 2004; TERRIBILINI 2001)

Die *Symbolisierung* folgt auf den Modellierungsprozess. Hier erhalten die Objekte des 3D Landschaftsmodells ihre graphischen Attribute. Durch die endgültige Bestimmung der Form, Größe, Farbe, Helligkeit, Textur und Richtung der Objekte wird festgelegt, wie diese nach der Visualisierung auszusehen haben. Außerdem werden Kartensymbole entworfen, die relevante (meist punkthafte) Geometrien als Points of Interest (POI) in ihrer semantischen Bedeutung repräsentieren sollen. Das Ergebnis wird als kartographisches 3D Landschaftsmodell bezeichnet. (HÄBERLING 2004; TERRIBILINI 2001)

Bei der *Visualisierung* schließlich werden Parameter festgelegt, die weiter oben als globale Gestaltungsaspekte definiert wurden. Einzelne Objekte werden in ihrer spezifischen Ausgestaltung nicht mehr beeinflusst, vielmehr rückt die globale Erscheinung des graphisch definierten Modells in den Blickpunkt. Parameter, die das gesamte Modell beeinflussen, sind vor allem die Kameraeinstellungen, die die Perspektive determinieren und die Beleuchtungseinstellungen. (HÄBERLING 2004; TERRIBILINI 2001)

Die vorliegende Arbeit setzt schon früher an und berücksichtigt zwei Prozessschritte, die bei TERRIBILINI (2001) und auch HÄBERLING (2004) keine Beachtung finden. Nämlich die *Erfassung* der Daten im Feld und die *Digitalisierung* mit einer geeigneten Software (Abb. 16). Diese beiden Schritte müssen im Rahmen dieser Arbeit mitgedacht werden, da sie bereits bestimmte Gestaltungsaspekte der 3D Karte beeinflussen. So wird das Ausmaß der Generalisierung durch die Auswahl der erfassten Objekte und deren geometrische Genauigkeit bei der Digitalisierung bereits hier angedeutet. Es muss allerdings festgehalten werden, dass es sich in diesem Stadium noch um zweidimensionale Geometrien handelt, die erst im Zuge der Modellierung um eine Z-Koordinate erweitert werden. Nichtsdestotrotz soll Terribilinis Prozesskette um diese beiden Schritte ergänzt werden, um den gesamten in dieser Arbeit präsentierten Ablauf, mit all seinen Einflussmöglichkeiten auf die Ausprägung der Gestaltungsvariablen, abzubilden.

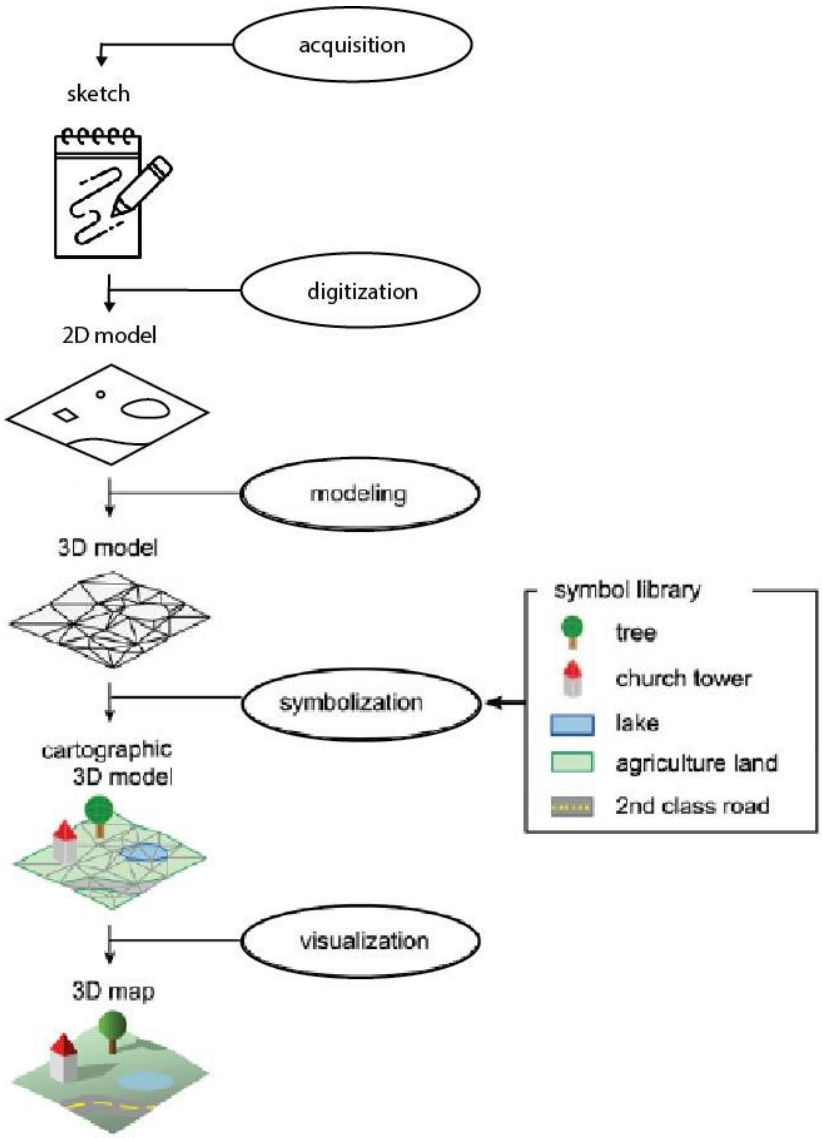


Abb. 16: Erweiterte Prozesskette für die Erstellung von 3D Karten (abgeändertes Diagramm von TERRIBILINI 2001)

SEMMO (2016) stellte in seiner Dissertation einen eigenen Implementierungsablauf vor, der Modelle von REICHENBACHER & SWIENTY (2007), JOBST (2008) und HÄBERLING (2004) in die „Visualisierungspipeline" (engl. „visualization pipeline") für 3D Computer Graphiken von WARE (2004) integriert. Diese teilt sich in fünf Prozessschritte: *Modellierung* (engl. „modeling"), *Filterung* (engl. „filtering"), *Kartierung* (engl. „mapping"), *Rendering* (engl. „rendering") und *Wahrnehmung* (engl. „perception"). Die Modellierung entspricht dem gleichnamigen Prozessabschnitt bei Terribilini, während die Filterung größtenteils auf der kontextabhängigen Selektion der darzustellenden Kartenobjekte basiert. Diese wird bei der, in dieser Arbeit angewandten, Prozesskette bereits im Abschnitt Erfassung durchgeführt. Die Prozessschritte Kartierung und Rendering entsprechen den Abschnitten Symbolisierung und Visualisierung. Der letzte Abschnitt der Wahrnehmung beschreibt die zeitliche und räumliche Kohärenz der graphischen Elemente. SEMMO (2016) hebt die Rolle

der Generalisierung hervor, die in mehreren Prozessschritten angewandt wird. Das erste Mal bei der Filterung (hier der Erfassung) zur Erstellung des Landschaftsmodells, danach bei der Kartierung (hier Symbolisierung) für ein generalisiertes kartographisches Modell und schließlich beim Rendering (Visualisierung) hin zur generalisierten graphischen Repräsentation. Dieser Sichtweise auf die Generalisierung als übergeordnete Gestaltungsvariable, die in der gesamten Prozesskette zum Einsatz kommt, möchte ich mich anschließen.

3.4 Gestaltungsaspekte und -variablen von 3D Karten

Die erweiterte Prozesskette, zusammen mit der speziellen Rolle der Generalisierung und den Gestaltungsaspekten mit ihren Variablen, stellen in weiterer Folge das Grundgerüst dar, mithilfe dessen eine 3D Karte einer unterirdischen U-Bahn-Station visualisiert werden soll. Im Folgenden sind die Gestaltungsaspekte mit ihrer Zuordnung zu den Prozessabschnitten angeführt. Ebenso werden die, den Gestaltungsaspekten zugeordneten Gestaltungsvariablen aufgelistet, wobei nur die, für diese Arbeit relevanten Variablen übernommen wurden. Die Auflistung von Häberling wurde für die zwei ergänzten Prozessschritte leicht angepasst und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zudem können gewisse Gestaltungsvariablen an mehreren Stellen in der Prozesskette angewandt oder unterschiedlichen Gestaltungsaspekten zugeordnet werden. Die ursprüngliche Tabelle findet sich in der Dissertation von HÄBERLING (2004).

Erfassungsaspekte

- *Erfassungsausmaß*
  - Objektselektion
  - Geometrische Genauigkeit
  - Topographische Genauigkeit
  - Topologische Genauigkeit
  - Qualitative Attribute
  - Quantitative Attribute
- *Erfassungstechnik*
  - Maßstäblichkeit
  - Erfassungsmedium
  - Erfassungsinstrument
  - Messtechnik
  - Kontrollaufnahmen und -messungen
  - Erfassungsort

Digitalisierungsaspekte

- *Digitalisierungssoftware*
  - Zeichenwerkzeuge

    - Filteroptionen
    - Topologieoptionen
    - Orthogonalisierungsoptionen
    - Validierung
- *Digitalisierungsgrundlage*
    - Auflösung
    - Aktualität
    - Raumbezug
    - Orientierung
    - Unterstützende Perspektivansicht

Modellierungsaspekte

- *Modellierung des DGMs*
    - Modellauflösung
    - Ausschnittsgestalt
    - Geographische Ausdehnung
    - Datenstruktur
    - Vertikale Überhöhung
- *Modellierung der topographischen Kartenobjekte*
    - Datenstruktur
    - Modellgeometrie
    - Semantische Attribute
    - Position (im räumlichen Bezugssystem)

Symbolisierungsaspekte

- *Äußere Erscheinung*
    - Form
    - Größe
    - Farbe (Farbton, Sättigung, Farbverlauf)
    - Helligkeit
- *Flächentextur*
    - Oberflächenrauhigkeit
    - Oberflächenmuster
    - Wiederholungsrate des Musters
    - Musterwinkelung (Orientierung)
    - Transparenz
    - Materialeigenschaft
- *Schriftobjekte*
    - Schriftart
    - Schriftgröße
    - Schriftsperrung
    - Schriftorientierung
    - Schriftfarbe
    - Beschriftungstechnik

Visualisierungsaspekte

- *Modellbetrachtung (Innere Kamerageometrie)*
  - Öffnungswinkel
  - Zoom (Vergrößerung)
- *Modellbetrachtung (Äußere Kamerageometrie)*
  - Horizontale Kameraposition
  - Kamerahöhe
  - Position und Höhe von Zielpunkt
  - Betrachtungsrichtung (horizontal)
  - Betrachtungsdistanz
  - Betrachtungswinkel
  - Kamerabewegung
- *Beleuchtung*
  - Lichtart
  - Lichtposition
  - Lichtgeometrie
  - Lichtintensität
  - Lichtfarbe
- *Schattierung*
  - Schattierungsmodelle
  - Schattenart
- *Atmosphärische Effekte*
  - Dunst
  - Reflexionen
  - Himmelsstruktur (Himmelsfarbe, Bewölkungstyp, Bewölkungsfarbe)

(HÄBERLING 2004)

Als gewissermaßen über diesen Gestaltungsaspekten stehend, wird der *Grad der Generalisierung* der Karte definiert. Dieser sollte bereits vor der Erfassung festgelegt werden, da er auf die gesamte Prozesskette Einfluss nimmt. Gemeinhin kann die Generalisierung in Erfassungsgeneralisierung, Modellierungsgeneralisierung und kartographische Generalisierung unterteilt werden und tritt somit an mehreren Stellen der Prozesskette auf. (HAKE & GRÜNREICH 1994) Der Grad der Generalisierung stellt also eine globale Gestaltungsvariable dar, die von „sehr hoch“ bis „sehr niedrig“ reichen kann. Ein hoher Grad an Generalisierung zeichnet sich durch eine starke Selektion der abgebildeten Kartenobjekte und einen niedrigen Detaillierungsgrad aus. Es werden nur die für den Kartenzweck wichtigsten Objekte erfasst, oder zumindest bei der Modellierung berücksichtigt. Geometrische Formen sind stark vereinfacht, Farben sind schlicht und Texturen, falls vorhanden uniform. Ein sehr niedriger Grad der Generalisierung auf der anderen Seite entspräche einer photorealistischen Abbildung.

4 Designimplikationen für 3D Indoor Karten

Nachdem nun die Gestaltungsvariablen und eine Prozesskette für die Herstellung von 3D Karten festgelegt wurden, müssen nun mithilfe der theoretischen Grundlagen aus Kapitel 2, Rückschlüsse auf das Design einer konkreten Karte gezogen werden. Bevor damit begonnen werden kann, muss bestimmt werden, was der Zweck und das Zielpublikum der Karte sein soll. Außerdem müssen Überlegungen angestellt werden, auf was für Ausgabegeräten und in welchen Situationen die Karte konsultiert werden soll. (HÄBERLING ET AL. 2008) Da diese Arbeit auch die Erfassung und Digitalisierung der Daten umfasst und auf Replizierbarkeit im Rahmen von VGI abzielt, müssen auch Angaben zu den Anforderungen an die potentiellen Ersteller gemacht werden. Schließlich müssen noch die Besonderheiten des abgebildeten Raums berücksichtigt werden. Diese Punkte werden wie folgt festgelegt:

- Der Zweck der Karte ist die Wegfindung und Navigation sowie die schnelle Vermittlung von konfiguralem Wissen in allen drei Dimensionen.
- Das Zielpublikum sind erwachsene Menschen, ohne spezielle Expertise im Kartenlesen.
- Die Erfassung und Digitalisierung der Daten soll für durchschnittlich erfahrene, aktive Mitglieder der OSM – Mapper genannt – ohne spezielles Gerät durchführbar sein.
- Die Karten sollen für digitale Displays ab einer Mindestgröße von fünf Zoll aufbereitet werden. Die optimale Größe liegt allerdings etwas darüber bei sieben bis zehn Zoll, den üblichen Bildschirmgrößen von Tabletcomputern.
- Die Karte soll für Einsätze an belebten Orten in der Öffentlichkeit optimiert werden. Das heißt, einer lauten und hektischen Umgebung, in der der Nutzer oft nur wenig Zeit und Kapazitäten hat, sich mit der Karte auseinander zu setzen.
- Der abgebildete Raum stellt eine vertikal segmentierte und vollständig unterirdisch gelegene Indoor Umgebung dar. Sie ist von relativ weitläufigen, frei begehbaren Flächen geprägt und die einzelnen Etagen sind zueinander oft horizontal verschoben, liegen also nicht zwangsweise direkt übereinander.

Die erste Gestaltungsvariable, die festgelegt werden muss ist der Grad der Generalisierung. Er ist stark abhängig von den sechs, oben angeführten Punkten und muss bei allen Prozessschritten der Kartenerstellung berücksichtigt werden.

4.1 Grad der Generalisierung

In der jüngeren Literatur finden sich einige Arbeiten, die sich mit dem Grad der Generalisierung – oft auch Abstraktionsgrad genannt – von Navigationskarten, sowohl in 3D als auch in 2D auseinandergesetzt haben. Oft geschah dies im Rahmen von Studien, die unterschiedlich stark generalisierte Navigationskarten an Probanden testeten. Dabei gelten

für die Fußgängernavigation ganz andere Voraussetzungen, als für die Navigation mit einem Fahrzeug. Wie bereits in der Einleitung angesprochen, haben Fußgänger eine wesentlich höhere Bewegungsfreiheit als Fahrzeuge, die an das vorhandene Straßennetz mit seiner strengen Reglementierung gebunden sind. Daraus folgt, dass Fußgänger stärker auf Landmarken zur Orientierung, zur Markierung von Entscheidungspunkten und zur Bestätigung der Route angewiesen sind. Dies hat entscheidende Auswirkungen auf die Selektion der darzustellenden Kartenobjekte.

KLIPPEL (2003) führte die zwei Begriffe *visuelle Komplexität* (engl. „visual complexity") und *kognitive Komplexität* (engl. „cognitive complexity") ein, um sich der Frage nach dem Grad der Generalisierung anzunähern. Visuell komplexe Karten werden auch als überladen bezeichnet und erschweren durch die Menge und den Detailreichtum der dargestellten Objekte die Extraktion von Informationen. Die kognitive Komplexität bezieht sich auf das Problem, das mithilfe der Karte gelöst werden soll. Er empfiehlt den Inhalt einer Karte auf ein Minimum zu reduzieren, sobald der Verwendungszweck der Karte definiert ist. (KLIPPEL 2003) Im Falle von Navigationskarten ist die Wegfindung das zu lösende Problem. Daraus ergibt sich die Frage, wieviel Information man zur Lösung dieses Problems benötigt und wie einfach sich diese extrahieren lässt.

Ältere Untersuchungen, die sich aus kartographischer Perspektive der visuellen Komplexität von Karten gewidmet haben, unterstützen die Behauptung, dass die Informationen einer Karte so einfach und verständlich wie möglich dargestellt werden sollten. (DOBSON 1980; KAPLAN ET AL. 1974; PHILLIPS 1979; TAYLOR & HOPKIN 1975; THORNDYKE 1981; TUFTE 1997)

GARTNER & RADOCZKY (2005) stützten sich auf diese Erkenntnisse, als sie eine Studie vorlegten, in der sie untersuchten wie stark eine Navigationskarte für Fußgänger schematisiert werden kann, ohne dass die Probanden von der abgebildeten Route abkommen. Sie orientierten sich in ihrem Design am Prinzip vieler Linienpläne des öffentlichen Verkehrs, in denen lineare Elemente soweit abstrahiert werden, dass nur mehr ihre Funktion nicht aber ihre Position abgeleitet werden kann. Sie bezeichnen diese als graphische Repräsentationen von Topologien und gehen davon aus, dass sie Fällen, in denen die Bewegungsfreiheit limitiert ist, ausreichen würden, um einer Route erfolgreich zu folgen. Gibt es einen hohen Grad an Bewegungsfreiheit, müssen dementsprechend mehr Details in die Karte integriert werden. (RADOCZKY & GARTNER 2005)

In der Einleitung wurde die Arbeit von OULASVIRTA ET AL. (2009) erwähnt, welche die Eignung mobiler 2D Karten mit photorealistischen 3D Karten aus egozentristischer Perspektive für die Lösung von Wegfindungsaufgaben vergleicht und zu dem Ergebnis kommt, dass Probanden diese wesentlich schneller und besser mit 2D Karten lösen konnten. Sie führten dies neben anderen Faktoren, die im Laufe dieses Kapitels noch angesprochen werden, auf den Detailreichtum von photorealistischen Abbildungen zurück, die die unmittelbare Extraktion von relevanten Informationen erschweren. (OULASVIRTA ET AL. 2009) SEMMO (2016) beschäftigte sich näher mit photorealistischen Design in 3D Karten. Er führt eine Reihe an Punkten auf, die für eine klare Empfehlung von generalisierten, nicht-photorealistischen 3D Karten sprechen:

- Photorealistische Visualisierungen verursachen eine hohe kognitive Beanspruchung, da sie durch Texturdetails und Schatten überladen wirken. Dies beeinflusst die Leistung des Nutzers speziell bei der Navigation signifikant.
- Unrealistische Elemente einer Karte, wie thematische Inhalte oder Symbole können nicht optimal integriert werden, da Fassaden-, Dächer- oder Straßentexturen großflächig eingesetzt werden.
- 3D Modelle haben nicht dieselbe Detailtreue, wie ihre Texturen. Unabhängig von der Erfassungsmethode, enthalten 3D Modelle immer Ungenauigkeiten, Unvollständigkeiten oder Fehler, die zu Inkonsistenzen führen, wenn sie mit Photographien in Texturform drapiert werden.
- Der unregelmäßige Maßstab perspektivischer Darstellungen führt dazu, dass Objekte in der Ferne kleiner erscheinen, was in Kombination mit der photorealistischen Textur zu Bildrauschen führen kann.
- Photorealistische Darstellungen benötigen einen hohen geometrischen und graphischen Detaillierungsgrad, um überzeugend zu wirken. Dies führt zu großen Datenmengen, die eine hohe Speicherbandbreite voraussetzen, speziell, wenn sie von einem Server prozessiert werden. Abstrahierte Geometrien und Graphiken lassen sich besser komprimieren.

(SEMMO 2016)

Auch MENG (2005) streicht die Wichtigkeit eines reduzierten und intuitiven Kartendesigns für Wegfindungsaufgaben hervor. Da Navigationssysteme und ihre Karten meist auf kleinen Displays zum Einsatz kommen, sollte mit den dargestellten Symbolen und Elementen sehr selektiv umgegangen werden, damit die Karte nicht überladen und unübersichtlich wirkt. Ebenso muss beachtet werden, dass Zeit oft ein kritischer Faktor beim Lösen von Wegfindungsaufgaben ist, sich die Umgebung ständig ändert und Nutzer eine volatile Gefühlslage aufweisen. Diese Faktoren erfordern es, dass die Aufmerksamkeit des Nutzers augenblicklich auf die relevante Information gelenkt werden muss und diese mühelos verstanden werden kann. Für Navigationskarten gilt das alte Postulat des „Kartenlesens als mühevoller Prozess der erlernt gehört“, demnach nicht mehr. (MENG 2005)

Wie in Abschnitt 2.3 bereits ausgeführt sind Landmarken der bei weitem wichtigste Referenzpunkt für die Orientierung und das Erkennen von Entscheidungspunkten. Außerdem übernehmen sie eine wichtige Funktion, indem sie Nutzern bestätigen, dass diese sich auf der richtigen Route befinden. Landmarken sollten bei der Selektion der Kartenobjekte also nicht zu kurz kommen. MAY ET AL. (2003) empfehlen den Einsatz von Landmarken als die primäre Methode der Wegbeschreibung. Wann immer möglich sollen sie Distanzangaben oder Straßennamen vorgezogen werden. Wenn die Landmarken einen sichtbaren Namen haben (beispielsweise ein Geschäft oder ein Restaurant), soll dieser, anstelle der generellen Kategorie in der Karte aufscheinen. Besitzt sie ein wohlbekanntes Logo, soll dieses ebenfalls integriert werden. (MAY ET AL. 2003)

ELIAS ET AL. (2005) beschäftigten sich mit der Darstellung von Landmarken in mobilen Karten. Sie teilten Landmarken in fünf Kategorien: Geschäfte mit einem bekannten

Namen, Geschäfte nach Typ, Gebäude mit einem spezifischen Namen oder Funktion und Gebäude mit einem charakteristischen, visuellen Aspekt. Sie entwickelten außerdem jeweils sechs Visualisierungen, die die einzelnen Landmarken mit steigendem Abstraktionsgrad darstellen: Bild, Zeichnung, Skizze, Zeichen, Symbol und Wort (Abb. 17). Daraus kann eine Design Matrix mit Empfehlungen unterschiedlicher Abstraktionsgrade für unterschiedliche Landmarken abgeleitet werden. (ELIAS ET AL. 2005)

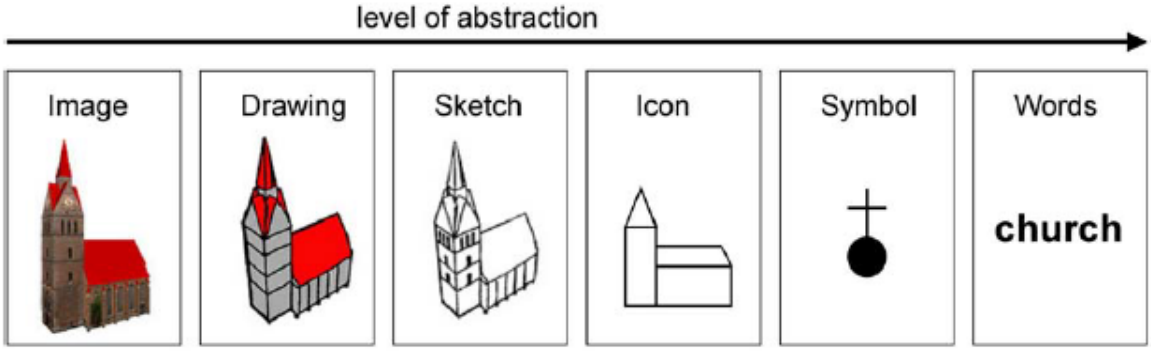


Abb. 17: Sechs Abstraktionsgrade für die Darstellung einer Kirche (ELIAS ET AL. 2005)

	Bild	Zeichnung	Skizze	Zeichen	Symbol	Wort
Geschäft (Name)			(+)	+		
Geschäft (Typ)				+	+	+
Funktion/Name	+	+	+			+
Visueller Aspekt	+	+				

Tab. 2: Design Vorschläge für Landmarken (ELIAS ES AL. 2005)

Für die Visualisierung von POIs kommen typischerweise Symbole zum Einsatz. Hier unterscheiden ELIAS ET AL. (2005) zwischen bildhaften und geometrischen Design. Der Wiedererkennungswert von bildhaften Symbolen ist wesentlich höher, als der von geometrischen Abbildungen (ARNBERGER 1966; MACEACHREN 1995), da erstere kaum interpretiert werden müssen. Sie müssen lediglich mit den Objekten in der Realität abgeglichen werden. Dabei sollte der Detailierungsgrad allerdings nicht zu hoch sein. Logos bekannter Marken fallen in die Kategorie bildhafter Symbole und sollten, so sie allgemein bekannt sind, als solche dargestellte werden. (ELIAS ET AL. 2005)

Indoor Umgebungen stellen wiederrum eigene Anforderungen an die Auswahl der Landmarken. Einerseits kann nicht, wie außerhalb von Gebäuden auf Straßennamen zurückgegriffen werden, wodurch Landmarken weiter an Bedeutung gewinnen, andererseits ist die Bewegungsfreiheit eingeschränkter, wodurch auch eine abstraktere Darstellung möglich wird. Allerdings mangelt es innerhalb von Gebäuden, insbesondere in den weitestgehend standardisierten U-Bahn-Stationen, oder Bahnhöfen auch oft an Landmarken. Den POIs, in Form von Geschäften, Imbissständen oder

Stationseinrichtungen (Toiletten, Wachzimmer, Ticket- und Informationsschalter) kommt dadurch eine hohe Bedeutung zu. Ebenso seien nochmal die vertikalen Transitionselemente aus Abschnitt 2.6 erwähnt. Diese sind einerseits in ihrer Funktion als Landmarken, andererseits als Übergänge zwischen den einzelnen Etagen des Bauwerks und damit für die Navigation von großer Bedeutung. Auch kleinere Einrichtungen, wie Automaten (z.B. für Fahrkarten, Getränke, Snacks oder Bargeld), Schließfächer, Sitzgelegenheiten, Telefonzellen, Mülleimern, Erste-Hilfe-Einrichtungen oder Aushangvitrinen können Referenzpunkte für die Wegfindung darstellen.

Bevor nun der Grad der Generalisierung und seine konkreten Ausprägungen für die vorliegende Arbeit ermittelt werden kann, müssen noch die elementaren Operationen, deren sich die Generalisierung bedient, identifiziert werden:

- Die *Selektion* der abzubildenden Kartenobjekte, schafft Platz für die wichtigen Elemente der Karte und ist vom Kartenzweck abhängig.
- Objekte und Strukturen werden *vereinfacht*, damit sie auch bei kleinen Maßstäben noch dargestellt werden können.
- Mehrere gleichartige Objekte werden *zusammengefasst*, um Platz zu schaffen und die Übersichtlichkeit zu wahren.
- Durch die *Klassifizierung* werden Objekte in Kategorien zusammengefasst. So können Charakteristiken prägnant dargestellt und der Objektschlüssel begrenzt werden.
- Durch verschiedene Techniken, wie Freistellung oder Fettdruck aber auch assoziativer Einfärbung ist die *Bewertungen* von Kartenobjekten möglich. Sie dient der Betonung oder Hervorhebung eines Objekts.
- Die *Vergrößerung* gewisser Elemente ist notwendig, um die Lesbarkeit der Karte zu gewährleisten.
- Das führt oft zur *Verdrängung* benachbarter Objekte, deren Position dann nicht mehr dem geometrisch richtigen Ort entspricht.

(HAKE & GRÜNREICH 1994)

Da sich diese Generalisierungsoperationen auf die gesamte Prozesskette der Kartenerstellung verteilen, wird ihr Ausmaß im Zuge der Festlegung der Gestaltungsvariablen an den entsprechenden Stellen diskutiert. Im Folgenden werden die einzelnen Gestaltungsaspekte und -variablen Punkt für Punkt herangezogen und ihre spezifische Ausprägung mithilfe der behandelten Literatur festgelegt. Nicht alle Gestaltungsvariablen sind im selben Ausmaß relevant für diese Arbeit. Um den strukturellen Aufbau der Arbeit nicht zu beeinträchtigen, werden Variablen, die in wenigen Sätzen abgehandelt werden können in übergeordneten Abschnitten zusammengefasst. Die erste hier diskutierte Gestaltungsvariable betrifft die Objektselektion als Aspekt des Erfassungsausmaßes. Diese ist bereits maßgeblich durch den Grad der Generalisierung bestimmt.

4.2 Selektion der Kartenobjekte

Die *Selektion* richtet sich einerseits nach den theoretischen Erkenntnissen aus Kapitel 2, insbesondere zu der Funktion von Landmarken. Andererseits nach der gängigen Praxis in der OSM, die in Kapitel 5 aufgegriffen wird. Für die vorliegende Arbeit werden folgende Objekte bei der Selektion berücksichtigt:

- Flächen
  - Verteilerebenen (große Flächen, die Zugang zu POIs und vertikalen Transitionselementen bieten)
  - Korridore
  - Bahnsteige
  - Treppenpodeste bei danach erfolgender Richtungsänderung der Treppe
  - Aufzugsflächen
  - Flächenhafte POIs (Geschäfte, Imbissstände und Restaurants, flächenhafte Stationseinrichtungen)
  - Aussparungen für Transitionselemente in begehbaren Flächen
  - Flächen mit bestimmter Funktion (z.B. Parkebenen)
- Linien
  - Treppen
  - Rolltreppen
  - Rampen
  - Wände
  - Geländer
  - Gleise
  - Fußwege
- Punkte
  - Fahrscheinautomaten
  - Bankautomaten
  - Schließfächer
  - Mülleimer
  - Erste-Hilfe-Einrichtungen
  - Telephonzellen
  - Informationstafeln
  - Zugänge

Die elementarsten Bestandteile einer Indoor Karte sind die begehbaren Flächen. Deshalb werden alle öffentlich zugänglichen Flächen innerhalb des untersuchten Stationsgebäudes erfasst, solange sie die Dimensionen eines Aufzuges (also etwa 4m²) nicht unterschreiten. Transitionselemente werden (bis auf Aufzüge) linear erfasst und digitalisiert, da dies dem gängigen Schema der OSM entspricht (siehe Kapitel 5). Erst später bei der 3D Modellierung werden sie zu flächenhaften Objekten umgerechnet.

Gleise spielen eine wichtige Rolle, beim schnellen Erkennen der Abfahrtsbereiche und können für erfahrene Nutzer auch einen Hinweis auf den globalen Referenzrahmen und die

Orientierung des unterirdischen Bauwerks liefern. Geländer kommen an Galerien oder an Aussparungen innerhalb von begehbaren Flächen zum Einsatz, wenn beispielsweise ein Transitionselement mitten im Raum platziert ist. Wände werden erfasst, da nicht allen Flächen automatisch eine sie vollständig umgebende Wand zugewiesen werden kann. Bahnsteigkanten oder auch Zugänge zu Transitionselementen wären davon beispielsweise ausgenommen. Sie werden in der Visualisierung allerdings nur angedeutet, da sie sonst die Sicht auf andere Elemente zu sehr beeinträchtigen würden. Fußwege werden digitalisiert, aber in der Modellierung, Symbolisierung und Visualisierung nicht mehr berücksichtigt. Dies hat den Grund da zahlreiche Routing Applikationen auf OSM Daten zugreifen, aber noch kein Flächenrouting (siehe Einleitung) implementiert haben. Um das Routing innerhalb der Gebäude trotzdem gewährleisten zu könne, werden behelfsmäßig Fußwege digitalisiert, die in den OSM Routinggraphen integriert werden können.

Die Selektion der punkthaften Daten orientierte sich primär an ihrer Eignung als Landmarken beziehungsweise ihrer Funktion für den Öffentlichen Verkehr. Durch sie ist außerdem sicherzustellen, dass das Zwei-Punkte Prinzip (Abschnitt 2.2) von DARKEN & SIBERT (1996) eingehalten wird. Referenzpunkte müssen also in einer ausreichenden Menge integriert werden, um unabhängig von der eigenen Position den Abgleich von zwei Objekte der Realität mit ihren Entsprechungen in der Karte zu ermöglichen.

Fahrscheinautomaten werden erfasst, da ihre Position eine wichtige Information für alle Reisenden darstellt, die kein, über einen längeren Zeitraum gültiges Ticket besitzen. Auch Bankomaten und Schließfächer haben es, ob ihrer wichtigen Funktion in Bahnhofsgebäuden in diese Liste geschafft. Erste-Hilfe-Einrichtungen wie Defibrillatoren oder auch Feuerlöscher stellen nicht nur für den Ernstfall wichtige Gegenstände dar, sondern sind oft auch weithin sichtbar und gut markiert, was sie zu potentiellen Landmarken macht. Mülleimer und Informationstafeln wurden schließlich gewählt, da sie sich in einer Umgebung, in der es an anderen Anhaltspunkten mangelt gleichmäßig und in regelmäßigen Abständen über das gesamte Bauwerk verteilen und den Nutzer über die Richtigkeit seiner Route versichern können. Beide werden jedoch nur dort angezeigt, wo sich keine wichtigeren POIs befinden. Auch Zugänge werden erfasst. Durch sie kann auf Straßennamen Bezug genommen werden, da sie oft durch sie benannt werden. Dadurch kann eine Referenz zu der Umgebung außerhalb des Bauwerks geschaffen werden.

4.3 Genauigkeit der Datenerfassung

Diese Gestaltungsvariable wird ebenfalls zu einem großen Teil vom Grad der Generalisierung bestimmt. Insbesondere die Generalisierungsoperationen der Vereinfachung und in einem geringeren Ausmaß die Zusammenfassung kommen hier zum Tragen. Erstere betrifft alle bei der Erfassung berücksichtigten Objekte. Linien und Punkte sind per Definition bereits generalisiert, da sie als eindimensionale Objekte in der Realität nicht vorkommen. Alle Transitionselemente außer den Aufzügen werden als Linien erfasst. Weiterführende Informationen, auf die im Zuge der Digitalisierung, Modellierung, Symbolisierung und Visualisierung zurückgegriffen wird, werden als numerische oder

semantische Attribute und in Form von Planzeichen (Signaturen für großmaßstäbige Pläne) auf einer Skizze erfasst. Einige lineare Elemente sind auch von einer Zusammenfassung betroffen. So wird nicht für jede Schiene eine Linie angelegt, sondern nur eine entlang der Mittelachse der Gleise. Treppen, die durch ein Podest unterbrochen sind, danach aber nicht ihre Richtung ändern, werden als einheitliche Linie durchgezogen.

Objekte, die eine Flächengröße von etwa 4m² unterschreiten werden als Punkte erfasst. Ihre semantische Bedeutung wird dem Planzeichen entnommen. Alle punkthaften Objekte sind also von Vereinfachung und oft auch Zusammenfassung betroffen. Befinden sich mehrere Fahrscheinautomaten, Bankautomaten, Schließfächer oder Informationstafeln nebeneinander werden sie auf einen Punkt aggregiert. Ebenso verhält es sich bei Zugängen, die nah beisammen liegen. Oft ist dies der Fall, wenn sowohl ein Treppenabgang, als auch ein Aufzug zu einer unterirdischen Verteilerebene führen. In diesem Fall werden beide Zugänge zusammengefasst, obwohl sie unterschiedliche Attribute (z.B. bezüglich Barrierefreiheit) haben.

Flächenhafte Elemente müssen nicht zwangsweise von einer Vereinfachung betroffen sein. HÖLSCHER ET AL. (2006) und CARLSON ET AL. (2010) weisen auf die Bedeutung struktureller Feinheiten und architektonischer Variationen für den Wiedererkennungswert von Orten im Inneren von Gebäuden hin. Aus Mangel an Landmarken wird die Wandstruktur oder die Form der Etagenfläche selbst zum Referenzpunkt. (CARLSON ET AL. 2010; HÖLSCHER ET AL. 2006) Daher wäre es nicht sinnvoll die Form dieser Elemente zu sehr zu vereinfachen. Feinheiten, Variationen und Einzigartigkeiten von Wandformen und anderen kleinräumigen Gebäudeelementen sollten unbedingt erhalten bleiben.

Die *geometrische Genauigkeit* dieser Objekte ist folglich eher von dem Gestaltungsaspekt Erfassungstechnik abhängig, der in Abschnitt 4.5 diskutiert wird. Grundsätzlich wird im Rahmen dieser Arbeit darauf abgezielt, geometrische Strukturen, deren zweidimensionale Ausdehnung auf der X- und Y-Achse 50 Zentimeter nicht unterschreiten, bei der Erfassung zu berücksichtigen. Diese Genauigkeitsanforderungen gelten nicht für die Erfassung flächenhafter POIs. Erstens ist die Vermessung des Inneren einer Geschäftsfläche aus diversen Gründen schwierig und meist ohne Genehmigung gar nicht durchführbar, zweitens ist für den Zweck der Karte nur die, in Richtung Verteilerebene oder Korridor orientierte Geschäftsfront, im Sinne einer Landmarke relevant. Die Erfassungstechnik ist auch der einzige Aspekt, der die *topologische und topographische Genauigkeit* beeinträchtigen sollte. Auch hier wird auf höchstmögliche Präzession im Rahmen der angewandten Technik abgezielt.

4.4 Erfasste Attribute

Die erfassten *Attribute* (in der OSM und hier in weiterer Folge *Tags* genannt) richten sich einerseits nach den Anforderungen diverser Applikationen wie Webmaps, Routingsoftware oder sonstigen Auskunftssystemen, die auf OSM Daten zugreifen, andererseits nach den spezifischen Anforderungen, welche die Durchführung dieser Arbeit

an die Daten stellt. Obwohl das Tagging (Attribuierung) von Geometrien in der OSM theoretisch frei wählbar ist, haben sich weitreichende Konventionen etabliert, die im OSM Wiki (OPENSTREETMAP WIKI A) dokumentiert werden. Wer sich dazu entschließt Daten im Rahmen der OSM zu erfassen, sollte diese Konventionen unbedingt berücksichtigen und eigene Applikationen an etablierte Schemata anpassen. Details zum Tagging der Daten folgen im fünften Kapitel.

Hier ist es wichtig festzuhalten, dass die Differenzierung nach Tags, neben der geometrischen Erscheinung der Daten, die Grundlage für Visualisierung und alle vorangegangenen und weiterführenden Schritte der Datenprozessierung darstellen. Auch die Definition sinnvoller Objektschlüssel zur Identifikation spezifischer Daten muss bei der Erfassung der Attribute mitbedacht werden. Die Generalisierungsoperation der Klassifizierung stellt eines der Grundprinzipien des Taggings dar. Sie kommt bei allen Elementen zum Tragen, besonders markant ist sie allerdings bei den Geschäftsflächen ausgeprägt. Hier wird bei der Erfassung noch zwischen einer Vielzahl unterschiedlicher Geschäftstypen, oder Restaurantarten unterschieden. Bei der Visualisierung wird diese breite Differenzierung durch vier Klassen in Form von Geschäft, Gastronomie, Toilettenanlagen oder Stationseinrichtung ersetzt.

Bei den Meisten der erfassten Attribute handelt es sich um Nominaldaten, die beispielsweise Linienelemente nach Treppe und Rolltreppe differenzieren. Diese werden später in der Arbeit noch genauer behandelt. Auch das Tagging Schema und andere technische Aspekte werden hier nicht berücksichtigt. An dieser Stelle sollen lediglich vier Tags angeführt werden, die eine außerordentliche Bedeutung für diese Arbeit haben:

- Alle Objekte innerhalb von Gebäuden werden mit dem Tag *indoor* versehen. Dieser Tag hat unterschiedliche Ausprägungen. Es wird beispielsweise zwischen den relativ „offenen“ Verteilerebenen (*indoor=corridor*) und den geschlossenen Geschäftsflächen (*indoor=room*) unterschieden. Der Tag dient im Wesentlichen zur Gruppierung und Abgrenzung von Indoor Elementen, damit diese nicht in herkömmlichen Karten visualisiert werden.
- Jedes Element, das Teil der U-Bahn-Station ist, erhält einen *level*-Tag. Darin wird numerisch die Etage spezifiziert. Dies ist für die 3D Modellierung von außerordentlicher Wichtigkeit, wie später noch gezeigt werden wird. Neben ganzen Zahlen sind hier auch Dezimalangaben möglich. Diese kommen beispielsweise bei Treppenpodesten zum Einsatz. Handelt es sich um ein vertikales Transitionselement, erhält es die Werte beider Etagen, die es miteinander verbindet. An erster Stelle steht der Wert der unteren Etage. Ein Semikolon trennt ihn vom Wert der oberen Etage.
- Treppen erhalten den numerischen Tag *step_count.* Darin enthalten ist die Anzahl an Stufen, aus welcher die Treppe zusammensetzt und die damit der jeweiligen Linie zugeordnet werden. Jede Höhenangabe, die im Zuge der 3D Modellierung berechnet wird, stützt sich auf diesen Tag und das zugrundeliegende DGM.
- Da alle Transitionselemente außer Aufzügen als Linien erfasst werden, bekommen sie außerdem den *width* Tag. Darin wird die Breite der Treppe,

Rolltreppe oder Rampe spezifiziert. Für die 3D Modellierung der Transitionselemente muss auf diesen Tag zurückgegriffen werden.

4.5 Erfassungstechnik

Die Primärerfassung erfolgt *nicht maßstabsgetreu*, da das *analoge Erfassungsmedium* bei größeren Erfassungsgebieten an seine Grenzen stößt. Zum Einsatz kommt dabei ein *karierter A4 Schreibblock, ein Klemmbrett und ein Druckbleistift mit 0,5 Millimeter starker Mine*. Die Form und das Maß des Erfassungsmediums hat zur Folge, dass das erfasste Gebiet oftmals über die Blattränder hinausragen würde, wenn ein konstanter Maßstab angewandt wird. Daher werden Abschnitte, die keine oder nur eine geringe geometrische Variation aufweisen (wie beispielsweise lange Korridore) verkürzt dargestellt. Die Primärerfassung gleicht dadurch mehr einer *Skizze*, als einem Plan. Die erfassten Daten werden erst im Zuge der Digitalisierung georeferenziert. Einerseits stellt dieser Ansatz eine potentielle Fehlerquelle dar, andererseits ermöglicht er aber auch eine Replizierbarkeit durch andere OSM Mapper, die über keine präzisen geodätischen Instrumente, oder mobile Geoinformationssysteme verfügen.

Um ohne einen konstanten Maßstab der Skizze, trotzdem Distanzen ableiten zu können, müssen sie *gemessen* werden. Hier wurde wiederrum auf eine niederschwellige Technik zurückgegriffen, die für jeden potentiellen Mapper anwendbar ist. Für Distanzen wird das *Schrittmaß* herangezogen. Dabei werden Entfernungen durch die Anzahl der Schritte gemessen, die benötigt werden um die gesuchte Distanz abzugehen. Das Schrittmaß muss zuvor bestimmt werden, indem man die benötigte Anzahl der Schritte einer bekannten Distanz zählt und durch diese Längenangabe dividiert. Diese Methode ist einfach, geht schnell vonstatten und liefert Distanzen in einer ausreichenden Genauigkeit für die spätere Digitalisierung. Die Erfahrung hat gezeigt, dass dabei ein maximaler Messfehler von 1 Meter auf 100 Meter auftritt, was verkraftbar für den vorliegenden Anwendungsfall ist.

In einigen Fällen ist es notwendig Winkel zu messen. Beispielsweise dann, wenn ein langer Korridor zwei Verteilerebenen verbindet. Ist der Winkel dieses Korridors zu den Verteilerebenen nicht rechtwinkelig (z.B. $\alpha < 90°$ oder $\alpha > 90°$ und $\alpha < 180°$) und wird lediglich grob geschätzt, kann es zu großen Lagefehlern kommen. Hier bietet sich die Verwendung eines einfachen *Winkelmessgeräts* an (Abb. 18). Es gibt weitere Möglichkeiten, solche Winkel zu messen, aber diese hat sich im Kosten-Nutzen Vergleich als sehr effizient erwiesen. Eine genauere Beschreibung der Messtechnik erfolgt im fünften Kapitel.

Abb. 18: Digitales Winkelmessgerät (EBAY)

Die Qualität der, auf die Erfassung folgenden Digitalisierung beruht nicht nur auf den angefertigten Skizzen und Messwerten. Auch *alternative Kontrollaufnahmen* sind notwendig, um eine ausreichend gute Digitalisierungsgrundlage zu erstellen. Im Rahmen der hier vorgestellten Technik geschieht dies mit herkömmlichen Photographien aus einer egozentristischen Perspektive. Diese sind besonders in Bezug auf die dritte Dimension von Bedeutung, da die Überlagerung der einzelnen Ebenen in den Skizzen nur schwer darstellbar ist. Durch die Photographien können die vertikalen Relationen der einzelnen Objekte bei der Digitalisierung besser nachvollzogen werden. Außerdem können Unklarheiten, die im Zusammenhang mit der Skizze entstehen, oft geklärt werden, ohne dass eine zweite Abklärung vor Ort notwendig wird.

Eine letzte Gestaltungsvariable des Erfassungsaspekts stellt schließlich der *Erfassungsort* dar. Grundsätzlich ist es möglich OSM Daten anhand von, frei zur Verfügung gestellten Luftbildern zu erfassen. In vielen Fällen ist es jedoch notwendig eine Erfassung vor Ort durchzuführen. So auch im Falle von Indoor Umgebungen, die auf Luftbildern nicht einsehbar sind. Luftbilder sind allerdings trotzdem eine wichtige Grundlage für die Digitalisierung der vor Ort erfassten Daten. Sie bieten wichtige Referenzpunkte für die Einpflegung der Daten in ein globales Referenzsystem. Es können anhand von Luftbildern beispielsweise U-Bahn Aufgänge erkannt werden, die als Ausgangspunkt für die Digitalisierung der unterirdischen Indoor Daten herangezogen werden können. Auch lässt sich die Genauigkeit der eigenen Messungen anhand zweier solcher Aufgänge überprüfen.

4.6 Digitalisierungsaspekte

Es existiert eine Reihe an OSM Editoren. Standardmäßig wird der iD Editor angeboten, der direkt im Browser läuft und auf openstreetmap.org verlinkt ist. Ein weiterer Online Editor ist Potlatch 2. iD und Potlatch werden speziell für Einsteiger entwickelt und bieten vielfältige Unterstützung beim Editieren. Wer komplexere Mapping Projekte durchführt, oder diverse Shortcuts zum schnelleren Editieren nutzen will, kann den Desktop Client JOSM (Java OpenStreetMap) nutzen. JOSM ist eine fortgeschrittene, quelloffene Digitalisierungssoftware, die viele Editierfunktionen eines vollwertigen GIS umfasst. Darüber hinaus stehen dem Nutzer eine Vielzahl an Plug-Ins (Erweiterungen) zur Verfügung, die Unterstützung für spezielle Anwendungen bieten. Auch die große Zahl an Tastenkombinationen für schnelleres Editieren seien hervorgehoben, da diese die Arbeit mit OSM Daten enorm erleichtern. JOSM ist demnach der Editor, der auch für diese Arbeit eingesetzt wird. (OPENSTREETMAP WIKI B)

Wie bereits angesprochen bietet JOSM die Möglichkeit Luftbilder als Digitalisierungsgrundlage einzublenden. Für diese muss allerdings eine Erlaubnis vorliegen. Bing (Microsoft) hat 2010 die Erlaubnis gegeben, seine Satellitenbilder für das Nachzeichnen (Tracing) in der OSM zu verwenden. Die Daten liegen in unterschiedlicher Auflösung vor, sind aber für den gesamten Planeten verfügbar. Lokal gibt es oft noch weitere Luftbildquellen, da Vermessungsämter ihre Luftbilder im Rahmen von Open

Government Data (OGD) zur Verfügung stellen. In Österreich beispielsweise kann man sich hochauflösende Luftbilder von basemap.at (BASEMAP) einblenden lassen. Während beide Dienste für Wien eine *Auflösung von 20 Zentimeter* anbieten, sind die Fotos von *basemap.at in der Regel aktueller*. (OPENSTREETMAP WIKI C)

Auch wenn die unterirdischen Strukturen einer U-Bahn-Station auf den Luftbildern nicht erkenntlich sind, stellen die Fotos trotzdem eine große Hilfe bei der Digitalisierung der erfassten Daten dar. Wie bereits erwähnt, wird es durch sie möglich einen *Bezug zum übergeordneten Raum* herzustellen. Da die, bei der Erfassung angefertigte Skizze in der Regel *nicht nach Norden hin orientiert ist*, sondern so ausgerichtet wird, dass sie optimal auf das A4 Zeichenblatt passt, bilden die Luftbilder auch die Basis für die Umorientierung der erfassten Daten. Der Beste Anhaltspunkt dafür sind die auf den Bildern erkenntlichen Tunnelaufgänge (Abb. 19). Unterstützend kommen neben den Luftbildern noch die eigenen, bei der Datenerfassung *aus der Perspektivansicht geschossenen Fotos* hinzu, die wichtige Hinweise auf die vertikale Relation der Kartenobjekte liefert. Das Projektionssystem, in dem die Daten schließlich digitalisiert werden, ist die für die meisten Webmaps (GOOGLEMAPS; BINGMAPS) verwendete Web Mercator Projektion (EPSG:3857). Die Rohdaten in der OSM liegen im WGS84 (EPSG:4326) vor (EPSG: European Petroleum Survey Group Geodesy).

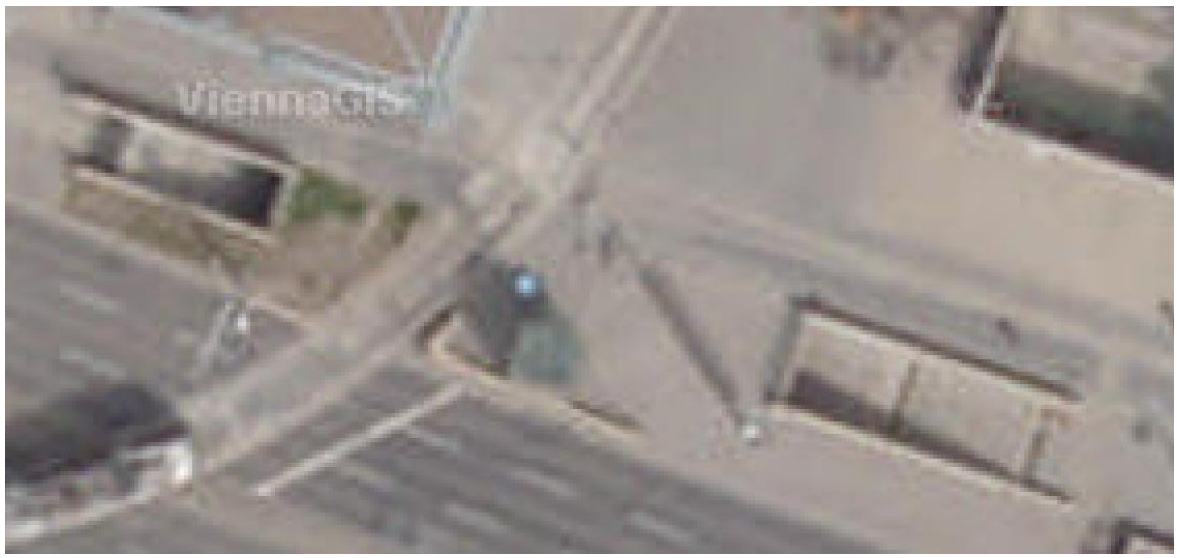


Abb. 19: Zwei auf dem Luftbild erkennbare Abgänge am Karlsplatz, Wien (BASEMAP)

Neben dem herkömmlichen Linienwerkzeug, mit dem man durch eine Linie verbundene Punkte setzten kann, bietet JOSM auch die Möglichkeit Kreise, Kreiskurven und Bézierkurven zu zeichnen. Darüber hinaus gibt es Tastenkürzel um Linien miteinander zu verbinden, Aufzutrennen, Punkte aus Linien zu lösen oder rechtwinkelig zu verschieben. Formen können orthogonal ausgerichtet werden, durch Tastenkombinationen kann symmetrisch oder rechtwinkelig zu anderen Linien gezeichnet werden und vieles mehr (Abb. 20). Gerade beim Editieren von Bauwerken sind diese *Orthogonalisierungs-operationen* enorm hilfreich. Sie ermöglichen ein schnelleres und saubereres Arbeiten, da Gebäude häufig orthogonal ausgerichtet sind.

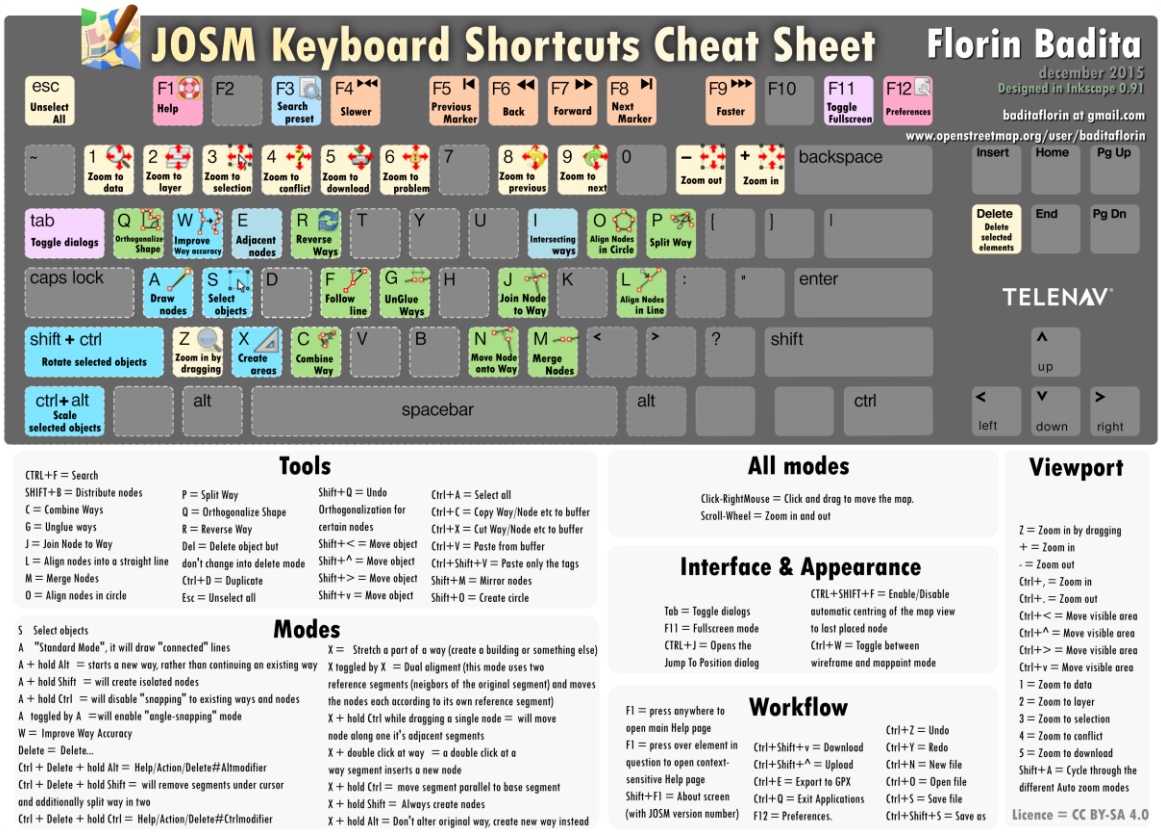


Abb. 20: Übersicht der Tastenkürzel für JOSM (OPENSTREETMAP WIKI D)

Ein weiterer Aspekt, der sauberes Arbeiten erleichtert, sind Optionen, um *topologisch korrekt* zu arbeiten. Diese Funktionen werden als *Snapping* bezeichnet und beschreiben die Möglichkeit Punkte oder Linien an existierenden Objekten auszurichten. Diese teilen sich in weiterer Folge einen oder mehrere Punkte, mit den exakt gleichen Koordinaten. Je nach Einstellung springen neu gesetzte Punkte auf die nächstgelegene Line. Gerade beim Arbeiten mit Wegenetzten, die anderen Anwendungen als Routinggraph dienen sollen ist es von großer Wichtigkeit topologisch korrekt zu arbeiten. Unterläuft einem in dieser Hinsicht ein Fehler bietet JOSM die Möglichkeit einer *automatischen Validierung* bevor der neu erstellte Datensatz in die OSM hochgeladen wird. Diese Validierungsfunktion warnt Mapper vor möglichen Fehlern, wie zum Beispiel übereinanderliegende Punkte, die aus topologischer Sicht verdächtig erscheinen.

Ein letzter Punkt, der JOSM zum Editor der Wahl macht, ist besonders für das Indoor Mapping relevant. JOSM bietet die Möglichkeit sogenannte Filter zu definieren. Diese bestehen aus einem Attribut–Wert (Tag–Value) Paar und können beliebige Ausprägungen annehmen. So kann ein Filter definiert werden, der beispielsweise alle Parkanlagen ausblendet, indem man das Tag–Value Paar „leisure=park“ nutzt. Eine besondere Schwierigkeit beim Indoor Mapping ist die Datenmenge, die sich auf kleinsten Raum konzentriert. Durch mehrere sich überlagernde Etagen entsteht ein Durcheinander an Vektoren, das ohne Hilfsmittel kaum mehr zu durchblicken ist (Abb. 21). Durch den Einsatz von Filtern, lassen sich Regeln erstellen, die es erlauben jeweils nur eine einzelne Etage zu betrachten (z.B. durch das Tag–Value Paar „level=-1“), oder gewisse Elemente

auszublenden. Filter lassen sich mit „AND“ und „OR“ Argumenten beliebig kombinieren und stellen somit eine Voraussetzung für ein sauberes und effizientes Indoor Mapping dar.

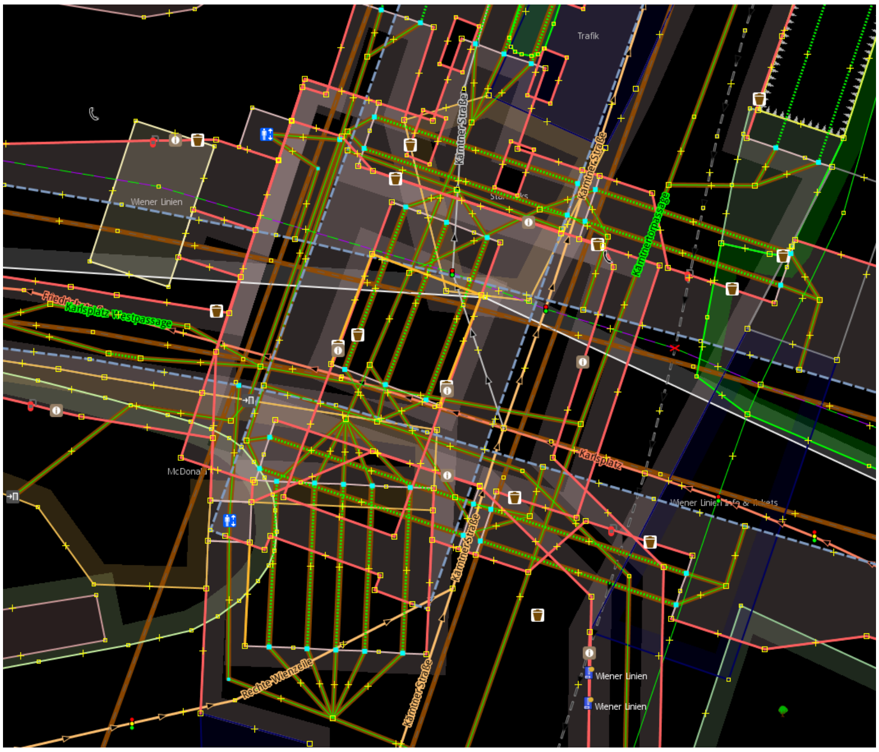


Abb. 21: Ungefilterte OSM Rohdaten, wie sie in JOSM erscheinen. Fünf unterirdische Etagen und die Oberfläche an der Kreuzung Friedrichstraße / Kärntner Straße

4.7 Modellierung des DGMs und der Z-Achse

Grundlage für jede 3D Karte ist das DGM. Meist werden Daten direkt am DGM aufliegend dargestellt. Dies können beispielsweise Raster (Luftbilder, gescannte topographische Karten) sein, die als Textur über das DGM „gezogen“ (drapiert) werden. (HÄBERLING 2004) Oft handelt es sich auch um die Grundrisse von Gebäuden in einem Vektorformat, die auf der Modelloberfläche aufliegen und extrudiert werden. Die Höhe wird dabei meist aus einem Attribut ausgelesen. Im Falle einer Indoor Karte einer unterirdischen U-Bahn-Station, wird das DGM als Referenz herangezogen, um die absoluten Höhen der einzelnen Etagenflächen und ihrer Objekte zu berechnen. Das DGM dient in diesem Fall nicht direkt der Visualisierung, sondern der Ableitung von Höhenwerten für die Indoor Elemente. Da es unter Umständen selbst gar nicht mehr im fertigen Kartenprodukt enthalten ist, *spielt seine Ausschnittsgestalt keine große Rolle* für die Visualisierung. Allerdings ist darauf zu achten, die Größe des Ausschnitts möglichst klein zu halten, um den Rechenaufwand zu minimieren. In jedem Fall, muss die *Ausdehnung des DGMs unabhängig von seiner Form (Rechteck, Kreis, Unregelmäßiger Ausschnitt) alle erfassten Objekte überdecken*, da jede Höheninformation primär aus ihm gewonnen wird.

Ein DGM kann unterschiedliche *Datenstrukturen* aufweisen. Erhältlich ist es zumeist als Graustufenbild. Das ist ein Raster, dessen Zellen jeweils einen Wert zugeordnet bekommen, der die Höhe repräsentiert. Typischerweise wird jedem dieser Werte eine Graustufe zugewiesen. Daneben sind noch die traditionellen, analogen Modelle zu erwähnen, in denen das Gelände durch Höhenlinien, Geländeschraffen, Schummerung, Knotenpunkte oder Profillinien repräsentiert wird. Für diverse Analysemethoden wird auch oft ein unregelmäßiges Dreiecksgitter (TIN: Triangulated Irregular Network) als Vektorvermaschung herangezogen. (HÄBERLING 2004) In dieser Arbeit wird mit einem *Graustufenbild im GeoTIFF-Format* (Geographic Tagged Image File Format) gearbeitet. Dieses kann, im Rahmen von OGD kostenlos, von der Wiener Stadtvermessung (MA 41) in einer *Auflösung von 1 Meter pro Zelle* bezogen werden. (WIENER STADTVERMESSUNG A) Da für die weitere Prozessierung auf die Python Bibliothek „ArcPy" zugegriffen werden muss, wird das DGM ins ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.) Grid-Format konvertiert. Außerdem muss es vom österreichischen Landeskoordinatensystem Gauß-Krüger M34 (EPSG:31256), in welchem alle amtlichen Geodaten Österreichs vorliegen, nach Web Mercator (EPSG:3857) umprojiziert werden.

Auch der Höhenbezug des DGMs muss manipuliert werden. Da sich alle Höhen auf das Wiener Null beziehen und dieses wiederrum 156,68 Meter über dem Meeresspiegel der Adria bei Triest liegt, muss diese Konstante dem Wert jeder einzelnen Zelle aufaddiert werden. Die weiteren Prozessierungsschritte zur Erstellung des 3D Modells aus der zweidimensionalen Datengrundlage wurden für diese Arbeit voll automatisiert. Im Folgenden werden die einzelnen Gestaltungsvariablen diskutiert. Eine nähere Auseinandersetzung mit dem Python Skript, das für die Modellierung geschrieben wurde, folgt im sechsten Kapitel.

Die Modellauflösung von 1 Meter hat sich bewährt, da manchmal recht kleinräumige Niveauunterschiede für die korrekte Ableitung von Etagenhöhen aus DGM und Stufenanzahl Voraussetzung sind. Grundsätzlich lassen sich auch mit einem gröberen DGM herzeigbare Resultate erzielen, allerdings auf Kosten der geometrischen Exaktheit der Höhenangaben. In Nürnberg (Hauptbahnhof) beispielsweise wurde die Methode an einem, mit 50 Meter auflösenden DGM angewandt und rein optisch machte das daraus resultierende 3D Modell einen realistischen Eindruck. Wenn möglich allerdings, ist es sinnvoll ein hochauflösendes DGM heranzuziehen.

Generalisierungsoperationen im Sinne einer Vereinfachung kommen in Bezug auf das DGM folglich nicht zum Tragen. Allerdings treten in Zusammenhang mit der Z-Achse, die durch das DGM referenziert wird, erstmals die Generalisierungsoperationen der Vergrößerung und Verdrängung auf. Grundsätzlich haben diese Operationen bei Indoor Karten eine untergeordnete Bedeutung, da meist ausreichen Platz zur Verfügung steht und der Maßstab relativ groß ist. Bei der Darstellung von Objekten entlang der Z-Achse ist es jedoch oft sinnvoll sie anzuwenden. Die Z-Achse unterliegt oft einer anderen Skalierung, als die beiden anderen Achsen. In diversen Modellierungsprogrammen wird oft von *vertikaler Überhöhung* (engl. „vertical exaggeration") gesprochen. Interessanterweise deckt sich diese Darstellungsform mit der asymmetrischen Verarbeitung der dritten

Dimension in unseren kognitiven Karten. Sie dient der Hervorhebung der Geländecharakteristik und der Betonung der vertikalen Ausdehnung, die in Relation zu den beiden horizontalen Achsen oft sehr gering ausfällt. Bereits die berühmten Panoramamaler Berann, Imhof oder Hölzel beschrieben diese Technik und machten von ihr Gebrauch. (HÄBERLING 2004)

Im Falle der perspektivischen Schrägsicht auf eine mehrschichtigen Indoor Umgebung besteht außerdem das Problem, dass sich die einzelnen Etagen überlappen und den Blick auf die Elemente der Ebenen verdecken (mehr dazu in Abschnitt 4.12). Wird die Z-Achse in solchen Fällen „auseinandergezogen" kann eine bessere Sicht auf die einzelnen Etagen gewährleistet werden. In diesem Sinne kann die Verzerrung der Z-Achse, als Vergrößerung und Verdrängung und damit als Teil der Generalisierung begriffen werden. Die vertikale Überhöhung sollte allerdings den Faktor Zwei nicht überschreiten, da sonst die vertikalen Transitionselemente unrealistisch steil erscheinen.

4.8 Modellierung der topographischen Kartenobjekte

Im Zuge der 3D Modellierung (für den genauen Ablauf siehe Kapitel 6) durchläuft die *Datenstruktur* eine Reihe von Transformationen. Mithilfe der Overpass API (Application Programming Interface) (OVERPASS TURBO) können die Daten zunächst aus der OSM importiert werden. Zu diesem Zeitpunkt liegen die Daten im *GeoJSON*-Format vor (Geographic JavaScript Object Notation). Dabei handelt es sich um ein offenes Format für Geodaten. Es unterstützt die Geometrietypen Point, Linestring, Polygon, MultiPoint, Multilinestring und Multipolygon. Enthält das geometrische Objekt zusätzliche Attribute, wird von einem Feature Objekt gesprochen. Mehrere Features können zu einer FeatureCollection zusammengefasst werden. (GEOJSON) Mithilfe einer Abfrage (Query), in der applikationseigenen Sprache, können alle relevanten Daten durch Overpass Turbo als FeatureCollection in eine GeoJSON-Datei geschrieben werden.

Um mithilfe des Skripts weiter prozessiert werden zu können, müssen die GeoJSON Daten in das ESRI *Shape*-Format konvertiert werden. Dies kann mithilfe der Open Source Software QGIS bewerkstelligt werden. Danach werden die Daten an das Python Skript übergeben, welches sie nach ihren unterschiedlichen Attributen und der Etagenzahl aufgespalten. Sobald die Höhenwerte aller Objekte ermittelt sind, werden die Daten um eine Z-Koordinate erweitert und so zu 3D Features gemacht.

Auch Modellgeometrien werden zum Teil verändert. Dies betrifft alle linienhaften Geometrien, die aufgrund ihrer Eindimensionalität in der 3D Karte nur schwer dargestellt werden können. Treppen werden anhand ihrer Stufenanzahl aufgespalten. Ähnlich wird bei Rolltreppen vorgegangen. Da hier bei der Erfassung keine eindeutige Stufenanzahl ermittelt werden kann, wird die standardisierte Stufenlänge von 40 Zentimetern herangezogen und durch die Länge der Linie dividiert. Der daraus resultierende Wert wird als Stufenanzahl in das dafür vorgesehene Attribut geschrieben. Wie die Treppengeometrie wird auch die Linie der Rolltreppe dann anhand dieser Zahl aufgespalten. Um die dadurch

entstehenden Liniensegmente wird ein Buffer berechnet, der den Wert des „width“ Tags als Parameter heranzieht. Dadurch entsteht für jede Stufe ein eigenes Polygon, dem in weiterer Folge ein interpolierter Höhenwert zugeordnet werden kann. Die Geometrie der vertikalen Transitionselemente entspricht durch diese Vorgehensweise den Genauigkeitsanforderungen, die bei der Datenerfassung definiert wurden.

Wände erhalten einen Buffer von 20 Zentimetern (40 Zentimeter Gesamtbreite) und Geländer werden mit 10 Zentimetern „gebuffert“. Die Gleise behalten zunächst ihre stark abstrahierte Form und werden etwas breiter mit einem Buffer von 1 Meter (2 Meter Gesamtbreite) dargestellt. Auch die Polygone der flächenhaften POIs werden mit 40 Zentimetern gebuffert. Die so entstandene Geometrie wird durch die originalen POI Flächen ausgestanzt, sodass rund um sie Wände entstehen. Rampen kommen im Testgebiet nicht vor und die Fußwege werden in dieser Arbeit noch nicht berücksichtigt, da das Kartendesign und nicht die Routingfunktionalität im Forschungsinteresse steht. Somit werden in der 3D Modellierung alle relevanten Linien zu Polygonen umgewandelt, wodurch Punkte und Flächen die einzigen im 3D Modell verbleibenden Geometrietypen darstellen. Nach Durchlauf des Skripts liegen die Daten folgendermaßen vor (Abb. 22):

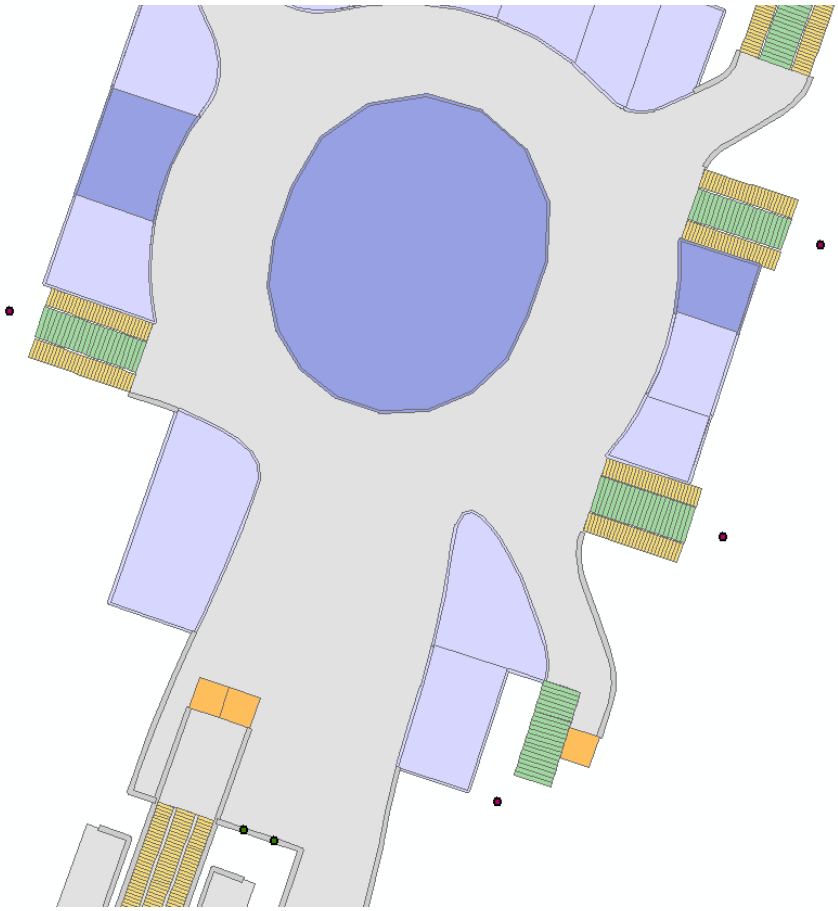


Abb. 22: 2D Ausschnitt der U-Bahn-Station Karlsplatz nach der 3D Modellierung

Bei der späteren Symbolisierung und Visualisierung wird ganz wesentlich auf die *semantischen Attribute* zurückgegriffen. Bei der Modellierung muss also darauf geachtet werden, dass diese erhalten beziehungsweise angepasst werden. In erster Linie müssen die

unterschiedlichen Objekte attributiv differenziert werden können. Insbesondere muss zwischen begehbaren Flächen (Verteilerebenen, Korridore, Treppenpodeste), Aufzugsflächen, flächenhaften POIs und Bahnsteigen unterschieden werden. Innerhalb der POIs wird zwischen Geschäft, Imbiss/Restaurant und Stationseinrichtung differenziert. Auch werden die Namen der POIs berücksichtigt.

Bei punkthaften POIs wird zwischen Fahrscheinautomat, Bankautomat, Schließfächern, Mülleimer, Informationstafeln, Telephonzellen, Erste-Hilfe-Einrichtung und Zugängen unterschieden. Zugänge enthalten außerdem einen Namen, falls dieser real angegeben ist und Informationen zu den angeschlossenen Verkehrsmitteln. Lineare Elemente teilen sich in Treppen, Rolltreppen, Rampen, Wände, Geländer und Gleise. Hier sind vor allem die bereits erwähnten (Roll-)Treppen-Attribute, welche Stufenanzahl und Stufenbreite enthalten, relevant.

Für alle modellierten Objekte gilt außerdem, dass die Etagenangabe erhalten bleiben muss. Transitionselemente enthalten mindestens zwei Werte in diesem Attribut. Handelt es sich um Aufzüge, die mehrere Ebenen miteinander verbinden, erhalten sie für jede Etage einen, durch Semikolon getrennten Wert. Im Zuge der Modellierung werden Höhenwerte berechnet, die jedem Objekt in einer eigenen Attributspalte zugewiesen und schließlich als Z-Koordinate in die Geometrie integriert werden. Die Ermittlung dieser Höhenwerte wird mithilfe von Höhenpunkten erreicht. Diese werden aus den vorhandenen Objekten extrahiert und dienen als primäre Bezugspunkte für die Höhenwerte aller anderen Objekte. Höhenpunkte werden jeweils aus allen Zugangspunkten sowie den Punkten am unteren und oberen Ende einer (Roll-)Treppe berechnet. Sie erhalten ihre Höhenwerte direkt aus der Zelle des DGMs, die sie umschließt. Eine detaillierte Beschreibung des folgenden Prozesses zur Berechnung und Übertragung der Höhenwerte folgt im sechsten Kapitel.

4.9 Symbolisierungsaspekte der äußeren Erscheinung

Den nächsten Schritt in der Prozesskette bildet die Symbolisierung. Hier wird die äußere Gestalt der Kartenobjekte primär durch die graphischen Variablen nach BERTIN (1974) festgelegt. Für jedes Objekt oder Objektklasse wird ein geeignetes Symbol entworfen, das für den späteren Visualisierungsprozess bereitgestellt wird. Bei der Symbolisierung kommen, abgesehen vom Grad der Generalisierung, noch keine globalen Gestaltungsvariablen zum Einsatz. Die hier getroffenen Entscheidungen betreffen jeweils nur das einzelne Objekt. Erst im Zuge der Visualisierung, wird die definitive Erscheinung der Kartenobjekte durch die Festlegung von globalen Gestaltungsaspekten, wie Beleuchtung, Schattierung oder atmosphärische Effekte festgelegt. (HÄBERLING 2004)

Die Gestaltungsvariablen *Form* und *Größe* werden im Falle von flächenhaften Objekten durch Extrusion definiert. Die 3D Elemente erhalten neben ihrer Höhe in Bezug auf das DGM einen Extrusionswert, der ihnen eine volumetrische Erscheinung gibt. Die Extrusion der Daten kann mit unterschiedlichen Programmen durchgeführt werden. In dieser Arbeit wurde hauptsächlich mit dem QGIS Plug-In „qgis2threejs“ gearbeitet. Aber auch

ArcScene von ESRI bietet sich an, um eine schnelle Symbolisierung durchzuführen (siehe auch Abschnitt 7.2).

Die Extrusion beträgt bei den begehbaren Flächen und den einzelnen Stufenelementen 30 Zentimeter. Die Aufzugsflächen werden als einfache Quader dargestellt, wobei ihre vertikale Ausdehnung über alle bedienenden Etagen reicht. Auf Höhe der obersten Etage werden noch 2,8 Meter aufaddiert, um den tatsächlichen Einstiegsbereich zu kennzeichnen. Wände, Geländer und Flächenhafte POIs werden nur minimal mit 0,7 Meter extrudiert. Dies reicht aus, um den Eindruck eines geschlossenen Raumes entsteht zu lassen, ohne dass die Sicht auf die Objekte dahinter allzu sehr verdeckt wird. Es bleibt bis zuletzt ein Streitpunkt, ob Wände überhaupt dargestellt werden sollen. Einerseits engen sie die Sicht auf andere Elemente ein, andererseits spielen sie beim Nutzer für die kognitive Verknüpfung von Karte und Realität eine wichtige Rolle, wie Hölscher et al. (2006) bemerkten. Ihre Form ist eine wichtige räumliche Referenz, in einer ansonsten an Landmarken kargen Indoor Umgebung. Auch der Eindruck des geschlossenen Raumes wird durch Wände zumindest ansatzweise vermittelt. Schlussendlich dienen die Wände auch zur Abgrenzung von Flächen wie den Bahnsteigen, die zumindest auf der Einstiegsseite tatsächlich über keine direkt angrenzende Wand verfügen. Aus diesen Gründen werden die Wände für diese Arbeit dargestellt. Es bedarf allerdings weiterer Untersuchungen, ob dies tatsächlich zielführen ist (Abb. 23).

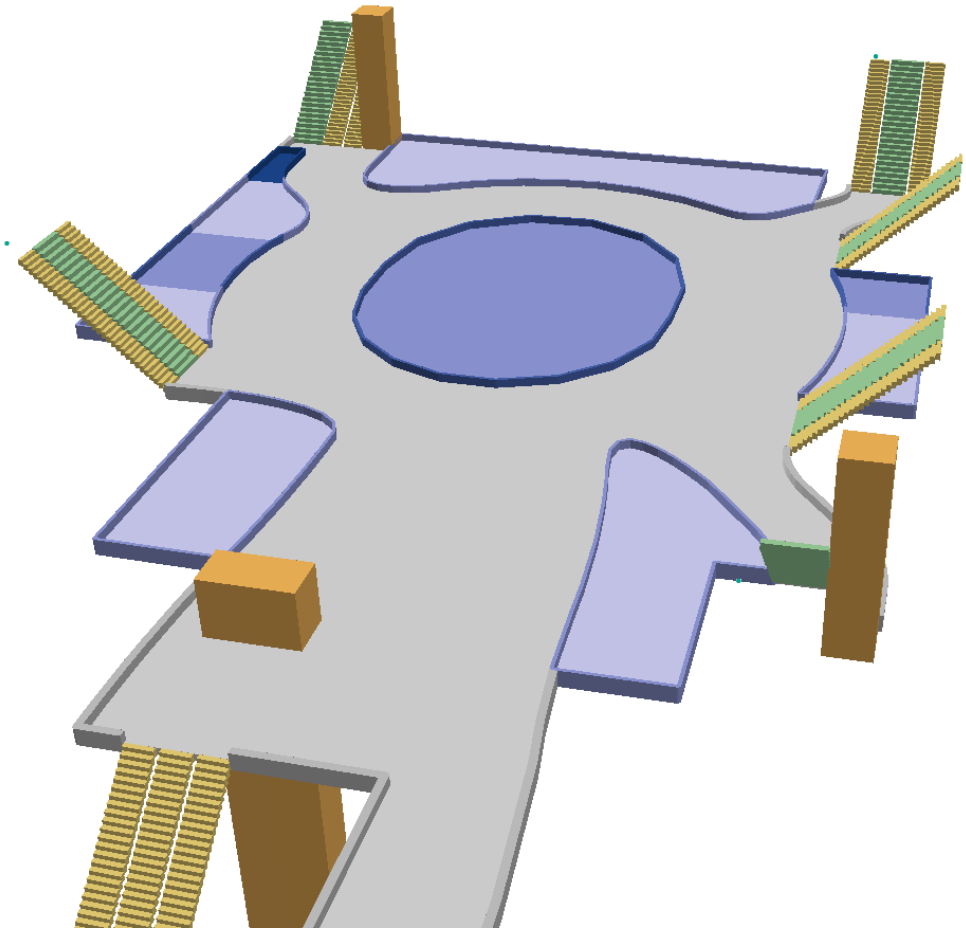


Abb. 23: Perspektivische Ansicht eines Modellausschnitts nach der Extrusion in ArcScene

Bei all diesen Formen handelt es sich um primitive geometrische Bausteine, die im Zusammenspiel die schnelle Extraktion relevanter Informationen ermöglichen sollen. Es werden also nur elementare Informationen über Formen von Wänden und begehbaren Flächen, sowie den Transitionselementen gegeben. Außerdem werden flächenhafte POIs als volumetrische Körper ihrer Form entsprechend dargestellt. Dieser Aspekt der Symbolisierung flächenhafter POIs und ihrer Wände bildet eine Grundlage, die aber noch um Landmarken in Form der punkthaften POIs ergänzt werden sollte. Um die schnelle kognitive Verknüpfung von Objekten der Realität und ihrer Entsprechung in der 3D Karte weiter zu unterstützen, sollen deshalb die punkthaften Geometrien als volumetrische 3D Symbole nach dem bildhaften Prinzip dargestellt werden. (HÄBERLING ET AL. 2008)

Darüber hinaus erhalten Geschäftsflächen zusätzlich zu ihrem volumetrischen Körper ein solches 3D Symbol (siehe auch Abschnitt 7.1). Diese Arbeit folgt dabei den Empfehlungen von MAY ET AL. (2003) und ELIAS ET AL. (2005), die im Abschnitt 4.1 erörtert wurden. Während den fünf punkthaften POIs, sowie flächenhaften Stationseinrichtungen wie Toiletten oder Informationsschaltern ein allgemeines assoziatives 3D Symbol zugewiesen wird, wird bei flächenhaften POIs zwischen den Kategorien von Elias et al. unterschieden. So werden bekannte Geschäfts-, Imbiss-, oder Restaurantketten durch ihr Logo repräsentiert. Besitzen sie kein bekanntes Logo, kann ihr Name angegeben werden. Allerdings sollen beide Methoden nur nach Bedarf und Möglichkeit angewandt werden. Das heißt, bei mehreren nebeneinanderliegenden Landmarken, soll nur eine durch ein Symbol repräsentiert werden. Priorität haben jene Landmarken, die sich an Entscheidungspunkten im Gebäude befinden.

Logos und Schriftzüge müssen je nach Bedarf erstellt werden. Handelt es sich allerdings um ein standardisiertes 3D Symbol für einen POI oder eine flächenhafte Stationseinrichtung, wird dieses im Zuge der Symbolisierung nur einmal entworfen und den Objekten gemäß ihrer Objektart zugewiesen. Für die Erstellung der 3D Symbole kann auf 3D Software wie „Blender“ zurückgegriffen werden. Für die vorliegende Arbeit wurde in erster Linie das Programm „Cinema 4D“ verwendet. Bei der Erstellung wird auf bekannte, assoziative und „sprechende“ Symbole zurückgegriffen, die im Sinne des bildhaften Prinzips schnell interpretiert werden können. (ARNBERGER 1966; MAY ET AL. 2003; ELIAS ET AL. 2005) Die für diese Arbeit entworfenen Symbole orientieren sich am Design des „Wiener U-Bahn Würfels“ (Abb. 24). Dieser markiert jeden U-Bahn Eingang in Wien und ist fester Bestandteil des Stadtbildes. Sein großer Vorteil ist, dass sich die Symbole auf den vier senkrechten Seiten des Würfels abbilden lassen und so aus jeder Richtung erkenntlich sind. Neben dem Würfeln, der die verhältnismäßig wichtigeren flächenhaften POIs repräsentieren soll, werden Pyramiden eingesetzt, um die punkthaften POIs abzubilden. Dadurch kann auf den ersten Blick eine qualitative Unterscheidung getroffen werden. Die Grundgeometrie der beiden Körper werden übernommen und mit entsprechenden, bildhaften Symbolen für die einzelnen POIs versehen (Abb. 25). Die bildhaften Symbole auf den Pyramiden, die ausschließlich Infrastrukturen der Stationseinrichtung darstellen, werden direkt von den Wiener Linien übernommen. Diese stellen ihre Piktogramme im Rahmen von OGD frei zur Verfügung (OPENGOVERNMENTDATA).

Die Größe aller Symbole muss so gewählt werden, dass sie sowohl im Vordergrund als auch im Hintergrund klar identifiziert werden können. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass sich die Symbole nicht allzu sehr gegenseitig überdecken oder die Sicht auf benachbarte Objekte einschränken. (HÄBERLING ET AL. 2008) Die Position dieser Symbole soll sich allgemein an den Eingängen zu den jeweiligen Geschäftsflächen beziehungsweise den Standorten der punkthaften POIs orientieren. Allerdings werden sie manuell so verschoben, dass sie obige Kriterien erfüllen.

Abb. 24: Der Wiener U-Bahn Würfel (WIEN.AT)

Abb. 25: 3D Symbole für punkt- und flächenhafte POIs in Cinema 4D

Die *Farbe* der Objekte ist eines der wichtigsten Unterscheidungsmerkmale und dient vor allem der Differenzierung nach qualitativen Kriterien. Gemäß etablierten Konventionen der Kartographie, die beispielsweise bei EDUARD IMHOF (1972) nachzulesen sind, ist es zu vermeiden, kräftige oder grell leuchtende Farben unvermittelt und großflächig nebeneinander zu stellen. Auf Basis von gedämpften Grundtönen, können sie bei sparsamer Dosierung aber eine große Wirkung entfalten. Somit spielt die Farbgebung und ihre *Helligkeit* für die siebente und letzte Generalisierungsoperation, der Bewertung eine

große Rolle. Sie stellt eine der Möglichkeiten dar, die Aufmerksamkeit des Kartennutzers auf gewisse Elemente zu lenken. Bevor über die konkrete Farbgebung entschieden werden kann, ist es sinnvoll sich Gedanken über die Priorität der einzelnen Elemente zu machen und eine Rangfolge zu entwickeln. In diese Überlegungen muss allerdings auch die Ausdehnung der Elemente miteinbezogen und abgewogen werden. Großflächige Elemente müssen von Haus aus mit dezenteren und helleren Farben repräsentiert werden, da sie sonst die farbharmonische Wirkung beeinträchtigen. (GROSSER & SCHOPPMEYER 2001) Die Priorität mit Rücksicht auf die flächenhafte Ausdehnung der Kartenelemente wird wie folgt mit abfallender Bedeutung festgelegt:

a) Punkthafte POIs
b) Vertikale Transitionselemente
c) Gleise und Bahnsteigkanten
d) Toiletten
e) Stationseinrichtungen
f) Gastronomiebetriebe
g) Geschäfte
h) Wände
i) Etagenflächen
j) Hintergrund

Für diese Arbeit werden demnach die großen begehbaren Flächen der Verteilergeschoße in einem hellen Grau dargestellt. Da die Etagenflächen den, mit Abstand größten Raum des Kartenbildes einnehmen, bietet sich grau als eine unaufdringliche, beliebig kombinierbare (Nicht-)Farbe an. Die an die Ebenen angrenzenden Wände werden mit einem geringfügig dunkleren Grau versehen. Flächenhafte POIs werden in vier Klassen unterteilt. Es wird zwischen Flächen mit gastronomischer Funktion und Geschäften unterschieden. Des Weiteren bilden Toilettenanlagen und Einrichtungen der Verkehrsgesellschaft, wie die Stationsüberwachung, Ticket- oder Informationsschalter eine eigene Klasse. Diese Flächen werden mit abgestuften Blautönen dargestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass Flächen die tendenziell mehr Platz einnehmen und öfter vorkommen, hellere Farbtöne erhalten. Am Hellsten werden demnach Geschäfte dargestellt, gefolgt von Gastronomiebetrieben, Stationseinrichtungen und Toiletten, mit dem dunkelsten Blauton.

Nachdem im zweiten Kapitel dargestellt wurde, dass der vertikale Raum im menschlichen Verstand einer ordinalen Skalierung unterliegt, erscheint es sinnvoll, diese Differenzierung auch farblich zu unterstreichen. Wie in den meisten U-Bahnsystemen verfügt auch die Wiener U-Bahn über verschiedene Farben, die den einzelnen Linien zugeordnet werden, und die jedem Stadtbewohner geläufig sind. Da im Normalfall in Wien nur eine U-Bahnlinie pro Etage verkehrt, bietet sich dieses Farbsystem einerseits zur Differenzierung der einzelnen Etagen, andererseits zur Identifizierung der jeweiligen U-Bahnlinie an. Da es sich aber durchwegs um kräftige Farben handelt, werden sie nur an den Gleiskörpern und den Seiten der Bahnsteigkanten angebracht, während die horizontale Bahnsteigfläche im Grau der Etagenflächen gehalten wird.

Um die Wichtigkeit und Dynamik der Transitionselemente zu unterstreichen, wurden hier anregende Farben gewählt. Da diese Elemente ebenfalls relativ viel Raum in der Karte einnehmen und in der Prioritätenliste nicht auf ersten Platz liegen, musste darauf geachtet werden, dass sie nicht zu aufdringlich, aber auch nicht zu zurückhaltend erscheinen. Die im Farbkreis benachbarten Farben Grün, Gelb und Orange erfüllen diese Kriterien und harmonieren gut miteinander. Für die Treppen wurde ein helles Grün, für Rolltreppen ein eher blasses Gelb und für die Aufzüge ein helles Orange gewählt. Da Treppen oft in Kombination mit Rolltreppen auftreten, ergibt es durchaus Sinn auf eine Farbe wie Grün zu setzten. Obwohl sie als kalte Farbe visuell eher zurücktritt, erzeugt sie in Kombination mit Gelb durchaus Aufmerksamkeit. Die POIs schließlich, stellen die Objekte mit der höchsten Priorität dar. Einerseits sind sie in ihrer Funktion als Landmarken essentiell für die Orientierung, andererseits erlaubt ihre geringe Ausdehnung eine Akzentuierung durch sehr dominante Farben. Als einzige der drei Grundfarben, die noch nicht verwendet wurde, kommt nun Rot zum Einsatz. Kombiniert wird es mit Weiß oder Schwarz, der Farbe der Symbole. Da der klassische U-Bahn Würfel blau ist, wird auch diese Farbe für einige der 3D Symbole, wie zum Beispiel den Toiletten oder Zugängen verwendet.

Durch diese Kombination der Farben wird auf der theoretischen Basis der Farbenlehre ein harmonischer Gesamteindruck vermittelt, der die Aufmerksamkeit des Nutzers auf die, für die Orientierung relevanten Elemente lenkt. Durch die Akzentuierung der Transitionselemente wird außerdem ein Eindruck über die räumliche Relation der Ebenen zueinander vermittelt. HÄBERLING (2004) nennt zwei weitere Gestaltungsaspekte der Symbolisierung, die hier berücksichtigt werden sollen. Einerseits die Flächentexturen und andererseits Schriftobjekte.

4.10 Oberflächenaspekte der Symbolisierung

Beim Oberflächenmuster eines Objekts geht es um die graphisch-figürliche Struktur, deren Farbabstimmung und Kontraste wie auch, um deren Zusammensetzung und Regelmäßigkeit. Sie umfasst somit eine Kombination der Variablen Form, Größe, Farbe, Helligkeit und Orientierung, und zwar angewandt auf die Gestaltung der Oberfläche der einzelnen Objekte. (HÄBERLING 2004) Daraus gehen eine Reihe an Gestaltungsvariablen hervor, die in weiterer Folge kurz behandelt werden.

Die erste betrifft die Oberflächenrauhigkeit der Kartenobjekte. Diese kann durch verschiedene Schattierungsalgorithmen oder Texturierungsfunktionen beeinflusst werden. Eine erhöhte Oberflächenrauhigkeit kann einen realistischeren Eindruck des abgebildeten Objekts bewirken, ohne die Geometrie zu verändern. Dies kann einerseits durch eine Körnung der Oberfläche geschehen, andererseits durch ein regelmäßiges Muster, das entweder als Textur oder als sogenannte „Bumpmap“ aufgetragen wird. Die Bumpmap ist ein Graustufenbild, welches wie eine Schummerung funktioniert. Es simuliert durch Schrägbeleuchtung aus Nordwest eine Unebenheit und Feinstrukturierung der Oberfläche. (HÄBERLING 2004)

Sie kann dabei helfen die Tiefenwahrnehmung von großen Flächen zu verbessern. Durch ein regelmäßiges Muster, das in der Ferne engmaschiger wird, entsteht im menschlichen Hirn ein Eindruck von Entfernung. In Abbildung 25 sieht man gut, dass der U-Bahn Würfel durch seine geringere Größe weiter entfernt wirkt, als das Symbol für die Fast-Food-Kette „McDonalds“ im Vordergrund. Beim sogenannten *Texturgradienten* wirkt derselbe Mechanismus, der sich hier aber auf ein einzelnes Objekt beschränkt (Abb. 26). Durch die kleiner werdenden Abstände der graphischen Grundelemente eines Musters, kann die Entfernung eines beliebigen Punktes auf einer Oberfläche aus perspektivischer Ansicht eruiert werden. (BARDEL 2001) Gerade für sehr große Flächen kann dieser Effekt wichtig sein, da es unter Umständen an anderen Anhaltspunkten für die Tiefenwahrnehmung mangelt.

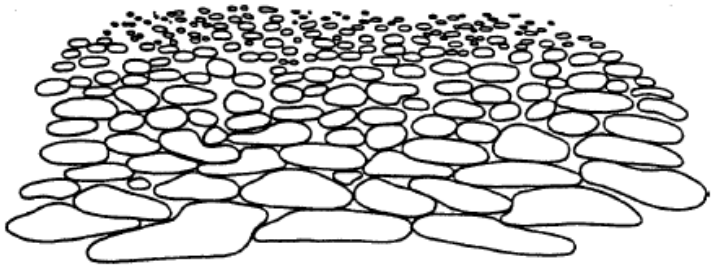


Abb. 26: Der Texturgradient und sein Einfluss auf die Tiefenwahrnehmung (HÄBERLING 2004)

Texturgradienten in Form von Bumpmaps haben aber auch einen weiteren für diese Arbeit relevanten Vorteil. Sie halten Objekte gewissermaßen zusammen und erleichtern die Abgrenzung zu benachbarten Objekten. Der Kognitionspsychologe DAVID REAGAN (2000) behauptet, dass ein Objekt mit einem solchen Texturgradienten schneller wahrgenommen werden kann. Details der Oberfläche kumulieren in einem größeren, kohärenten Ganzen. Diese Tatsache bildet eine bemerkenswerte Ausnahme der, in Abschnitt 4.1 postulierten Devise „weniger ist mehr“. Die Dichte der Details muss allerdings eine gewisse Größe überschreiten, um als Einheit wahrgenommen zu werden und diese Effekte entfalten zu können. (BARDEL 2001; TUFTE 1999)

Für die vorliegende Arbeit werden die begehbaren Flächen der Verteilerebenen, Korridore und Bahnsteige mit einem Gittermuster als Bumpmap unterlegt. Dieses soll Bodenplatten simulieren, die zumindest im ersten Untergeschoß der Station auch tatsächlich vorhanden sind. Die *Wiederholungsrate des Musters* sowie dessen *Orientierung* werden der tatsächlichen Erscheinung nachempfunden. Durch ihr regelmäßiges Muster vermitteln sie einen guten Tiefeneindruck und beleben das ansonsten monotone Grau der weitläufigen Flächen. Dieses erscheint dadurch realistischer und erleichtert zugleich die Extraktion wichtiger Tiefeninformationen. Neben den begehbaren Flächen erhalten auch die Aufzüge eine Bumpmap in Form von vertikalen Strukturlinien. Diese sollen den vertikalen Charakter der Aufzüge betonen und die Aufmerksamkeit auf sie lenken. Grundsätzlich allerdings sollten sich diese Mikrostrukturen dem Nutzer nicht allzu sehr aufdrängen, weshalb sie nur mit einer niederen Intensität wiedergegeben werden. Auf tatsächliche Texturen wird auf Grund der Nähe zum Photorealismus (Abschnitt 4.1) zur Gänze verzichtet.

Die *Transparenz* ist gerade im Indoor Bereich ein immer wieder diskutierter Gestaltungsaspekt. Da es durch die Mehrschichtigkeit zu massiven Verdeckungen kommt, wird immer wieder angedacht, diese Problematik durch transparente Wände oder auch Böden zu entschärfen. LI ET AL. (2016) untersuchten, wie sich die, durch transparente Wände ermöglichte Sichtbarmachung von globalen Landmarken, die sich außerhalb von Gebäuden befinden auf den Aufbau von konfiguralen Wissen und die Entwicklung kognitiver Karten auswirkt. Sie konnten in einer Studie bestätigen, dass Probanden dadurch in der Lage waren mehrschichtige, kognitive Karten zu entwickeln und das signifikant besser, als Probanden, die ohne diese Zusatzinformation auskommen mussten. (LI ET AL. 2016) Das Experiment stand allerdings unter anderen Voraussetzungen als die vorliegende Arbeit. Zum einen handelte es sich um ein Bauwerk über der Erde und zum anderen wurde den Probanden das Gebäude aus einer egozentristischen Perspektive präsentiert, wodurch die Verdeckung durch Wände wesentlich drastischer ausfällt, als im vorliegenden Beispiel. Nachdem die U-Bahn-Station Karlsplatz zur Gänze unter der Erde liegt, ist es auch schwierig Landmarken an der Oberfläche sichtbar zu machen. Außerdem erhöhen transparente Objekte die visuelle Komplexität und den kognitiven Aufwand, der notwendig ist, um Informationen aus der Karte zu extrahieren. (ELMQVIST ET AL. 2007) Aus diesen Gründen wird Transparenz im Rahmen dieser Arbeit zunächst nicht berücksichtigt.

VAARANIEMI ET AL. (2013) lieferten einen weiteren interessanten Ansatz. Sie untersuchten wie, durch Gebäude verdeckte Straßenbeschriftungen in 3D Karten durch verschiedene Techniken sichtbar gemacht werden können. Am effektivsten erwiesen sich dabei zwei Technologien, die auf Transparenzen zurückgreifen. Bei der ersten wird rund um die Straßenbeschriftung, die immer im Vordergrund erscheint, ein transparenter Schein (engl. „halo“) erzeugt, der erkennen lässt auf welches, von Gebäuden verdeckte Objekt sich die Beschriftung bezieht (Abb. 27). Bei der zweiten Methode erscheinen die Beschriftungen ebenfalls im Vordergrund, wobei die gesamte Straße, auf die sich die Beschriftung bezieht, durch die Objekte im Vordergrund durchleuchtet (Abb. 28). Diese Techniken heben sich von der herkömmlichen (auch von Google und anderen Anbietern von Navigationssystemen verwendeten) Methode ab, die Beschriftungen immer im Vordergrund darstellt, ohne einen visuellen Bezug zum Straßenobjekt zu geben. (VAARANIEMI ET AL. 2013)

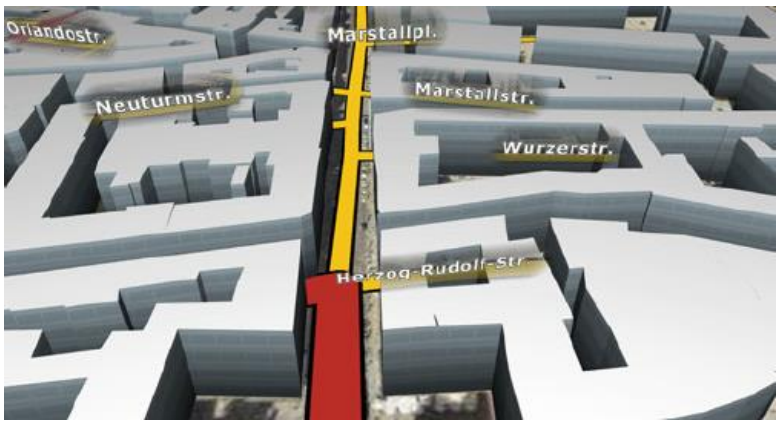


Abb. 27: Beschriftete Objekte werden durch einen transparenten Schein in den Vordergrund gerückt (VAARANIEMI ET AL. 2013)

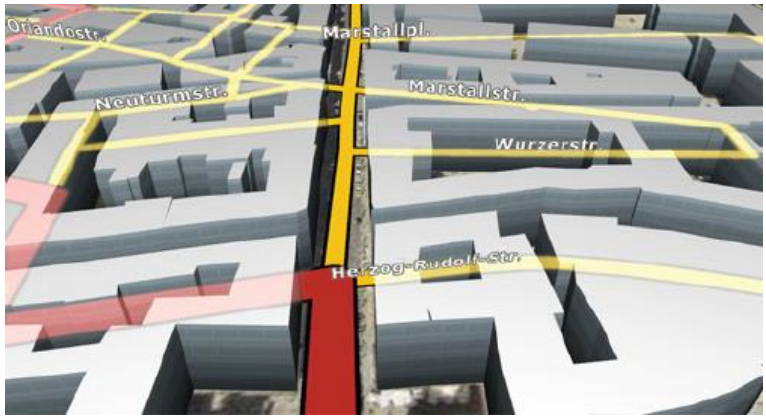


Abb. 28: Straßen leuchten durch die Objekte im Vordergrund durch (VAARANIEMI ET AL. 2013)

Durch einen Nutzbarkeitstest („AttrakDiff questionnaire“) für Probanden und eine Expertenbefragung, wurden die beiden Methoden mit dem herkömmlichen Ansatz verglichen. Beide Methoden konnten sowohl bei Experten, als auch Probanden besser abschneiden. Bei beiden Tests schnitt außerdem die Methode der durchleuchtenden Straßen am besten ab. (VAARANIEMI ET AL. 2013) Gerade für die Sichtbarmachung von Routen durch Gebäude erscheint letztere Methode vielversprechend. Da das Routing und damit die Routenvisualisierung jedoch nicht direkter Bestandteil dieser Arbeit sind, wird der Ansatz zunächst nicht weiterverfolgt. Somit wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit komplett die Gestaltungsvariable Transparenz verzichtet. Allerdings sollte die Methode der durchleuchtenden Straßen für weiterführende Untersuchungen unbedingt in Evidenz gehalten werden.

Eine weitere, in der 3D Kartographie wichtig Gestaltungsvariable betrifft die *Materialeigenschaften*, die den jeweiligen Objekten zugewiesen werden. Durch diese werden reale physikalische Phänomene simuliert, was den Objekten ein realistischeres Aussehen verleiht, aber auch zur Betonung und Hervorhebung dienen kann. Im Wesentlichen wird dadurch definiert, wie Oberflächen auf Lichtquellen und benachbarte Objekte reagieren. Es können Reflexionseigenschaften oder Lichtbrechung definiert werden und damit reale Materialien wie Metall, Glas oder Kunststoff nachempfunden werden. Für die vorliegende Arbeit wird einigen Objekten, wie Böden und Gleisen ein leicht reflektierendes Material zugeordnet werden. (HÄBERLING 2004)

Auf der anderen Seite können Objekten auch eigene Strahlungseigenschaften zugewiesen werden, sodass sie selbst zur Lichtquelle werden. Letztere Methode soll bei den 3D Symbolen in dieser Arbeit zur Anwendung kommen. Da die Wiener U-Bahn Würfel auch in der Realität mit Lichtquellen in ihrem Inneren ausgestattet sind, damit sie in der Nacht erkennbar bleiben, wird dieses Erscheinungsbild auch für die 3D Symbole nachempfunden. Ebenso wird mit den Transitionselementen verfahren, denen ein dezenter Leuchteffekt zugewiesen wird. Damit soll zusätzliche Aufmerksamkeit auf diese Elemente gelenkt werden. Wie in der Realität auch, wird das bereits mit der Bumpmap versehene Material der Etagenflächen das auftreffende Licht reflektieren.

4.11 Symbolisierungsaspekte von Schriftobjekten

Grundsätzlich wird in dieser Arbeit versucht Schrift in der Karte möglichst sparsam einzusetzen. Wann immer ein „sprechendes Symbol“ zur Vermittlung einer Information verwendet werden kann, soll diesem der Vorzug gegenüber der Beschriftung gegeben werden. Dies trifft umso mehr im Falle von Navigationskarten zu, wo die schnelle Extraktion von Informationen ein Grundprinzip darstellt. Beschriftungen sollen nur dort eingesetzt werden, wo die graphische Symbolisierung allein nicht zur Vermittlung einer wichtigen Information ausreicht. Oft ist dies der Fall bei Attributen, wie Namen, numerischen Bezeichnungen oder statistischen Werten. (HÄBERLING 2004) Den Empfehlungen von MAY ET AL. (2003) folgend, werden Beschriftungen dort eingesetzt, wo Landmarken kein bekanntes Logo besitzen, jedoch einen Namen der für die navigierende Person gut einsehbar ist. Außerdem besitzen die Ausgänge einer U-Bahn-Station jeweils einen Namen. Meist sind das Straßennamen oder Namen bekannter Gebäude, zu denen der jeweilige Ausgang führt. Auch diese Namen bieten sich für eine Darstellung durch Schriftobjekte an, da sie eine wichtige Referenz zur äußeren Umgebung liefern.

Bei der Gestaltung der Beschriftung treten eine Reihe von Fragen auf. Die offensichtlichste bezieht sich auf die *Schriftart*. Wie auch bei klassischen Karten gilt, dass sich die Schrift in die Karte fügen muss. Sie darf das Kartenbild nicht dominieren und muss ein ruhiges und unauffälliges Bild abgeben. Daher passen auch in 3D Karten serifenlose Schriftarten grundsätzlich besser, als solche mit Serifen. In der 3D Kartographie muss außerdem darauf geachtet werden, dass Beschriftungen von Objekten, die sich im Hintergrund befinden kleiner ausfallen, als solche, die sich im Vordergrund befinden. Andernfalls würde die perspektivische Tiefenwahrnehmung gestört werden. (HÄBERLING 2004)

Eine grundsätzliche Überlegung, die in diesem Zusammenhang angestellt werden muss, betrifft den Raum der Schriftplatzierung. Soll sich die Beschriftung innerhalb des Modellraums der Karte befinden, also ein eigenes 3D Objekt bilden, oder soll sie nachträglich im zweidimensionalen Raum parallel zum Bildschirms abgebildet werden (Abb. 29)? In ersteren Fall unterliegt sie perspektivischen Verzerrungen und richtet sich an der Orientierung der Objekte, auf die sie sich bezieht aus. Dies erleichtert die Zuordnung zu den referenzierten Objekten, erschwert aber auch ihre Lesbarkeit. Zweidimensionale Beschriftungen, die über dem 3D Modell eingeblendet werden, sind immer zum Kartenbetrachter hin orientiert, können aber weniger gut mit den zu referenzierenden Kartenobjekten verknüpft werden. Ein zusätzlicher Aufwand besteht darin, dass Schriftzüge manuell skaliert werden müssen, um die der Schrägperspektive geschuldeten Größenunterschiede abzubilden. Allerdings kann somit auch verhindert werden, dass sie unleserlich klein oder übertrieben groß erscheinen. POLYS ET AL. (2005), die beide Methoden evaluiert haben, kamen zu dem Schluss, dass die Vorteile der dreidimensionalen Visualisierung von Schriftzügen ihre Nachteile nicht ausgleichen können und empfehlen deshalb die Verwendung von zweidimensionalen Beschriftungen. (VAARANIEMI ET AL. 2013)

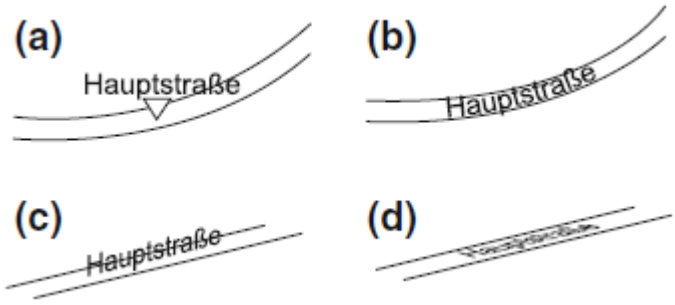


Abb. 29: Externe und interne Methoden der 2D (a und b) und 3D Beschriftung (c und d) (VAARANIEMI ET AL. 2013)

Für die vorliegende Arbeit wird ein Ansatz gewählt, der Vorteile aus beiden Methoden zu vereinen versucht. Die Beschriftungen sollen zwar Teil der 3D Szene sein, allerdings immer zur Kamera hin orientiert sein. Moderne 3D Software erlaubt derartige Effekte mit ein paar wenigen Klicks. Ausserdem kann die *Schriftgröße* je nach Entfehrnung unterschiedlich skaliert werden. Dies erlaubt es Mindest- und Maximalgrößen zu definieren. Für die *Farbe der Schrift* wurde Schwarz mit weisser Umrandung gewählt. Diese ist sowohl vor den eher blassen Flächenfarben der Karte als auch vor dem braunen Hintergrund gut lesbar. Darüber hinaus sollen keine speziellen Effekte angewandt werden. Moderne Anwendungen erlauben auch die interaktive Anzeige von Beschriftungen beim Überfahren mit dem Cursor oder das Erscheinen einer Infobox beim Anklicken. Diese Techniken sind grundsätzlich empfehlenswert, allerdings setzten sie ein semantisches 3D Modell voraus, das im Rahmen dieser Arbeit nicht entwickelt wird. In einer weiterführenden Implementierung können Zusatzinformationen jedoch beispielsweise beim Anklicken von POIs angezeigt werden.

4.12 Visualisierungsaspekte der Kamera

In der 3D Technologie ist die Visualisierung der Schritt, in welchem die Kartenobjekte letztendlich sichtbar gemacht und die Gestaltungsentscheidungen aller vorangegangenen Prozessschritte graphisch umgesetzt werden. Zusätzlich werden noch eine Reihe an globalen Gestaltungsvariablen definiert, die der 3D Karte ihr endgültiges Aussehen geben. Durch die Definition von Kameraaspekten, Schattierungsaspekten, atmosphärischen Effekten und vor allem Beleuchtungsaspekten wird die Bild- und Darstellungsqualität der gesamten Karte maßgeblich beeinflusst. In der Computergraphik wird die Visualisierung als auch Rendering bezeichnet. Da die Visualisierungsaspekte oft sehr rechenaufwendig sind, kann die Zeit, welche für das Rendering benötigt wird (Renderzeit), oft sehr lange ausfallen. (HÄBERLING 2004)

Die Art und Weise, wie das kartographische Modell vom Nutzer betrachtet wird, kann mit den Parametern einer Kamera beschrieben werden. Folglich wird in der 3D Visualisierung von der Kamera, als dem Standort der Modellbetrachtung gesprochen. Die Kamera legt die, für die Orientierung so wichtige Perspektive fest. Eine Reihe von kognitionspsychologischen Funktionsprinzipien muss folglich bei der Festlegung der Kameravariablen berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 2.2). Der möglicherweise größte

Vorteil einer 3D Karte liegt darin, dass er Vorzüge des prozessualen und des konfiguralen Wissens bei der Wegfindung vereinen kann. Einerseits bietet sie eine recht gute Übersicht, wodurch die räumlichen Relationen der einzelnen Kartenobjekte zueinander abgeleitet werden können. Andererseits ähnelt die Perspektive jener, die man auch bei der Navigation einnimmt und die dem prozessualen Wissen zugrunde liegt. Dadurch können die Effekte des Perspektivwechsels, der zu so vielen Fehlern bei der Orientierung führt entscheidend abgemildert werden. Voraussetzung dafür ist die Berücksichtigung des Ausrichtungseffekts, wie er von LEVINE ET AL. (1984) sowie WARREN & SCOTT (1993) beschrieben wurde. Die Kamera muss sich also immer im Rücken des Kartenbetrachters befinden. Die Objekte, die er vor sich sieht, müssen sich oben in der Karte befinden. Und wenn der Betrachter die Richtung ändert, muss sich auch die Position der Kamera entsprechend drehen. (DARKEN & SIBERT 1996) Diese Mechanismen müssen durch die Gestaltungsaspekte der Kamera festgelegt werden.

Diese umfassen eine innere und äußere Kamerageometrie sowie, im Falle von dynamischen 3D Karten auch Einstellungen zur Kamerabewegung und -veränderung. Jeder dieser Aspekte umfasst eine Reihe von festzulegenden Variablen. Als Teil der inneren Kamerageometrie ist zunächst der *Öffnungswinkel* der Kamera zu bestimmen. Dieser gibt den Winkel des Betrachtungskegels an und wird durch die Brennweite, also dem Abstand der Kameralinse zur Abbildungsfläche bestimmt. Bedingt durch die Zentralperspektive werden die Verzerrungen der abgebildeten Kartenobjekte größer, je weiter der Winkel geöffnet ist. (HÄBERLING 2004) Beim Menschen beträgt dieser Öffnungswinkel zwischen 40 und 50 Grad. IMHOF (1963) empfahl demnach auch für seine Panoramen einen Öffnungswinkel dieser Größenordnung. Diese Empfehlung soll hier übernommen werden. Bei großen Stationen oder Bahnhöfen, wie im Testgebiet, reicht dies nicht aus, um alle Objekte in einer angemessenen Größe innerhalb eines Kartenbildes abzubilden. In diesem Fall kann auf interaktive Darstellungen mit Navigations- und *Zoomfunktion* oder Videos in Form von Kameraflügen zurückgegriffen werden.

Neben der inneren Kamerageometrie, bestimmt auch die äußere Kamerageometrie die Position und Ausrichtung der Kamera, sowie etwaige Bewegungen. Um eine perspektivische Ansicht des kartographischen 3D Modells zu erhalten, darf die Kamera nicht direkt über dem Modell liegen. Ihr *horizontaler Standort* muss sich etwas außerhalb der Modellbegrenzungen befinden, wodurch bereits Einschränkungen bei der Betrachtung der Kartenobjekte durch Verdeckung in Kauf genommen werden müssen. Die horizontale Kameraposition bedingt dabei die *Kamerahöhe*. Hinzu kommt noch ein anvisierter *Zielpunkt* im Modell, der *Betrachtungsrichtung und -winkel* festlegt. (HÄBERLING 2004) Die *Betrachtungsdistanz* wird dabei so gewählt, dass das Gebiet von Interesse möglichst umfassend abgebildet wird, die Kartenobjekte aber nicht zu klein erscheinen.

Alle Variablen müssen so aufeinander abgestimmt werden, dass die Objektverdeckung minimiert wird, trotzdem aber noch ein perspektivischer Eindruck entsteht. HÄBERLING ET AL. (2008) empfehlen dafür einen durchschnittlichen Betrachtungswinkel von 45 Grad. Mehrschichtige 3D Karten von Indoor Räumen haben jedoch im Gegensatz zu Bergpanoramen oder Stadtmodellen mit Verdeckungen in zwei Richtungen zu kämpfen.

Ist der Betrachtungswinkel steil, ist die vertikale Verdeckung durch die Etagenflächen groß, ist er flach nimmt die Verdeckung durch extrudierte Objekte zu. Alle Variablen sind daher abhängig von der Definition des anvisierten Zielpunktes und der darzustellenden Objekte. Neben einem möglichst umfassenden Bild der U-Bahn-Station, steht die Darstellung einer zu folgenden Route im Forschungsinteresse dieser Arbeit. GARTNER & RADOCZKY (2005) empfahlen zu Beginn einer Navigationsanweisung die Route in ihrer Gesamtheit zu visualisieren. Dadurch soll der Nutzer einen schnellen Überblick und ein konfigurales Verständnis des zurückzulegenden Weges bekommen. Speziell Anfangs- und Endpunkt der Route sollten demnach klar vermittelt werden. Diese Kriterien sollten für die Festlegung der Gestaltungsvariablen der Kamera herangezogen werden.

Da das Testgebiet allerdings sehr groß ist, muss zur vollständigen Abbildung der U-Bahn-Station im vorgeschlagenen Detaillierungsgrad auch die Variable *Kamerabewegung* berücksichtigt werden. Der Kartennutzer bekommt dadurch den Eindruck sich selbst durch die Karte zu bewegen. Folglich wird diese Technik auch als Kameraflug bezeichnet. Wie bereits angesprochen gibt es einerseits die Möglichkeit einen solchen Kameraflug zu animieren und als Video zu exportieren, andererseits dem Nutzer interaktive Navigationsfunktionen zur Verfügung zu stellen, damit dieser selbst die Position der Kamera bestimmen kann. Grundsätzlich müssen für die Festlegung der Kamerabewegung alle Variablen bestimmt werden, die auch bei einer statischen Darstellung zum Einsatz kommen. (HÄBERLING 2004) Normalerweise werden in einer Visualisierungssoftware sogenannte Schlüsselbilder (engl. „key frames“) definiert. Dies sind statische Bilder mit definierten Kameravariablen. Zwischen diesen Schlüsselbildern werden von der Software eine Vielzahl weiterer Bilder interpoliert, die am Ende zu einem Film zusammengesetzt werden können. Eine zweite Möglichkeit besteht darin einen Pfad zu zeichnen, dem die Kamera folgt und dabei ein bestimmtes Ziel anvisiert. Um abrupte Richtungswechsel zu vermeiden, wird hier meist mit Beziér Kurven gearbeitet.

Kameraflüge dieser Art können für die Erlernung einer Route sehr hilfreich sein, wie schon GOLDIN & THORNDYKE (1983) zeigten. Sie sahen Vorteile sowohl gegenüber dem Studium allozentrischer Karten als auch gegenüber der direkten Navigation. Diese Ergebnisse konnten auch MÜNZER & STAHL (2008) bestätigen. Sie erklärten die Vorteile gegenüber statischen Bildern beziehungsweise allozentrischen Karten durch die Form der Informationsvermittlung von Richtungsänderungen, besonders auf Treppen, direkt nach Treppen oder bei 180 Grad Drehungen. Während bei den anderen beiden Präsentationsformen der Perspektivwechsel kognitiv anhand von symbolischen Richtungspfeilen vollzogen werden muss, führt die Kamera in der Animation eine Informationsvermittlung durch, die analog zu der eigenen Navigationserfahrung abläuft. (MÜNZER & STAHL 2008)

4.13 Licht, Schatten und atmosphärische Effekte

Essentiell für die Tiefenwahrnehmung und damit für die Abbildung eines dreidimensionalen Raums auf einem zweidimensionalen Medium, ist, neben der

Verdeckung und den Größeneffekten der Entfernung, das Zusammenspiel von Licht und Schatten. Durch den Schattenwurf von volumetrischen Objekten, der durch eine oder mehrere virtuelle Lichtquellen bedingt ist, kann ein dreidimensionaler Raum simuliert werden. (FOLEY ET AL. 1995) 3D Software bietet eine Fülle an Gestaltungsvariablen, die den beiden Aspekten Licht und Schatten zugeordnet werden können. Ziel dieser Arbeit ist es, die Beleuchtungsbedingungen der U-Bahn-Station Karlsplatz unter Berücksichtigung der, für das Rendering benötigten Zeit, möglichst realitätsnah widerzugeben.

Es kann grundsätzlich zwischen verschiedenen *Lichtarten* unterschieden werden. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Umstand, dass sich das abgebildete Gebiet im Untergrund befindet. Dadurch ist es vom natürlichen Licht der Sonne weitestgehend abgeschnitten. Sonnenlicht wird durch gerichtetes oder direktionales Licht simuliert. Dabei handelt es sich um parallele Lichtstrahlen, die von einer Quelle in der Unendlichkeit ausgehen und scharfe Schlagschatten werfen. (HÄBERLING 2004) Das Licht im Inneren von Gebäuden unterscheidet sich stark vom gerichteten Licht. Normalerweise gibt es mehrere Lichtquellen, die weniger direktional wirken und zudem von unterschiedlichsten Oberflächen reflektiert werden. Dadurch stammt ein wesentlicher Teil der Beleuchtung nicht direkt von der Quelle, sondern wird von anderen Objekten abgelenkt. Zur Simulation eines solchen Beleuchtungsmodells wird meist *Umgebungslicht* eingesetzt. Dabei handelt es sich um diffuses Streulicht, das von allen Oberflächen reflektiert wird und eine gewisse Grundhelligkeit erzeugt. (EEGEO) Zur realitätsnahen Abbildung reflektierten Lichts bietet moderne 3D Software auch die Einstellung „Global Illumination“. Diese liefert sehr gute Ergebnisse. Da sie jedoch die Renderzeit um ein Vielfaches erhöht, wird in dieser Arbeit darauf verzichtet.

Die *Position der Lichtquellen* wird möglichst realitätsnah wiedergegeben. In der Station Karlsplatz handelt es sich zumeist um Leuchtstoffröhren, die entlang der Hauptbewegungsachsen der Besucher ausgerichtet sind. (Abb. 30 und 31) Ihre Höhe beträgt in etwa 3-4 Meter über dem Boden. Die *Lichtgeometrie* richtet sich nach den Eigenschaften dieser Leuchtstoffröhren und den Effekten des Umgebungslichts. Sie definiert die *Einfallsrichtung* und den *Einfallswinkel* des Lichts und den *Streuwinkel* des Lichtkegels. Daneben kann noch die *Lichtintensität* und *Lichtfarbe* festgelegt werden. Durch sie wird es möglich gewisse Bereiche des Modells zu betonen, oder im Falle der Überlagerung mehrerer Lichtquellen, deren Verhältnis zu bestimmen. (HÄBERLING 2004)

Abb. 30: Beleuchtungssituation in der U-Bahn-Station Karlsplatz (begehbare Flächen und Korridore)

Abb. 31: Beleuchtungssituation in der U-Bahn-Station Karlsplatz (Bahnsteige und Rolltreppen)

Neben den klassischen Lichtquellen, welche die Sonne oder künstliche Beleuchtung simulieren sollen, können auch anderen Objekten Strahlungseigenschaften zugewiesen werden. Wie bereits in Abschnitt 4.10 bemerkt, besteht hierin eine weitere Möglichkeit, die Aufmerksamkeit auf bestimmte Objekte zu lenken. Die 3D Symbole sowie die Aufzüge werden deshalb mit einer schwachen Eigenstrahlung ausgestattet, die ihre Bedeutung innerhalb der Karte hervorheben soll. Die Beleuchtung durch Leuchtstoffröhren wird nur für die begehbaren Flächen umgesetzt. Die flächenhaften POIs werden durch diese nur tangiert.

Abhängig von der Ausgestaltung dieser Variablen ist die Schattenbildung, welche eine Voraussetzung für das Erkennen von dreidimensionalen Formen in zweidimensionalen Abbildungen darstellt. Um die komplexen Einflussfaktoren für die Schattenbildung zusammenzutragen, werden sogenannte *Schattierungsmodelle* eingesetzt. Diese berücksichtigen die Orientierung der Objektflächen, die Winkel der auftreffenden Lichtstrahlen sowie die Reflexionseigenschaften des Oberflächenmaterials. Zu ihnen zählen beispielsweise das „Flat shading“, das „Gouraud shading“ oder das „Phong shading“. Sie alle stellen verschiedene Berechnungsalgorithmen dar, um diese Variablen zur Schattenbildung heranzuziehen. (HÄBERLING 2004) Zur realistischen Darstellung von Indoor Umgebungen hat sich die Verwendung von „Ambient Occlusion“ zusammen mit dem herkömmlichen „Phong Shading“ bewährt. Dabei wird berücksichtigt, dass die Beleuchtungsintensität in Ritzen und Ecken meist geringer ist, als auf freien Flächen. (EEGEO) Insbesondere bei der Darstellung von Treppen ist dieser Effekt sinnvoll, da der Schatten die kleinen Strukturen betont. (Abb. 32 und 33)

Es existieren unterschiedliche *Schattenarten*, die sich immer weiter dem natürlichen Schattenwurf nähern. Neben harten und weichen Schatten, kann ein Flächenschatten eingesetzt werden, dessen Schärfe ausdünnt, je länger der Schattenwurf ist. Es existieren eine Vielzahl weiterer Beleuchtungs- und Schattierungseinstellungen, die auf Kosten der Renderzeit, die Visualisierungen immer realitätsnäher erscheinen lassen. Es ist daher sinnvoll einen Kompromiss zwischen Zeitaufwand und Qualität zu suchen. Für diese Arbeit wird der Schlussstrich bei Umgebungslicht, Ambient Occlusion und Flächenschatten gezogen. Selbst diese Einstellungen sind bereits sehr rechenintensiv, jedoch noch weit davon entfernt, was theoretisch möglich wäre.

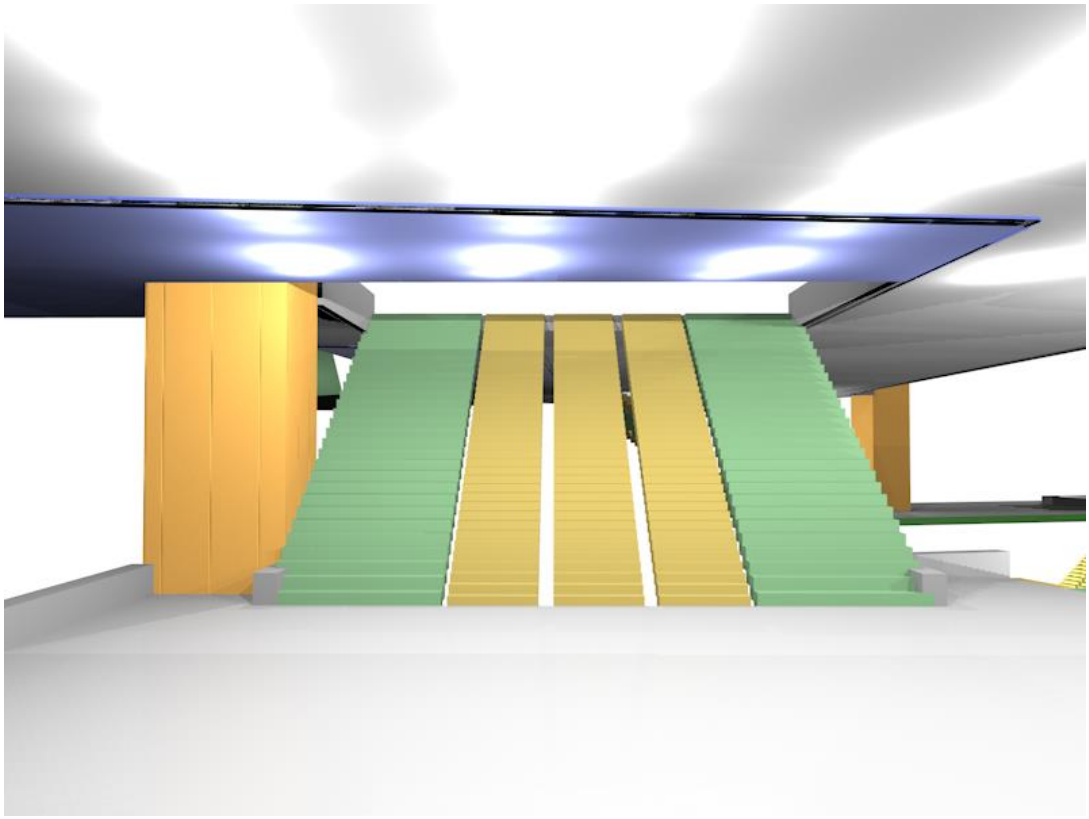


Abb. 32: Rendering eines Treppenaufgangs ohne Ambient Occlusion und mit harten Schatten (Renderzeit: 43 Sekunden)

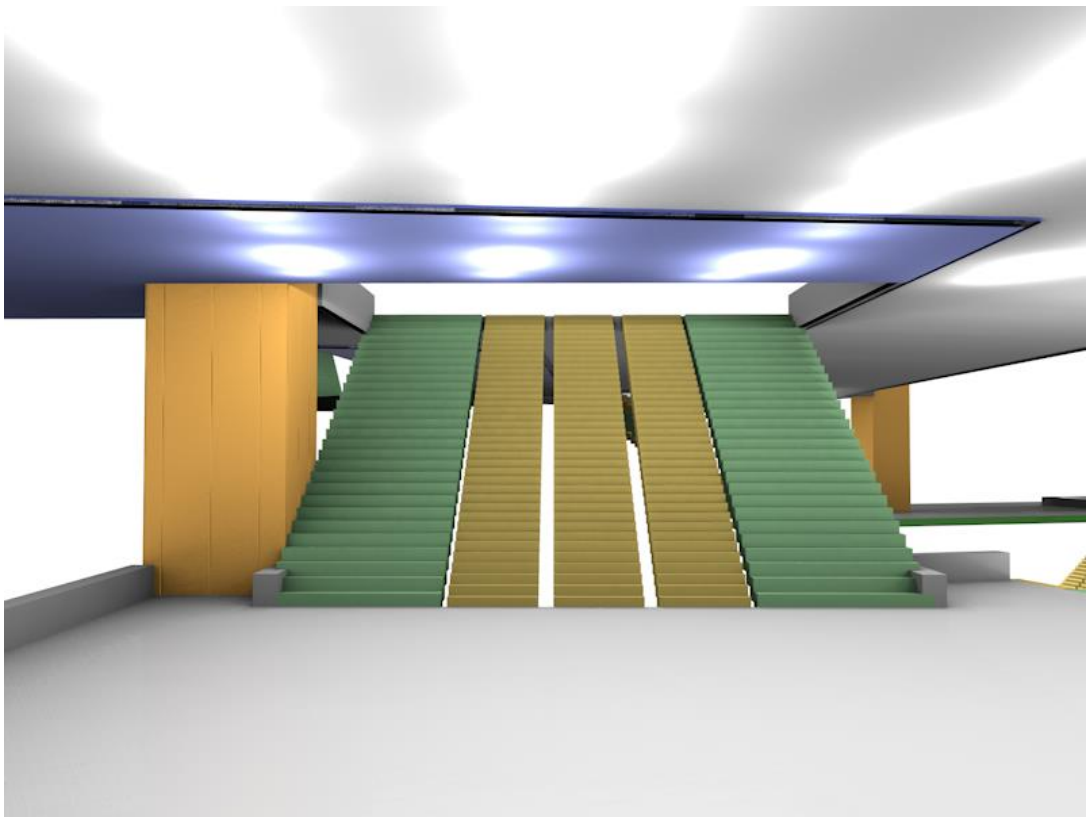


Abb. 33: Rendering eines Treppenaufgangs mit Ambient Occlusion und Flächenschatten (Renderzeit: 8 Minuten und 43 Sekunden)

Atmosphärische Effekte können die Naturtreue der Visualisierung weiter steigern. JONES (1997) betont, dass diese Effekte, obwohl der abstrakte Charakter der Karte beibehalten werden muss, die assoziative Wirkung beim Nutzer erhöhen können. Ein prominentes Beispiel dafür ist der Einsatz von *Dunst*, der beim Betrachter eine Trübung der Sicht mit zunehmender Distanz bewirkt. In der Natur ist diese Trübung, neben Wasserdunst auch oft durch Staub- und Rußpartikel bedingt und als Smog bekannt. Bereits IMHOF (1965) kannte diesen Effekt und setzte ihn in einigen seiner Vogelschaukarten ein. Er solle die Raumtiefe weiter betonen und so den Eindruck der Dreidimensionalität erhöhen.

Auch für diese Arbeit wurde mit dem Einsatz von Dunst experimentiert, allerdings waren die Ergebnisse nicht sonderlich befriedigend. Es mag stimmen, dass der Dunst die Tiefenwahrnehmung steigert, allerdings ist diese durch die moderne Computergraphik auch so schon sehr gut. Zudem begründet sich der Einsatz von Dunst zumeist aus topographischen Panoramabildern von Berglandschaften. Einerseits sind die Dimensionen in diesen Darstellungen um ein vielfaches größer, als in der hier dargestellten U-Bahn-Station. Andererseits stellt Dunst in ersteren Fall eine realistische Gestaltungsvariable dar, während die gesamte Darstellung im vorliegenden Fall bereits deshalb unrealistisch ist, da das umgebende Medium Erdreich und nicht Luft ist. In einer Untersuchung von HÄBERLING ET AL. (2008) haben Experten aus ähnlichen Gründen mehrheitlich vom Einsatz von Dunst abgeraten. Nachdem also kein Vorteil im Einsatz von Dunst festgestellt werden konnte, wird er hier nicht verwendet werden.

Eine letzte Gestaltungsvariable, die hier kurz behandelt werden soll, ist das sogenannte Himmelsobjekt. Dieses stellt eine *Himmelsstruktur* dar und wurde ursprünglich eingesetzt, um bei Panorama- oder Vogelschaukarten die Horizontlinie und den angrenzenden Himmel darzustellen. Der Himmel kann dabei als Farbverlauf dargestellt und Wolken können dazu modelliert werden. Die Ausgangssituation in dieser Arbeit ist eine andere. Es existiert zwar eine Horizontlinie, die unter Umständen auch sichtbar wäre, allerdings nur, wenn man das DGM einblendet. Da dies aus Gründen der Übersicht, nur in wenigen Fällen sinnvoll und möglich ist, würde das Himmelsobjekt den gesamten Hintergrund einnehmen, also auch dort aufscheinen, wo eigentlich bloß Erdreich ist. Es ergibt also wenig Sinn, das Himmelsobjekt als Himmel darzustellen, da sonst der Eindruck entsteht die U-Bahn-Station schwebe in der Luft. Es sollte eine möglichst neutrale und blasse Farbe gefunden werden, die nicht zu sehr mit dem Himmel assoziiert wird. Ein Braunton könnte den Bezug zum Untergrund herstellen, während Weiß neutraler und unauffälliger wirkt. Von Grau wird bei den begehbaren Flächen bereits intensiv Gebrauch gemacht, womit von dessen nochmaligen Einsatz abgesehen werden sollte. Nach einigem Versuchen, wurde ein dunkler, eher gräulicher Braunton gefunden, der ausreichend unauffällig wirkt und gleichzeitig die Assoziation von Untergrund hervorruft. Dieser erfüllt vorläufig die Anforderungen und wird für die schlussendliche Visualisierung die Hintergrundfarbe bilden.

Damit wurden die letzten Gestaltungsvariablen in der erweiterten Prozesskette von TERRIBILINI (2001) festgelegt. Aufgrund der Länge des Kapitels, soll nachfolgend eine kurze Übersicht die abgeleiteten Design Implikationen zusammenfassen.

4.14 Zusammenfassung der Design Implikationen

Zu Beginn des Kapitels wurden sechs grundlegende Anforderungen an die Karte, seine Nutzer und Ersteller definiert. Aus ihnen und unter Berücksichtigung der theoretischen Erkenntnisse aus Kapitel 2, wurden 66 Gestaltungsvariablen (Abschnitt 3.4), die fünf Prozessschritten (Abschnitt 3.3) zugeordnet werden können, festgelegt. (TERRIBILINI 2001; HÄBERLING 2004) Zunächst wurden der Grad der Generalisierung und die Selektion der darzustellenden Kartenobjekte bestimmt. Diese orientierten sich an der Empfehlung, den Inhalt der Karte auf das Minimum, welches zur Extraktion der relevanten Information notwendig ist, zu reduzieren. (KLIPPEL 2003) Eine wichtige Rolle dabei spielen Landmarken, die als primäre Methode der Wegbeschreibung umfassend abgebildet werden sollten. (MAY ET AL. 2003) Neben den vertikalen Transitionselementen wurden sechs weitere punkthafte Landmarken ausgewählt, die ergänzend zu den flächenhaften Landmarken dargestellt werden sollen. Dabei wurde auf die gleichmäßige Verteilung der Landmarken über das gesamte Bauwerk geachtet und das Zwei-Punkte Prinzip (DARKEN & SIBERT 1996) berücksichtigt.

Auch die Genauigkeit der Datenerfassung orientiert sich weitestgehend am zuvor definierten Grad der Generalisierung. Objekte werden auf ihre geometrischen Grundformen reduziert. Gewissermaßen eine Ausnahme bilden dabei die Formen der Etagenflächen und der Wände. Da strukturelle Feinheiten und architektonische Variationen dieser Objekte wichtige Referenzpunkte für die navigierende Person bilden, sollten sie unbedingt in der Erfassung berücksichtigt werden. (CARLSON ET AL. 2010; HÖLSCHER ET AL. 2006) In Abschnitt 4.4 wurden vier, für die weitere Verarbeitung zentrale Attribute beschrieben. Diese werden als Plansymbole oder numerische Angabe direkt vor Ort auf einem Schreibblock erfasst. Zur Messung von Distanzen und Winkeln wird das Schrittmaß beziehungsweise ein einfaches Winkelmessgerät herangezogen. Zusätzlich zu diesen Aufzeichnungen werden noch Photographien angefertigt, die die nun folgende Digitalisierung unterstützen sollten.

Zur Digitalisierung wird der OSM Editor JOSM verwendet. Er bietet die Möglichkeit zur Einblendung von Luftbildern, die eine wichtige Referenz für die Einbindung der erhobenen Daten in ein globales System bieten. Gleichzeitig ist JOSM ein umfassendes GIS mit umfangreichen Digitalisierungsfunktionen. Insbesondere durch die zahlreichen Tastenkombinationen, Orthogonalisierungsoperationen und Datenfilter ermöglicht es ein schnelles und sauberes Arbeiten mit OSM Daten.

Die Grundlage für die dreidimensionale Visualisierung der Kartenobjekte, bildet die 3D Modellierung. Diese wurde mithilfe eines Python Skriptes automatisiert. Ein DGM der Wiener Stadtvermessung mit einer Auflösung von 1 Meter liefert die Grundlage für die Höhenberechnung der einzelnen Etagenflächen und ihrer zugehörigen Objekte. Für die Berechnung des Abstandes zur Geländeoberfläche wird die Stufenanzahl herangezogen. Die Z-Achse unterliegt dabei nicht derselben Skalierung, wie die beiden horizontalen Achsen. Gemäß unserer asymmetrischen, kognitiven Codierung der vertikalen Dimension, wie sie JEFFERY ET AL. (2012) beschrieben haben, wird die Z-Achse mit einer vertikalen

Überhöhung versehen, die eine bessere Differenzierung der einzelnen Gebäudeebenen ermöglicht. In der 3D Modellierung finden zudem eine Reihe an Geometrietransformationen statt. So werden aus den linienhaften Objekten durch Bufferoperationen Polygone. Dies betrifft insbesondere Wandgeometrien, Gleise sowie Treppen und Rolltreppen.

Punkthafte Objekte bleiben zunächst bestehen und werden erst im nächsten Schritt der Prozesskette mit einem Symbol versehen. Zu den Symbolisierungsaspekten zählt auch die Extrusion der Kartenobjekte, wodurch aus zweidimensionalen Flächen volumetrische Körper werden. Dadurch wird aus primitiven geometrischen Bausteinen ein 3D Modell zusammengesetzt, das die schnelle Extraktion relevanter Informationen ermöglichen soll. Den Empfehlungen von MAY ET AL. (2003) folgend, werden POIs in unterschiedliche Kategorien unterteilt und mit bildhaften 3D Symbolen versehen. Diese entsprechen je nach Kategorie entweder sprechenden Symbolen, oder bekannten Logos. Das Design folgt in seiner äußeren Form dem des Wiener U-Bahn Würfels, der eine schnelle Assoziation mit dem Öffentlichen Verkehr der Stadt ermöglicht. Ergänzt werden die Würfel mit ähnlich gestalteten Pyramiden für die weniger wichtigen punkthaften POIs, welche die Infrastruktureinrichtungen des Stationsgebäudes repräsentieren. Dadurch wird eine schnelle, qualitative Unterscheidung ermöglicht. Im Falle der Stationszugänge können auch Schriftzüge abgebildet werden.

Bei der Farbgebung, die ebenfalls Bestandteil der Symbolisierung ist, wurde auf Empfehlungen von IMHOF (1972) und anderen bedeutenden Kartographen zurückgegriffen. Ziel war es eine farbharmonische Wirkung zu erzielen, die die Aufmerksamkeit des Kartennutzers auf die, für Orientierung und Navigation wichtigen Elemente lenkt. Hierzu wurde, unter Berücksichtigung der theoretischen Grundlagen eine Rangliste der einzelnen Kartenobjekte nach ihrer Wichtigkeit erstellt. In geringeren Maß spielen auch Flächentexturen im vorliegenden Beispiel eine Rolle. Sie werden in Form einer Bumpmap über die Etagenflächen und die Aufzüge gezogen. Dies dient einerseits der Tiefenwahrnehmung in Form des Texturgradienten (BARDEL 2001), andererseits der Betonung der Ausrichtung und Auflockerung allzu großer, einfarbiger Flächen sowie deren Wahrnehmung als einheitliches Ganzes. (REAGAN 2000; TUFTE 1999)

LI ET AL. (2016) sowie VAARANIEMI ET AL. (2013) lieferten zwei vielversprechende Anwendungsfälle für die Gestaltungsvariable Transparenz in 3D Karten. Einerseits die Sichtbarmachung globaler Landmarken durch Wände hindurch, andererseits die Sichtbarmachung von Wegen und deren Beschriftung durch verdeckende Objekte hindurch. Besonders die zweite Methode ist für den vorliegenden Anwendungsfall von Interesse, wird allerdings nicht direkt Bestandteil dieser Arbeit sein.

Bei der Festlegung der Kameraaspekte im Rahmen der Visualisierung wird der große Einflussfaktor der Perspektive schlagend. Hier kann durch eine schrägperspektivische Ansicht der Eindruck von Dreidimensionalität erweckt werden. Es können somit Vorzüge des prozessualen und konfiguralen Wissens für Zwecke der Wegfindung vereint werden. Die Position der Kamera ist dabei von der Position und der Bewegungsrichtung der navigierenden Person abhängig und muss dem Ausrichtungsprinzip folgen. (DARKEN &

(SIBERT 1996; LEVINE ET AL. 1984) Zumindest am Anfang einer Navigationsanweisung sollte die gesamte Route mit ihrem Anfang- und Endpunkt betrachtet werden können. (GARTNER & RADOCZKY 2005) Auch Kameraflüge und Animationen können dafür eingesetzt werden. In der Vergangenheit wurden diesen Vorteile gegenüber statischen Bildern attestiert. (GOLDIN & THORNDYKE 1983; MÜNZER & STAHL 2008)

Das Licht im Inneren von Gebäuden unterscheidet sich stark von den Lichtbedingungen im Freien. Während die Sonne scharfe Schlagschatten wirft, herrscht in Innenräumen diffuses und stark gestreutes Licht vor. Dieses kann durch sogenanntes Umgebungslicht simuliert werden. Für die Schattenbildung bieten 3D Programme komplexe Modelle. Desto präziser diese versuchen, die realen Schattenbedingungen wiederzugeben, desto mehr schlägt sich dies auf die Renderzeit nieder. Ein Kompromiss zwischen Renderzeit und Realismus wurde mit der Einstellung Flächenschatten und Ambient Occlusion gefunden. Auf atmosphärische Effekte wird weitgehend verzichtet. Lediglich vom Himmelsobjekt wird Gebrauch gemacht. Allerdings nicht zur Darstellung einer Himmelsstruktur, sondern zur Einfärbung des Hintergrunds in einem erdähnlichen Braunton.

Nachdem nun alle Gestaltungsvariablen bestimmt wurden, soll im Folgenden näher auf die technischen Aspekte der Prozesskette eingegangen werden. Zweck dieses technischen Teils der Arbeit ist einerseits die Dokumentation der durchgeführten Arbeit, andererseits die Präsentation eines Workflows zur Erstellung einer 3D Karte. Vorangehen wird dem eine kurze Einführung in die Themenkomplexe VGI und OSM, wo auch der Frage nachgegangen wird, ob diese eine geeignete Grundlage für die vorliegende Aufgabenstellung darstellen.

5 Erfassung und Digitalisierung in der OpenStreetMap

Eine wesentliche Limitierung bei der Arbeit mit Indoor Daten, ist deren spärliches Vorhandensein und uneinheitliches Datenschema. Die Erfassung von Geodaten im Allgemeinen war lange Zeit das Metier von offiziellen Institutionen oder spezialisierten Firmen und unterlag deren strenger Reglementierung. In den letzten zehn Jahren setzte hier ein tiefgreifender Wandel ein. Einerseits begannen staatliche Institutionen Teile ihrer (Geo-)Daten im Rahmen von *Open Government Data* (OGD) Initiativen zu veröffentlichen und andererseits begannen Freiwillige selbst damit, Geodaten zu sammeln und auf Online Plattformen zu veröffentlichen. Michael Goodchild (2007) untersuchte als einer der Ersten dieses neuartige Phänomen und gab ihm den Namen V*olunteered Geographic Information* (VGI).

Seitdem sind gut zehn Jahre vergangen und VGI hat sich zu einer der ergiebigsten Quellen für Geodaten entwickelt. Dieser Umstand ist nicht zuletzt für Indoor Anwendungen, seien es Karten oder Navigationssysteme, von großer Bedeutung. Während die traditionellen, staatlichen Datenanbieter nie in diesen Bereich vorgedrungen sind und sich für gewöhnlich mit der topographischen Datenerfassung begnügten, ist es für kommerzielle Anbieter selten rentabel Indoor Daten überhaupt zu erheben. Wie in Abschnitt 1.1 bereits angesprochen ist die Indoor Datenerfassung, verglichen mit jener unter freiem Himmel, deutlich aufwändiger. Entscheidende Technologien wie GNSS oder Satellitendaten stehen hier nicht zur Verfügung. Kommerzielle Anbieter erheben Daten nur dann, wenn zahlungskräftige Kunden wie die Betreiber von Flughäfen, Einkaufszentren oder Messehallen dahinterstehen. Und selbst dann stehen die Daten der Forschung oder der Öffentlichkeit kaum zur Verfügung. VGI hat ein enormes Potential diese Lücke aufzufüllen und offene Daten über große Indoor Umgebungen der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. (GOETZ & ZIPF 2012A) Dieses Kapitel gewährt einen vertieften Einblick in die ersten beiden Abschnitte der Prozesskette zur Erstellung einer 3D Karte – Erfassung und Modellierung.

5.1 Grundlagen der OSM

Die mit Abstand größte Plattform für VGI ist die OSM. Sie wurde 2004 vom Briten Steve Coast gegründet und zählt derzeit rund 3.6 Millionen Mitglieder. Ziel war es neben den großen kommerziellen Datenanbietern eine weitere, freie Weltkarte zu schaffen. Dieses Ziel wurde erreicht und heute stellt die OSM die größte freie Datenbank für Geodaten dar. Täglich laden zwischen 4000 und 5000 Nutzer neue Daten hoch. Dies führte bei einem kontinuierlichen Anstieg zu heute 3.8 Milliarden Punkten in der Datenbank. Die aktivste und größte Gemeinschaft (community) befindet sich traditionell in Deutschland, gefolgt von den USA und Russland. Pro Kopf gesehen, zählt Österreich seit einigen Jahren die Meisten aktiven Mitglieder (Mapper). (OSMSTATS) Folglich gilt die Datenqualität in

Mittel- und Westeuropa als ausgesprochen gut und kann mit jener, der kommerziellen Anbieter konkurrieren. (HAKLAY 2010; LUDWIG ET AL. 2010; ZIELSTRA & ZIPF 2010)

Grundsätzlich kann jeder zur OSM beitragen. Die historisch wichtigste Erfassungstechnik für OSM Daten sind GNSS Aufzeichnungen, oder GPS Tracks (Global Positioning System). Dabei werden GNSS fähige Geräte dazu genutzt, die eigene Position in einem regelmäßigen Intervall mit geographischen Koordinaten festzuhalten und die dabei entstehenden Tracks in die Datenbank einzuspeisen. So können etwa Straßen und Wege schnell und mit relativ hoher Genauigkeit erfasst werden. Heute werden vielfach auch georeferenzierte Satelliten- und Luftbilder dazu genutzt manuell verortete Punkte zu setzen. Dies ermöglicht die Kartierung unterschiedlichster Objekte, die auf Luftbildern identifiziert werden können. Bereits vor einigen Jahren hatte die Anzahl der erfassten Gebäudegrundrisse (building footprints), die Anzahl der Straßen übertroffen. (GOETZ & ZIPF 2012B)

Die als *Nodes* bezeichneten Punkte bilden das Grundgerüst der OSM Datenstruktur. Sie besitzen eine X- und Y-Koordinate (Längen- und Breitengrad) gemäß des World Geodetic System (WGS84). Linien – *Ways* genannt – können durch die Verbindung mehrerer Nodes gezeichnet werden und einfache Polygone entstehen durch geschlossene Ways. Für komplexere Polygone, die beispielsweise Löcher enthalten (Multipolygone), oder um existierende Beziehungen zwischen verschiedenen Elementen zu beschreiben (z.B. Abbiegebeschränkungen oder Bus Routen), wird ein dritter, als *Relation* bezeichneter Datentyp verwendet. Relationen können somit Nodes, Ways und auch untergeordnete Relationen enthalten. (GOETZ 2012)

Die drei Grunddatentypen können mit einer beliebigen Anzahl an *Tags* versehen werden. Tags sind theoretisch frei wählbar, allerdings haben sich, wie bereits in Abschnitt 4.4 erwähnt, über die Jahre Konventionen etabliert, um eine Auswertung der Tags zu ermöglichen. Sie bestehen immer aus einem Schlüssel-Wert Paar (*key – value)*, das den Mappern die Definition vielfältiger Informationen und Attribute ermöglicht. Der Schlüssel definiert dabei eine Charakteristik oder einen Wertebereich eines Elements (z.B. „highway“), der dann durch den Wert präzisiert wird (z.B. „footway“ oder „residential“) (Abb. 34). Die unterschiedlichen Tags werden von der Community auf Mailing Listen oder im OSM Forum ausdiskutiert und im OSM Wiki dokumentiert. Auf der TagInfo Seite kann die Verbreitung der einzelnen Tags und andere statistische Informationen eingesehen werden. (GOETZ 2012)

Im Kern ist die OSM eine PostgreSQL Datenbank, die eigene Tabellen für alle drei Datentypen enthält. Diese Tabellen wiederum enthalten unzählige Reihen und Spalten, in denen alle Objekte des entsprechenden Datentyps abgelegt sind. Um die räumlichen Dimensionen der Daten abzubilden, wird die PostgreSQL Datenbank um die PostGIS Erweiterung ergänzt, die auch räumliche Analysefunktionalitäten umfasst. Neben Schnittstellen wie der Overpass API können Daten auch als sogenannter Dump (Speicherauszug) bezogen werden, die in regelmäßigen Abständen (meist wöchentlich) veröffentlicht werden. Dabei stehen unterschiedliche Formate zur Verfügung, wobei das OSM eigene XML-Format (Extensible Markup Language) das gängigste ist. Neben den

Dumps bieten Firmen wie die Geofabrik auch aufbereitete OSM Extrakte in unterschiedlichsten Formaten an. Da für die vorliegende Arbeit nur ein sehr eingeschränkter Teil der Daten benötigt wird, wird auf die Overpass API zurückgegriffen. Diese erlaubt es durch eine eigene Abfragesprache die benötigten Daten exakt zu filtern und herunterzuladen. (MURALIDHARAN 2015)

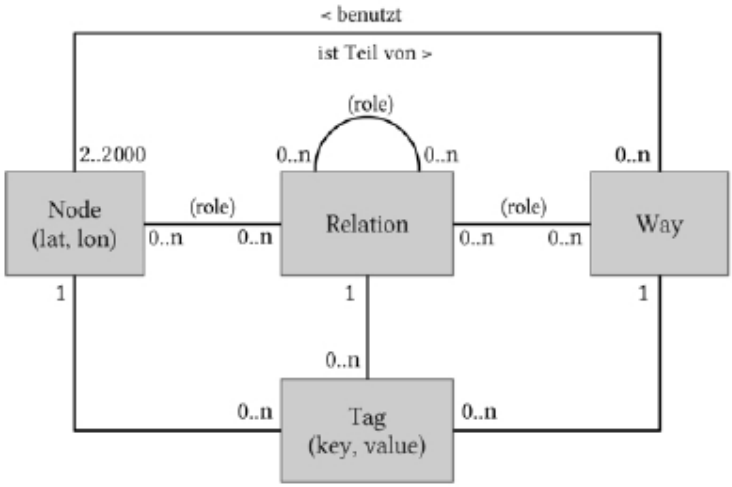


Abb. 34: Vereinfachtes OSM Datenschema (RAMM & TOPF 2009)

5.2 Indoor Daten in der OSM

Marcus Goetz von der Universität Heidelberg beschäftigte sich unter der Leitung von Alexander Zipf als einer der Ersten mit der Erweiterung der OSM um Indoor Informationen. Sie erkannten das Potential von VGI zur Generierung von Indoor Daten und deren Integration in ein globales Geoinformationssystem. Zu diesem Zweck entwickelten sie ein Schema zur Abbildung umfangreicher Informationen über das Innere von Gebäuden, welches sie IndoorOSM tauften. Dieses dient einerseits zur Erfassung von Informationen über das Äußere des Gebäudes, andererseits über Teile des Gebäudes, die sich im Inneren befinden. Berücksichtigt werden Räume, Korridore und Hallen, vertikale Transitionselemente, POIs, Türen, Fenster und sogar (temporäre, bewegliche) Hindernisse, wie Einrichtungsgegenstände oder Möbel. Dies führt zu einem äußerst umfangreichen und detaillierten Modell, welches ausgiebig Gebrauch von Relationen macht, um gewisse Elemente zu gruppieren und voneinander abzugrenzen. (GOETZ & ZIPF 2012A)

Wie in der Community üblich, wurde der Vorschlag (Proposal) in der deutschen Mailingliste zur Diskussion gestellt. Relationen gelten in der OSM Community grundsätzlich als problematisch. Sie sind kompliziert und bereiten vielen Anfängern Schwierigkeiten. Darüber hinaus werden sie in den Editoren nicht graphisch angezeigt, wodurch es leicht möglich ist, Relationen zu beschädigen, ohne es zu merken. Demnach ist es allgemeiner Konsens, dass Relationen nur dann eingesetzt werden sollen, wenn es keine andere Möglichkeit gibt einen Sachverhalt abzubilden. An diesem Umstand scheiterte auch das Proposal. IndoorOSM wurde als zu kompliziert und unpraktisch eingestuft.

Allerdings setzte es eine Diskussion in Gange, die bis heute andauert und eine ganze Reihe an Indoor Proposals nach sich zog. Seit 2014 gibt es nun ein allgemein anerkanntes Indoor Tagging Schema mit dem Namen *Simple Indoor Tagging* (SIT). Auch diese Arbeit stützt sich auf dieses Schema, wobei sie auch Gebrauch von Tags macht, die zwar allgemein anerkannt, aber nicht unmittelbar Bestandteil dieses Schemas sind, um den spezifischen Anforderungen der 3D Modellierung Rechnung zu tragen. Im Folgenden soll ein Einblick in Simple Indoor Tagging gegeben, und die spezifischen Erweiterungen für diese Arbeit beleuchtet werden.

5.3 Simple Indoor Tagging und Erweiterungen

Wie bereits im Namen angedeutet, zielt SIT darauf ab grundlegende Indoor GIS Funktionalitäten, wie Routing und Visualisierung, durch ein einfaches und replizierbares Schema zu ermöglichen. Es verfolgt den Grundsatz, dass der Mapping Prozess in OSM im Normalfall von grob, über genau bis extrem detailliert voranschreitet. Es soll möglich sein Routing Funktionalität und eine grundlegende Visualisierung der Indoor Umgebung auch ohne detaillierte Pläne bereitzustellen. Grundsätzlich richtet sich SIT an herkömmliche Gebäude, die einen, auf einem Luftbild erkennbaren Footprint besitzen, der die äußeren Umrisse des Gebäudes darstellt. Dies trifft bei unterirdischen U-Bahn-Stationen wie dem Karlsplatz nicht zu, weshalb der Aspekt der äußeren Gebäudehülle hier ignoriert wird. Relevant sind lediglich die einzelnen Etagenflächen der Station, sowie die, sich darauf und dazwischen befindenden Objekte, wie POIs und vertikale Transitionselemente. (OPENSTREETMAP WIKI E)

Der zentrale Tag von SIT ist der Indoor Tag. Er besitzt fünf Ausprägungen, durch die alle Indoor Elemente modelliert werden können (Abb. 35). Die einzelnen Elemente werden als geschlossene Ways (Polygone) oder, im Falle von Wänden und vertikalen Transitionselementen, als einfache Ways modelliert. Die fünf Ausprägungen des Indoor Tags lauten:

- *indoor=corridor:* Eine Verteilerebene, die Zugang zu angeschlossenen Räumen, Bahnsteigen oder Transitionselementen bietet. Die Wände dieser Verteilerebenen ergeben sich aus den angrenzenden Indoor Elementen, beziehungsweise, im Falle von U-Bahn-Stationen, aus den Tunnelwänden.
- *indoor=area:* Dieser Tag beschreibt Ebenen, die weder in sich geschlossene Räume noch Korridore darstellen. Sie besitzen ebenfalls keine impliziten Wände, haben jedoch nicht den Zugangscharakter einer Verteilerebene. Ein Foyer wäre ein Beispiel einer solchen Ebene. Im vorliegenden Testgebiet, kommt dieses Element nicht vor.
- *indoor=room:* Eine von Wänden umgebene, eher kleinflächige Ebene mit eindeutigen Zugang und bestimmter Funktion. Im vorliegenden Fall erhalten die flächenhafte POIs diesen Tag.

- *indoor=wall:* Individuelles, nicht-passierbares Wandelement, welches entweder Räume und Verteilerebenen begrenzt, oder eine freistehende Barriere innerhalb einer Verteilerebene darstellt.
- *Indoor=yes:* Allgemeiner Tag für die Kennzeichnung von Indoor Elementen. Wird meist auf eindimensionale Objekte, wie Transitionselemente und POIs angewandt.

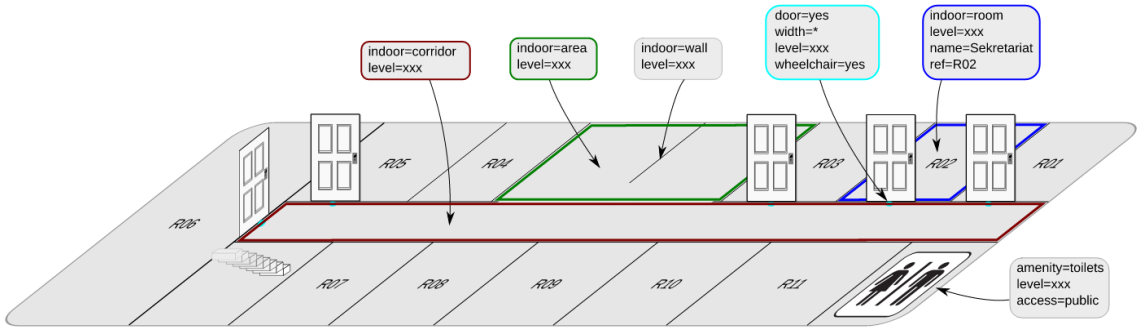


Abb. 35: Illustration der vier Ausprägungen des Indoor Tags (OPENSTREETMAP WIKI E)

Da Wände eindimensional modelliert werden, teilen sich zwei angrenzende Ebenen die Nodes an den Wandelementen. Im SIT werden Wände nur dann explizit modelliert, wenn sie freistehend innerhalb einer Ebene (*indoor=area*) existieren. Ansonsten werden sie implizit als Begrenzung der Räume (*indoor=room*) angenommen. Im Falle von U-Bahn-Stationen, können Wände aber nicht immer durch angrenzende Flächen definiert werden. Im Unterschied zu herkömmlichen Gebäuden, in denen Verteilerebenen (*indoor=corridor*) entweder an Räume, oder die Gebäude-Außenhülle angrenzen und somit keine eigenen Wände benötigen, besitzt die Außengrenze einer unterirdischen Verteilerebene nicht immer eine angrenzende Fläche. Wände können aber auch nicht implizit angenommen werden, da zum Beispiel Bahnsteigkanten, aber auch die Aussparungen für die Transitionselemente keine direkt angrenzende Wand besitzen. Während Räumen auch im vorliegenden Beispiel implizit eine Wand zugeordnet wird, muss diese für die Verteilerebenen explizit modelliert werden. Abbildung 36 zeigt eine Verteilerebene im vierten Untergeschoß der Station Karlsplatz, sowie den Bahnsteig der U1 im fünften Untergeschoss. Darauf ist zu erkennen, dass Bahnsteigkanten und die Aussparungen der Transitionselemente kein angrenzendes Wandelement besitzen, wodurch dieses für die übrigen Begrenzungsflächen manuell digitalisiert werden muss.

Neben den Indoor Tags erhalten die Indoor Elemente eine Reihe weiterer Tags, die nicht unmittelbar mit dem SIT Schema zusammenhängen. So erhalten alle flächigen Elemente (Verteilerebenen, Räume und Aufzugsflächen) den Tag *area=yes* und *building:part=yes.* Diese sind weder für SIT noch für die 3D Modellierung im Rahmen dieser Arbeit zwingend notwendig. Allerdings ist es ein Weg, um anderen OSM Applikationen mitzuteilen, wie sie mit solchen Elementen zu verfahren haben. Durch den building:part-Tag beispielsweise, wird das betreffende Element im OSM Standardstil nicht gerendert, was erwünscht ist, da es in einer herkömmlichen Karte überflüssig wäre. Optional können noch die Tags *tunnel=yes*, *wheelchair=yes* oder *tactile_paving=yes* angebracht werden, die beispielsweise für Applikationen wie der WHEELMAP, die barrierefreies Routing anbietet, interessant sind. Flächenhafte POIs erhalten daneben noch einen *name=**-Tag, der den

Namen der Geschäftsflächen enthält sowie einen *amenity=**-Tag oder *shop=**-Tag. Amenity steht dabei für alle gastronomischen Betriebe und sonstigen Einrichtungen wie WC-Anlagen (*amenity=restaurant, amenity=fast_food, amenity=toilets* etc.) und Shop für sämtliche Geschäfte (*shop=bakery, shop=shoes, shop=kiosk* etc.). Daneben gibt es noch eine Vielzahl an weiteren Tags, die beispielsweise die Öffnungszeiten ausweisen. Diese sollen hier aber nicht näher erläutert werden.

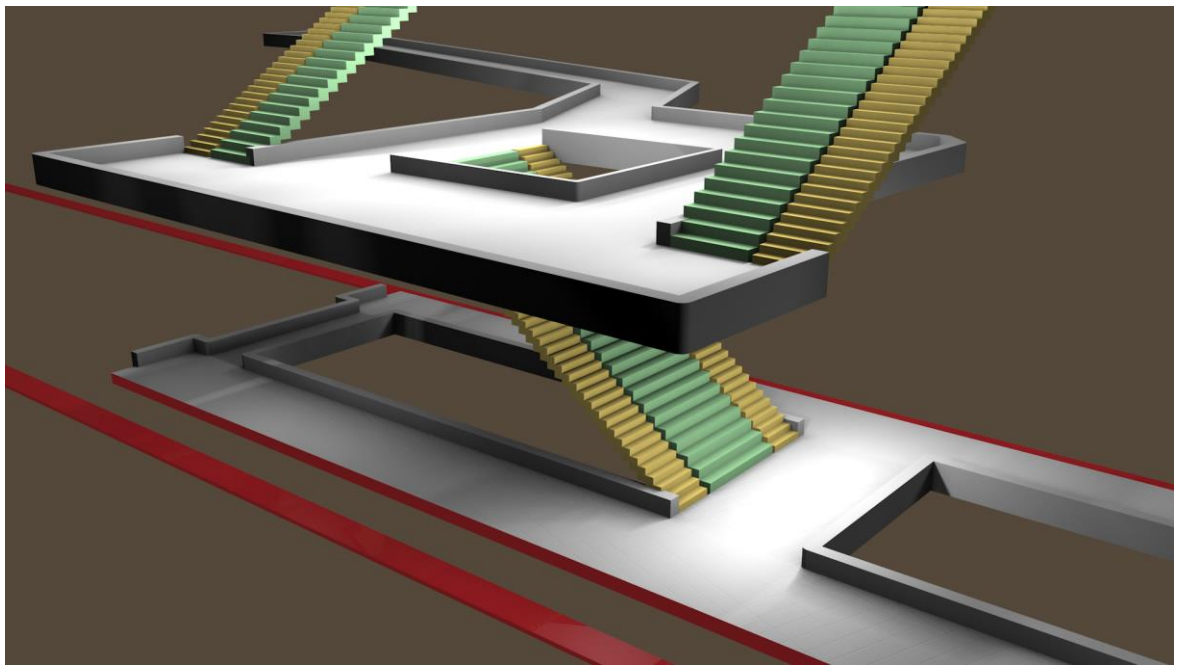


Abb. 36: Manuell modellierte Wände mit Aussparungen an Bahnsteigkanten und Transitionselementen

Die Transitionselemente werden je nach Typ unterschiedlich getagged. Aufzüge erhalten neben *area=yes* und *building:part=elevator* den allgemeinen Tag *indoor=yes* und *levelpart=elevator_platform.* Sowohl Treppen als auch Rolltreppen erhalten den Tag highway=steps und incline=* (*up*, wenn die (Roll-)Treppe in Zeichenrichtung ansteigt und *down*, wenn sie in Zeichenrichtung absteigt) sowie *width=**, der die Breite angibt. Rolltreppen sind darüber hinaus mit dem Tag *conveying=** versehen, der die Fahrtrichtung der Rolltreppe ausweist (*forward*, wenn sie sich in Zeichenrichtung bewegt und *backward*, wenn sie sich gegen die Zeichenrichtung bewegt). Treppen erhalten zusätzlich den Tag *step_count=**, der die Anzahl der einzelnen Stufen enthält. Sowohl der width-Tag als auch der step_count-Tag sind nicht Teil von SIT, werden aber für die 3D Modellierung benötigt.

Bahnsteigkanten werden als eigene Ways modelliert, die mithilfe eines Multipolygons mit den übrigen Teilen der Etagenfläche verbunden werden. Die Relation erhält dabei alle Tags, die sowohl für die gesamte Ebene als auch den Bahnsteig gelten (*area=yes, building:part=yes, indoor=corridor* etc.). Die Bahnsteigkante als eigener Way erhält außerdem den Tag *public_transport=platform* und *ref=**, wo die Bahnsteignummer angegeben wird. Außerdem können noch weitere Tags vergeben werden, die spezifizieren, ob der Bahnsteig über ein Blindenleitsystem verfügt, ob er Rollstuhlgerecht ist, welches Verkehrsmittel ihn anfährt, oder ob es Sitzmöglichkeiten gibt. Abbildung 37 zeigt den U1

Bahnsteig im fünften Untergeschoß im OSM Editor JOSM. Hier sieht man, wie die unterschiedlichen Ways, welche die Ebene bilden, in einem Multipolygon zusammengefasst werden (die Bahnsteigkante ist blau strichliert, die Wände erscheinen in Rosa). Multipolygone erlauben außerdem die Modellierung von Löchern und Aussparungen, die an Bahnsteigen oft auftreten.

Abb. 37: Multipolygon der Bahnsteigetage der U1 in JOSM

Die acht punkthaften POIs werden durch Tags identifiziert, die nicht Teil von SIT sind, aber anderen OSM Konventionen folgen. Zugänge werden mit dem Tag *entrance=yes*, *name=** sowie im Falle von U-Bahn-Stationen mit *railway=subway_entrance* gekennzeichnet. Darüber hinaus, kann angegeben werden, welche Verkehrsmittel über den Eingang erreichbar sind und ob er barrierefrei zugänglich ist. Notfalleinrichtungen werden mit *emergency=** getagged (*phone* für Notrufsäulen, *fire_extinguisher* für Feuerlöscher und *defibrillator* für Defibrillatoren). Informationstafeln werden mit *information=board* getagged. Fahrscheinautomaten, Bankautomaten, Schließfächer, Telephonzellen sowie Mülleimer werden alle durch den *amenity*-Tag identifiziert (*vending_machine* für Fahrscheinautomaten, *lockers* für Schließfächer, *waste_basket* für Mülleiner, *telephone* für Telephonzellen und *atm* für Bankautomaten). Fahrscheinautomaten erhalten darüber hinaus den Tag *vending=public_transport_tickets*. Sollten sich diese POIs in geschlossenen Räumen befinden erhalten sie außerdem den allgemeinen Tag *indoor=yes*.

Wie bereits erwähnt, werden alle, in diesem Abschnitt besprochenen Elemente mit einem *level*-Tag gekennzeichnet. Im Falle von Elementen, die sich auf eine einzelne Etage beziehen, ist es eine einfache Zahl. Die Transitionselemente, werden mit allen Etagenangaben beschrieben, die von ihnen bedient werden. Die unterste Etage bildet dabei die erste Zahl, wovon alle anderen Etagen durch ein Semikolon getrennt, angeführt werden. Eine Treppe, die vom ersten Untergeschoß auf die Oberfläche führt, wird beispielsweise mit dem Tag *level=-1;0* versehen, ein Aufzug der vom vierten Untergeschoß auf die Oberfläche führt und dabei in jeder Etage Halt macht, wird mit *level=-4;-3;-2;-1;0* gekennzeichnet. Nachfolgend eine Übersicht über die, in jedem Fall notwendigen Tags der einzelnen Elemente:

- Verteilerebenen
  - *area=yes*
  - *building:part=yes*
  - *indoor=corridor*
  - *level=**
- Bahnsteige
  - *public_transport=platform*
  - *level=**
  - *indoor=**
  - *building:part=yes*
  - *area=yes*
- Aufzugsflächen
  - *area=yes*
  - *building:part=elevator*
  - *indoor=yes*
  - *level=**
  - *levelpart=elevator_platform*
- Geschäfte
  - *area=yes*
  - *indoor=room*

    - *level=**
    - *name=**
    - *shop=**
- Gastronomie
    - *area=yes*
    - *indoor=room*
    - *level=**
    - *name=**
    - *shop=**
- Treppen
    - *highway=steps*
    - *incline=**
    - *indoor=**
    - *level=**
    - *width=**
    - *step_count=**
- Rolltreppen
    - *highway=steps*
    - *incline=**
    - *indoor=**
    - *level=**
    - *width=**
    - *conveying=**
- Wände
    - *indoor=wall*
    - *level=**
- Gleise
    - *railway=subway*
    - *electrified=rail*
    - *level=**
    - *indoor=**
- Zugänge
    - *entrance=yes*
    - *railway=subway_entrance*
    - *name=**
    - *level=**
- Fahrscheinautomaten
    - *amenity=vending_machine*
    - *vending=public_transport_tickets*
    - *level=**
    - *indoor=**
- Bankautomaten
    - *amenity=atm*
    - *level=**

    - *indoor=**
- Schließfächer
    - *amenity=lockers*
    - *level=**
    - *indoor=**
- Mülleimer
    - *amenity=waste_basket*
    - *level=**
    - *indoor=**
- Telephonzellen
    - *amenity=telephone*
    - *level=**
    - *indoor=**
- Erste-Hilfe-Einrichtungen
    - *emergency=**
    - *level=**
    - *indoor**
- Informationstafeln
    - *tourism=information*
    - *information=board*
    - *level=**
    - *indoor=**

5.4 Datenerfassung vor Ort

Die erste Entscheidung, die bei der Datenerfassung vor Ort getroffen werden muss, ist jene der Orientierung der Skizze auf dem Schreibblock. Es ist sinnvoll sich die Ausdehnung des jeweils zu skizzierenden Bauwerks im Vornherein auf einer Karte anzusehen. Solche Übersichtskarten, hängen meist in U-Bahn-Stationen aus. Hat die Station beispielsweise eine große West-Ost Ausdehnung, sollte die Skizze auf dem hochformatigen Schreibblock geostet werden, damit sie nicht über seine Ränder hinausragt. Als nächstes muss überlegt werden, ob sich eine Skizze der gesamten Station überhaupt auf einem Blatt ausgeht, oder ob sie auf mehrere Blätter aufgeteilt werden sollte. Dies kann einerseits notwendig sein, wenn die horizontale Ausdehnung der Station so weitläufig ist, dass der Skizzenmaßstab zu klein für die Erfassung aller notwendigen Details werden würde. Andererseits, wenn die vertikale Ausdehnung so groß ist, dass Überlagerungen die etagenspezifische Zuordnung der einzelnen Objekte stark erschweren würden. Die unterirdischen Elemente der U-Bahn-Station Karlsplatz besitzen eine Nord-Süd Ausdehnung von rund 316 Metern und ein West-Ost Ausdehnung von rund 384 Metern. Hinzu kommen fünf Untergeschoße, wodurch zahlreiche Überlagerungen entstehen (Abb. 38). Für dieses komplexe Stationsbauwerk waren vier Skizzenblätter notwendig, um alle Strukturen in einem ausreichenden Detaillierungsgrad erfassen zu können. Drei davon waren geostet und zwei genordet.

Sobald man sich für eine geeignete Aufteilung und Orientierung der Skizze entschieden hat, kann mit der Erfassung begonnen werden. Es ist sinnvoll mit dem am weitesten außen gelegenen Element in einer der Ecken des Skizzenblattes zu beginnen. In Abbildung 38 wurden zwei mögliche Anfangspunkte rot eingekreist. Auch sollten diese Elemente auf Luftbildern zu erkennen sein, um die Georeferenzierung bei der späteren Digitalisierung zu erleichtern. Der nördliche Treppenaufgang neben der Wiener Staatsoper (in Abb. 38 rot eingekreist) bietet sich folglich gut als Ausgangspunkt der Datenerfassung an. Für Treppen und Rolltreppen wird ein standardisiertes Planzeichen verwendet. Hinzu kommen die bedienten Etagen und die Treppenanzahl als numerische Angaben sowie die Bewegungsrichtung von Rolltreppen als Pfeilsignatur (Abb. 39).

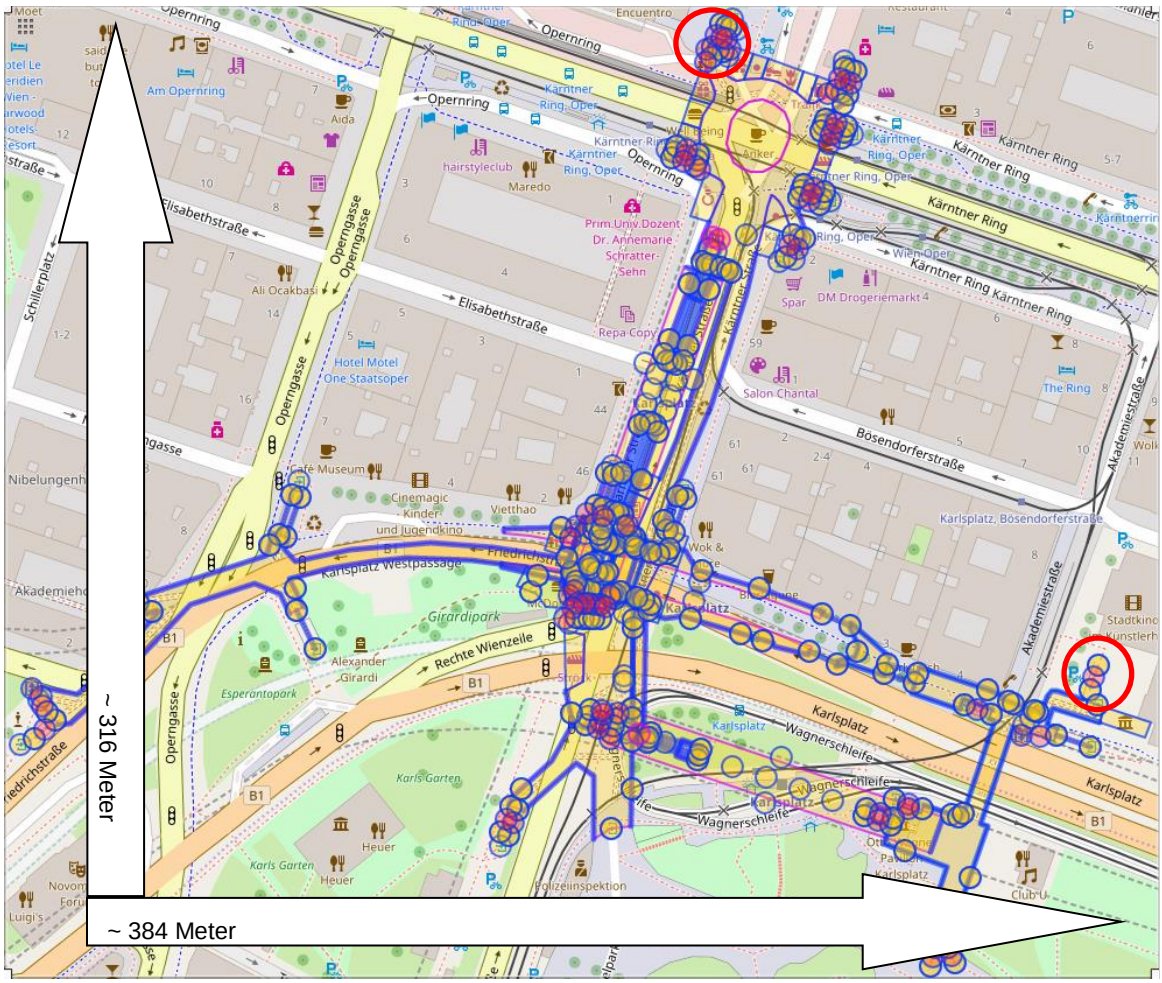


Abb. 38: Horizontale Ausdehnung der U-Bahn-Station Karlsplatz (Overpass Abfrage)

Nachfolgend werden die Begrenzungswände der frei begehbaren Flächen abgegangen und kritische Distanzen per Schrittmaß gemessen. Die Schrittzahl wird neben kleinen Pfeilen, welche die Messrichtung anzeigen, erfasst und der Wandverlauf skizziert. Um den Maßstab einigermaßen konstant zu halten, werden etwa drei Schritte pro Zelle des karierten Skizzenblattes gerechnet. Nachdem die Grundrisse der begehbaren Flächen sowie die Transitionselemente skizziert und alle nötigen Messungen durchgeführt wurden, werden flächenhafte und punkthafte POIs eingefügt. Die Form der flächenhaften POIs ist

dabei von untergeordneter Bedeutung und wird lediglich von außerhalb der Räume abgeschätzt. In das Innere der skizzierten POI Fläche, wird der Name des Betriebs vermerkt, so dieser vorhanden ist. Zugänge werden mit einem „E“, Informationstafeln mit einem „I“, Mülleimer mit einem „M“, Fahrkartenautomaten mit einem „T“, Bankautomaten mit einem „Bk“ und Notfalleinrichtungen mit einem „SOS“ gekennzeichnet. Aufzüge erhalten ein Rechteck für ihren äußeren Umriss und ein „AZ“ zur Kennzeichnung.

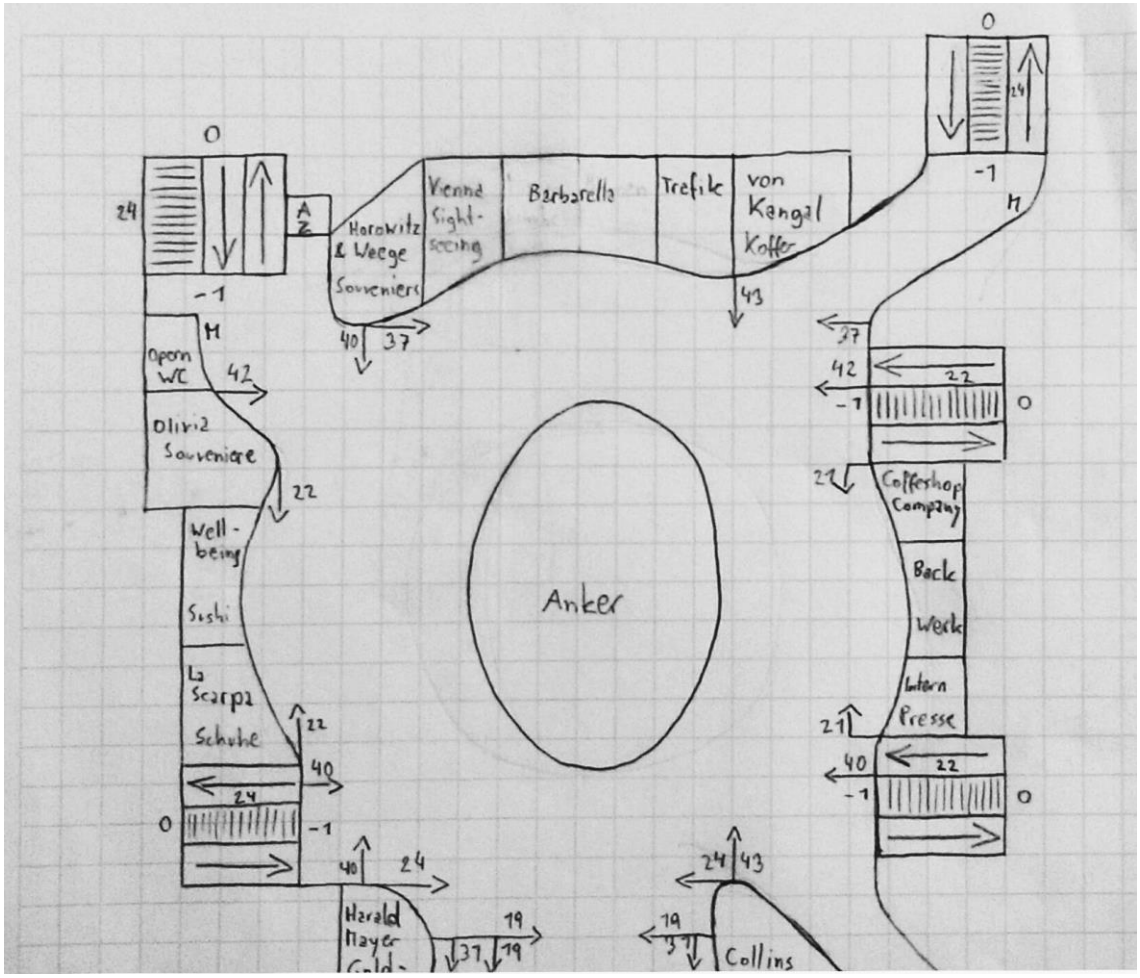


Abb. 39: Skizzenausschnitt der Opernpassage am nördlichen Stationsende

Zusätzlich zur Skizze werden Fotos von der gesamten Station geschossen. Insbesondere die Transitionselemente sind hier von Bedeutung, da durch den Blattwechsel beim Skizzieren, der Zusammenhang der beiden Blätter verloren zu gehen droht. Bei der nachfolgenden Digitalisierung erweisen sich diese Fotos regelmäßig als wichtige Stütze zur Verifikation einzelner Elemente.

Auf diese Weise wird das gesamte Bauwerk abgegangen und skizziert. Stößt man an den Rand des Blattes, muss die Skizze auf einem anderen Blatt fortgeführt werden. Im Idealfall, wurden diese Grenzen bereits bei der Vorbereitung festgelegt. Wenn ein Etagenwechsel stattfindet, muss entschieden werden, ob die darunterliegende Etage auf einem neuen Blatt erfasst werden soll. In den meisten Fällen sind die Überdeckungen so

groß, dass dies notwendig wird. Abbildung 40 zeigt ein Beispiel, in welchem es möglich war Teile des ersten und zweiten Untergeschoßes auf einem Blatt zu erfassen. Die beiden Ebenen des zweiten Untergeschoßes wurden zur besseren Identifizierung rot umrandet. Im Beispiel ist es einfach das erste und zweite Untergeschoß voneinander zu unterscheiden, da die Überschneidungen nur minimal und die erfassten Objekte eindeutig zuordenbar sind. Im Regelfall muss das Untergeschoß jedoch auf einem neuen Blatt skizziert werden.

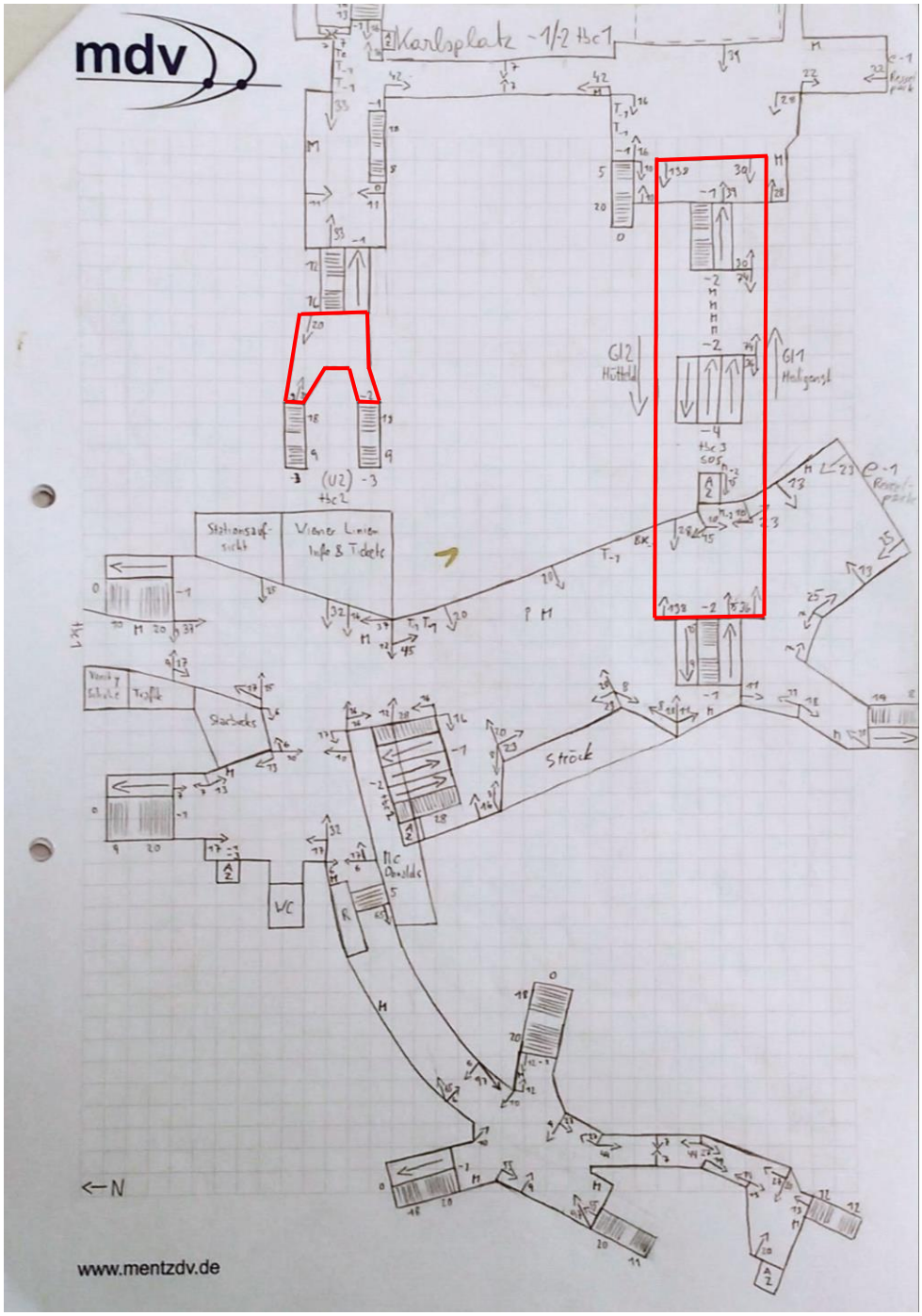


Abb. 40: Geostetes Skizzenblatt mit Elementen des ersten und zweiten Untergeschoßes

Die Erfassungszeit der Station Karlsplatz hat aufgrund ihrer Größe und den vielen Etagen rund acht Stunden betragen. In der Regel ist jedoch weit weniger Zeit notwendig. Eine durchschnittliche U-Bahn Station der Wiener Linien mit zwei Untergeschoßen (eine Verteilerebene und der Bahnsteig) kann in rund zwei Stunden erfasst werden.

5.5 Digitalisierung mit JOSM

Wie in Abschnitt 4.6 bereits erwähnt stehen eine Reihe an Editoren zur Digitalisierung von OSM Daten zur Verfügung. Der am weitesten fortgeschrittene ist JOSM (Java OpenStreetMap). Dieser ist in der Regel auch der Editor der Wahl für erfahrene Mapper. Da er den mit Abstand größten Funktionsumfang bietet, wird er auch hier für die Digitalisierung eingesetzt. Zunächst ist es notwendig, die OSM Rohdaten des zu bearbeitenden Gebiet aus der Datenbank zu laden. Hierfür steht auf der linken Seite der oberen Werkzeugleiste ein Download Button zur Verfügung (rot eingekreist in Abb. 41). Dieser öffnet ein Kartenfenster, in dem ein Kästchen (Bounding Box) aufgezogen werden kann, das den herunterzuladenden Bereich umrahmt (Abb. 41). Mit einem Klick auf „Daten herunterladen“ werden die Rohdaten in das Editierfenster geladen.

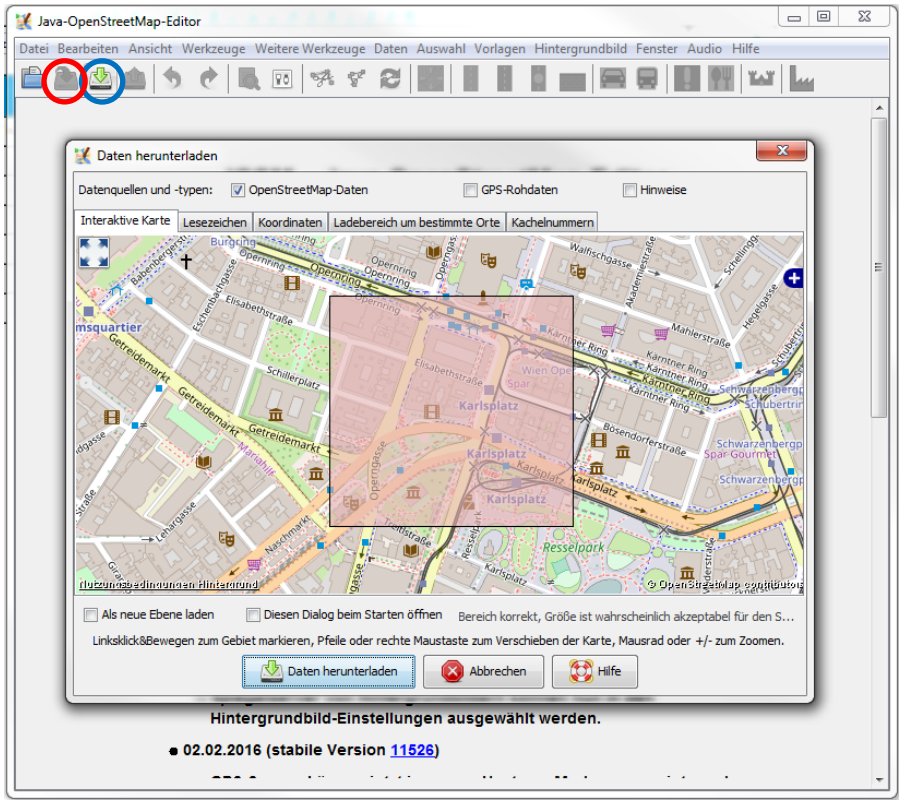


Abb. 41: Auswahl des Bearbeitungsgebiets in JOSM

Die im Editor angezeigten Rohdaten werden in einem eigenen Stil dargestellt. Dieser beruht auf einer MapCSS-Datei (Map Cascading Style Sheets) und kann beliebig angepasst werden. Es existieren eine Reihe an vordefinierten Stilen, die durch Zuordnung der entsprechenden MapCSS-Datei gewählt werden können. Für diese Arbeit wurde der

Standardstil übernommen und einige Aspekte leicht angepasst. So wurden den Wänden, die im Standardstil lediglich als dünne graue Linie dargestellt werden, mit einer höheren Strichstärke sowie einem auffälligen Rosa versehen. Trotz dieser kleinen Anpassungen machen die geladenen Rohdaten zunächst einen recht chaotischen Eindruck, zumal sich das Testgebiet in einem gut kartierten Innenstadtbereich befindet (Abb. 42).

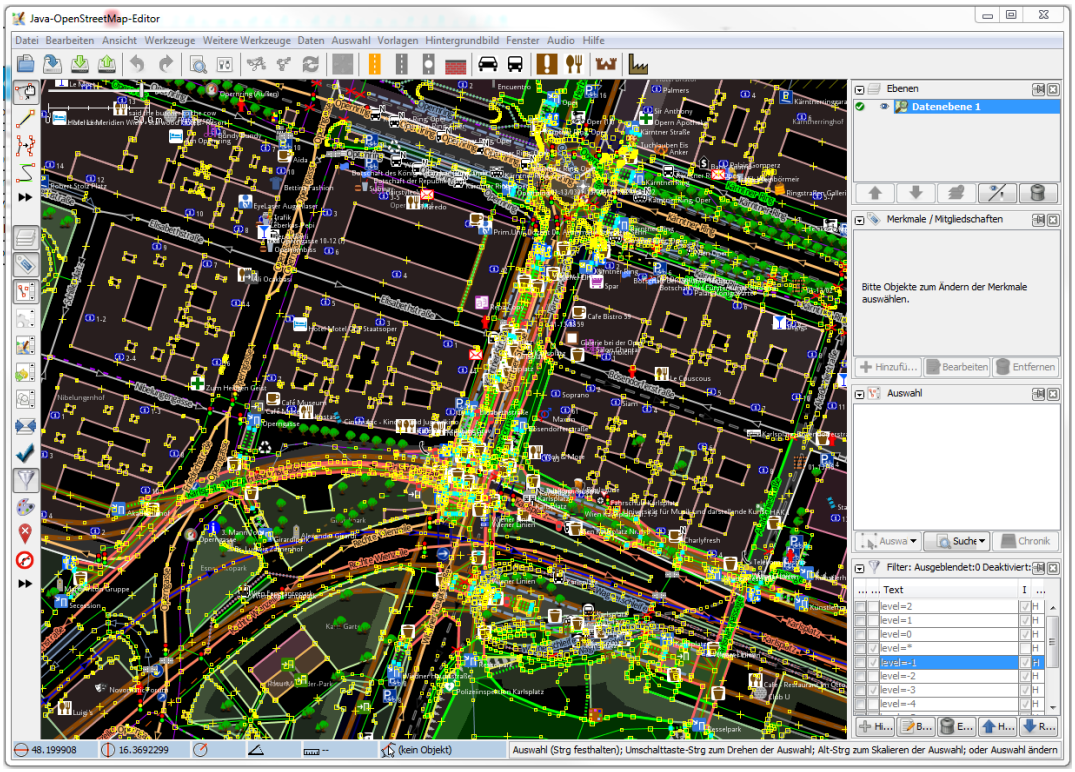


Abb. 42: Rohdaten des gesamten Testgebiets in JOSM

Hier kommt die bereits in 4.6 angesprochene Filterfunktion von JOSM zum Einsatz. Filter können beliebig erstellt und auch kombiniert werden. Durch Setzung des Filters „level=-1“ beispielsweise werden nur Elemente dargestellt, die diesen Tag tragen. Abbildung 43 zeigt, wie sich dieser Filter auf die Darstellung der Opernpassage auswirkt.

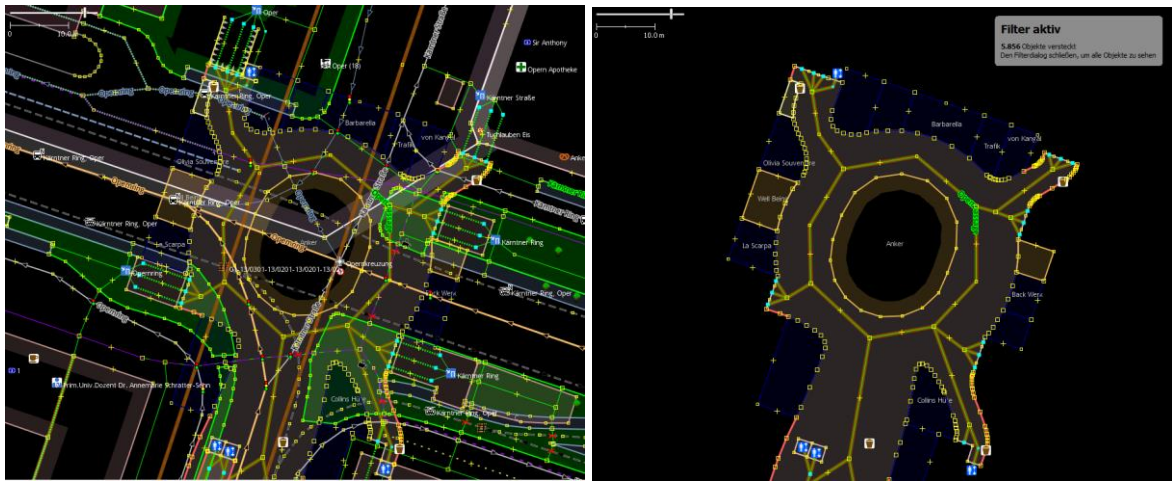


Abb. 43: Links die Opernpassage ohne Filter, rechts mit dem Filter „level=-1“

Für den nächsten Schritt bietet JOSM die Möglichkeit Hintergrundbilder einzublenden. Im Regelfall sind dies Orthophotos von Befliegungen oder Satellitenbilder. Österreich ist in der komfortablen Situation, dass die österreichischen Vermessungsämter solche Fotos im Rahmen von OGD kostenlos als Web Map Service (WMS) zur Verfügung stellen. Daneben gäbe es zwar noch globale Anbieter wie beispielsweise Bing Maps, diese hinken aber in Punkto Qualität, Auflösung und Aktualität deutlich hinterher. Die OGD Orthophotos werden auf basemap.at angeboten, wo auch eine URL (Uniform Resource Locator) für den WMS zu finden ist. Unter dem Reiter „Hintergrundbild“ in den Einstellungen kann diese URL eingefügt werden. Alle Kartenebenen von basemap.at stehen nun als Hintergrundbild zur Verfügung. Neben den Orthophotos ist auch die Grundkarte zu erwähnen, die in Wien einen ausgesprochen hohen Detailgrad aufweist. (BASEMAP)

Mithilfe der Luftbilder muss nun ein Referenzpunkt zur eigenen Skizze identifiziert werden. Hier bietet sich wieder an, den nördlichen Treppenaufgang neben der Staatsoper heranzuziehen. Mittig des oberen Treppenendes kann nun mithilfe des „Punkte setzen“ Werkzeugs eine Linie in Richtung unteren Treppenendes gezogen werden. Die Länge der Linie richtet sich nach der, in der Skizze vermerkten Stufenanzahl. Pro Stufe werden 30 Zentimeter gerechnet. Besitzt die Treppe einen Podest, werden nochmals 150 Zentimeter aufaddiert. Dem neuen Way werden im nächsten Schritt alle entsprechenden Tags zugewiesen. Die zwei Nodes am oberen und unteren Treppenende bekommen jeweils einen level-Tag (*level=0* und *level=-1*). Ebenso wird mit den beiden Rolltreppen links und rechts der Treppe verfahren. Mithilfe von Tastenkombinationen (siehe Abb. 20) lassen sich beliebige Ways anvisieren, zu denen parallel gezeichnet werden kann. Auch der Aufzug, der am nördlichen Ende der Station in die Opernpassage herabführt, kann auf dem Luftbild erkannt werden und durch seinen Umriss und den entsprechenden Tags digitalisiert werden.

Sobald alle Transitionselemente digitalisiert wurden, wird mit dem Zeichnen der Etagenflächen begonnen. Im rechten Winkel zu den (Roll-)Treppen und ausgehend vom unteren Node, wird der erste Linienabschnitt gezeichnet. Winkel und Länge aller folgenden Linienabschnitte werden der Skizze entnommen. Anhand benachbarter, auf dem Orthophoto erkennbarer, Treppenaufgänge kann die Genauigkeit der Erfassung und Digitalisierung der nicht sichtbaren Bereiche überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Abbildung 44 zeigt den nördlichen Zugang zur Opernpassage und das zugrundeliegende Orthophoto nach der Digitalisierung.

Nachdem die begehbaren Flächen der ersten Verteilerebene fertig digitalisiert wurden, kann mit dem Einzeichnen der Wände sowie der flächenhaften und punkthaften POIs fortgefahren werden. Wände werden als Linien über die Außengrenzen der Polygone der Verteilerebenen gezeichnet (rosa Linie in Abb. 44) und punkthafte POIs als Nodes im Grenzverlauf gesetzt (kleines Mülleimer Symbol in Abb. 44). Auch Wege werden erfasst, um ein Fußgängerrouting zu ermöglichen (braun-grüne Linien in Abb. 44). Da das Routing aber nicht Teil dieser Arbeit ist, werden sie hier nicht berücksichtigt. Für die Kreisbögen

der ovalen Opernpassage können spezielle Werkzeuge eingesetzt werden. So gibt es Werkzeuge, mit denen Kreise, Kreisbögen oder Beziér Kurven erstellt werden können.

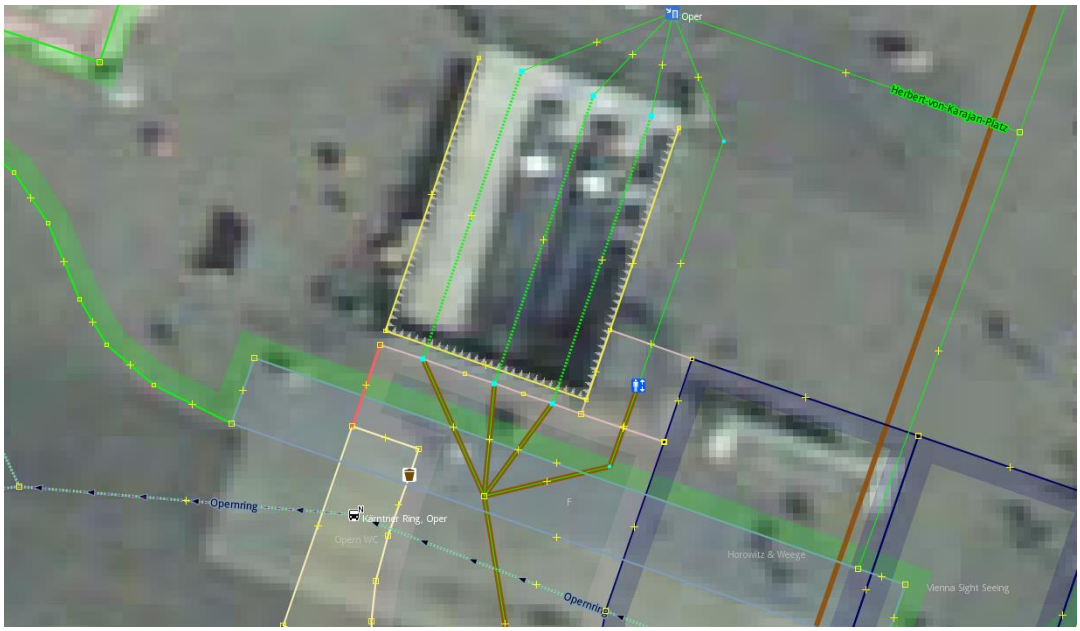


Abb. 44: Nördlicher Zugang zur Opernpassage mit hinterlegtem Orthophoto nach der Digitalisierung

Oft, wie auch im Falle der Opernpassage, muss das digitalisierte Polygon der Verteilerebene in ein Multipolygon umgewandelt werden, da es diverse Aussparungen und Löcher enthält. Der runde, flächenhafte POI in der Mitte der Opernpassage (Anker Bäckerei in Abb. 43 zu erkennen) ist ein solches Beispiel. Zur Erstellung eines Mulitpolygons wird der Relationeneditor geöffnet (per Tastenkürzel oder Drop-Down Menü) und alle beteiligten Objekte (Verteilerebene und flächenhafter POI innerhalb des Polygons) ausgewählt und zur Relation hinzugefügt. Den beteiligten Objekten wird nun entweder die Rolle „outer“, für die Außengrenze (Verteilerebene) oder „inner“, für die Aussparung (flächenhafter POI) zugeteilt. Alle Tags die zuvor an den, zur Relation gehörigen Objekten angebracht waren, werden nun direkt in die Relation verschoben und gelten für alle ihre Mitglieder (Abb. 45). Soll ein zugehöriges Objekt gesonderte Tags erhalten (wie der flächenhafte POI) können diese immer noch lediglich am entsprechenden Way angebracht werden.

Auf diese Weise wird das gesamte Bauwerk erfasst. Im Laufe der Digitalisierung werden immer wieder Anpassungen notwendig sein. Oft kommt es vor, dass man an auf einen, auf dem Orthophoto erkennbaren, Zugang stößt und merkt, dass die Messungen nicht exakt genug waren. Diese Messfehler sollten sich jedoch im Normalfall im Sub-Meter Bereich bewegen und können leicht ausgeglichen werden. Nachdem alle Indoor Elemente digitalisiert wurden, werden die editierten Daten mit dem Upload Button (blau eingekreist in Abb. 41) in die Datenbank eingespeist.

Der gesamte Digitalisierungsprozess dauerte für die Station Karlsplatz in etwa zehn Stunden. Auch hier sind die vielen Etagen und Ausgänge verantwortlich für einen exponentiellen Anstieg des Zeitaufwandes, da die komplexe Gebäudestruktur immer

wieder Anpassungen erforderlich macht. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Digitalisierung einer U-Bahn Station normalerweise in etwa denselben Zeitaufwand benötigt, wie deren Erfassung. Bei einer durchschnittlichen Station der Wiener Linien also ungefähr zwei Stunden.

Nun können die Daten in spezialisierten Karten, wie OpenLevelUp! oder OpenStationMap betrachtet oder zur Weiterverarbeitung in einem GIS oder einer Graphiksoftware verwendet werden. Für diese Arbeit waren die, in diesem Kapitel vorgestellten Arbeitsabläufe, die ersten beiden Prozessschritte zur Erstelllung einer 3D Karte. Es folgt nun der dritte Prozessschritt – die 3D Modellierung. (OpenLevelUp!; OpenStationMap)

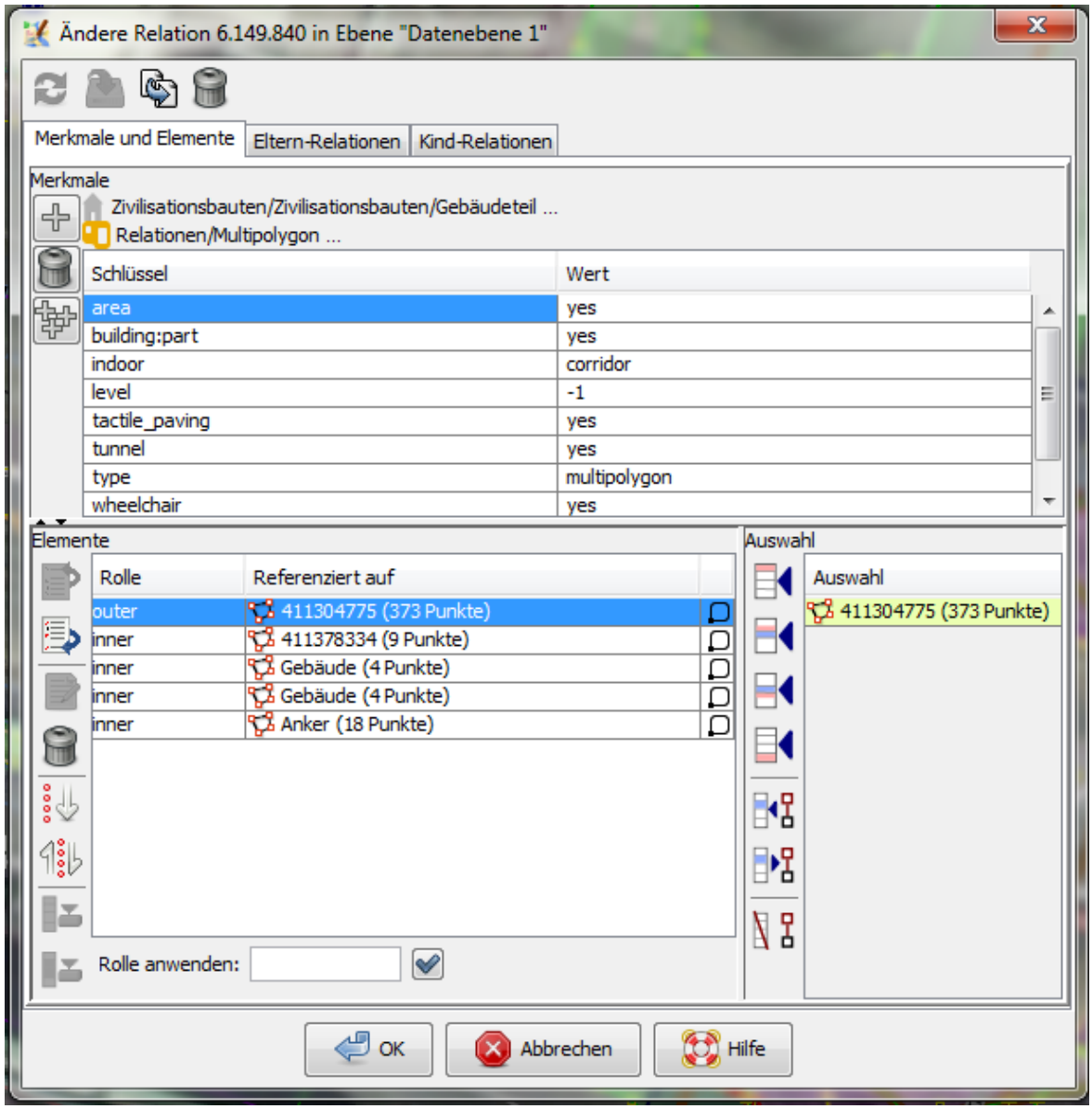


Abb. 45: Der Relationeneditor von JOSM zur Erstellung von Mulitpolygonen

6 3D Modellierung mit Python

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist es, jene Teile des Kartenerstellungsprozesses, die größtenteils redundante Arbeitsschritte enthalten, automatisiert ablaufen zu lassen. Die Modellierung, also jener Prozessschritt, in welchem die Rohdaten in ein dreidimensionales Modell überführt werden, ist ein solcher Prozess. Bei ihm handelt es sich um eine Reihe von Prozessierungsschritten, die den Objekten einerseits Höhenwerte zuweisen, andererseits ihre Geometrien transformieren. Bei den Geometrietransformationen handelt es sich um die bereits angesprochene Umwandlung von Linien in Polygone, bei Wänden, Gleisen und (Roll-)Treppen. Es sind immer gleiche Rechenoperationen, die auf immer gleiche Objekttypen angewandt werden. Der gesamte Prozess ist somit prädestiniert dafür, automatisiert zu werden. Voraussetzung dafür, ist lediglich die attributiv und topologisch korrekte Digitalisierung, wie im fünften Kapitel beschrieben.

Die Automatisierung wurde mittels Python Skript vorgenommen. Python ist eine beliebte Programmier- und Skriptsprache und speziell im GIS Bereich weit verbreitet, da sie sich in Softwarepakete wie ArcGIS oder QGIS gut einbinden lässt. So wurde auch in dieser Arbeit auf Python zurückgegriffen und ein Skript geschrieben, welches die, aus der OSM extrahierten Rohdaten mit wenigen Klicks in fertige 3D Modelle umwandeln sollte. Dies wurde in einer ArcGIS Umgebung realisiert, da ESRI mit „ArcPy“ eine äußerst umfangreiche und stabile Python Bibliothek für Geoprozessierungsarbeiten zur Verfügung stellt. (ARCPY) Die Bibliothek umfasst sämtliche Werkzeuge diverser ArcGIS Programme, die per GUI (Graphical User Interface) in der Toolbox aufgerufen werden können. Durch die Einbindung dieser Werkzeuge in ein Python Skript wird es möglich komplexe Prozesse aneinander zu ketten, Bedingungen zu formulieren und auch externe Skripte zu integrieren.

Ein Nachteil der Entscheidung für ESRI und ArcPy ist die kostenpflichtige Lizenz, die vorausgesetzt wird, um das Skript ausführen zu können. Dies widerspricht der in Forschungsfrage III formulierten Zielsetzung einen kostengünstigen Arbeitsablauf, der für jedermann replizierbar ist, zu entwickeln. Allerdings ist es mit ein wenig Programmierkenntnis möglich das Python Skript auf eine offene Bibliothek wie OGR/GDAL (OpenGIS Simple Features Reference Implementation / Geospatial Data Abstraction Library), PyQGIS oder FIONA umzuschreiben. Das Funktionsprinzip ist entwickelt und wird auf den folgenden Seiten vorgestellt. Dabei werden die wichtigsten Module, die in Codeblöcken organisiert, den größten Teil des etwa 2000 Zeilen langen Skripts ausmachen, erläutert. Es wird in den folgenden Abschnitten versucht das Skript in einer allgemein verständlichen Weise funktional zu gliedern und die einzelnen Funktionsprinzipien zu beschreiben. Bevor das Skript jedoch ausgeführt werden kann, sind ein paar wenige Arbeitsschritte notwendig, die aufgrund von Limitierungen von ArcPy manuell ausgeführt werden müssen. Die Erläuterung dieser Schritte erfolgt im ersten Abschnitt.

6.1 Datenextraktion und manuelle Aufbereitung

Als Ausgangsdatensatz benötigt das Skript drei Shape-Dateien, für Punkte, Linien und Flächen sowie ein DGM im ESRI Grid-Format. Da die Overpass API Daten nur als GeoJSON, KML (Keyhole Markup Language) oder im OSM eigenen XML-Format exportieren kann, müssen diese erst konvertiert werden. Unverständlicherweise bietet ArcPy keine Funktion, um Daten aus diesen weit verbreiteten Formaten in das hauseigene Shape-Format zu konvertieren. Auf entsprechenden Plattformen im Internet werden einige Skripte angeboten, die behaupten das tun zu können, allerdings greifen diese wiederum auf andere Bibliotheken zu, die erst integriert werden müssten. Da weitere Dependenzen vermieden werden sollen, wurde in diesem Fall auf eine externe Skriptlösung verzichtet. Stattdessen lassen sich die Daten mit wenigen Klicks, manuell in QGIS konvertieren.

Wie in Abschnitt 4.8 bereits erwähnt, werden die angefragten Daten von der Overpass API als FeatureCollection in einer GeoJSON-Datei zurückgegeben. Darin enthalten sind sämtliche Geometrien, sowohl Punkte als auch Linien und Flächen. Overpass Turbo bietet eine nutzerfreundliche GUI mit Kartenfenster, um Abfragen (Querys) zu schreiben, sich die Daten darstellen zu lassen (siehe Abb. 38) und herunterzuladen. Die Query wird dabei in einer applikationseigenen Sprache geschrieben, die weitreichende Differenzierungen nach zeitlichen, räumlichen und semantischen Kriterien zulässt. (OVERPASS TURBO; OPENSTREETMAP WIKI F) Über das Aufziehen einer Bounding Box wird der Bereich definiert, in welchem Daten abgefragt werden sollen. Um die gewünschten Daten zu erhalten, wird der level-Tag instrumentalisiert. Alle Objekte des Bauwerks tragen einen solchen, während er bei anderen Objekten, die sich in der Nähe befinden, kaum auftritt. Damit dient er, in Kombination mit einem weiteren Tag, gut zur Abgrenzung von anderen Daten innerhalb der Bounding Box. Die gesamte Query sieht wie folgt aus:

```
1   [out:json][timeout:25];
2   (
3     node["level"]({{bbox}});
4     way["highway"="steps"]["level"]({{bbox}});
5     way["area"="yes"]["level"]({{bbox}});
6     way["barrier"="fence"]["level"]({{bbox}});
7     way["barrier"="wall"]["level"]({{bbox}});
8     way["indoor"="wall"]["level"]({{bbox}});
9     relation["area"="yes"]["level"]({{bbox}});
10  );
11  out body;
12  >;
13  out skel qt;
```

In der ersten Zeile wird das Datenformat und eine Zeitbegrenzung für den Abfragevorgang definiert. In der dritten bis zur neunten Zeile wird erst der Geometrietyp, danach Tags, nach denen gefiltert werden soll und zum Schluss die Bounding Box als

räumliche Begrenzung festgelegt. Dabei sind alle Nodes, die einen level-Tag tragen relevant. Das sind zum einen punkthafte POIs, zum anderen die oberen und unteren Nodes der (Roll-)Treppen, die ebenfalls einen level-Tag tragen. Zu den Ways zählen einerseits die (Roll-)Treppen, andererseits Aufzüge, flächenhafte POIs und jene Verteilerebenen und Bahnsteige, die nicht als Relation erfasst wurden. Die Tags „highway=steps“ und „area=yes“ in Kombination mit dem level-Tag kommen fast ausschließlich beim Indoor Mapping vor. Somit kann ausgeschlossen werden, dass überflüssige Daten selektiert werden. Zu den Ways zählen außerdem noch die Mauern, die in der Regel mit dem Tag „indoor=wall“ vorliegen. In seltenen Fällen (nicht im Falle der U-Bahn-Station Karlsplatz) liegen die gesuchten Mauern jedoch außerhalb des Gebäudes, wo sie als „barrier=wall“ oder „barrier =fence“ erfasst werden. Zu guter Letzt werden noch all jene Flächenobjekte selektiert, die als Multipolygon in einer Relation erfasst wurden.

Sobald die Daten erfolgreich exportiert und als GeoJSON-Datei in ein Verzeichnis abgelegt wurden, können sie in QGIS geladen werden. Hier ist es ein leichtes sie per Links-Klick in einem anderen Format abzuspeichern. Für Punkt, Linie und Polygon wird jeweils eine eigene Shape-Datei erstellt.

Neben den Shape-Dateien wird noch ein geeignetes DGM benötigt. Es gibt eine Vielzahl an potentiellen Quellen für das DGM. Sie werden in unterschiedlichsten Formaten und mit unterschiedlichen Raumbezügen sowie Projektionen angeboten. Da es schwierig ist dieser Vielfalt regelbasiert im Skript beizukommen, wird der folgende Arbeitsschritt ebenfalls manuell ausgeführt. Im Falle des Karlsplatzes wird das DGM, wie bereits in Abschnitt 4.7 erwähnt, von der Wiener Stadtvermessung im GeoTIFF-Format bezogen. Es liegt im österreichischen Landeskoordinatensystem Gauß-Krüger M34 (EPSG:31256) vor und muss mit dem „Project Raster“-Tool in ArcGIS nach Web Mercator (EPSG:3857) umprojiziert werden. Bei diesem Vorgang wird es automatisch in das ESRI Grid-Format konvertiert. Die Daten liegen nun im richtigen Format vor, sodass sie als Parameter an das Skript übergeben werden können.

6.2 Datenklassifikation

Die ersten beiden Funktionen spalten zwei der Shape-Dateien (Linien und Polygone) nach Typ und Etage (Level) auf. Es handelt sich um zwei Module mit analoger Funktionsweise, die nacheinander ausgeführt werden. Zunächst müssen den Shape-Dateien jedoch die neuen Attribute „type“, „level“ und „level_name“ zugewiesen und befüllt werden. Ein kurzer Codeblock, der sich in die „*arcpy.CalculateField_management*“-Funktion integrieren lässt, weist den einzelnen Objekten (Features) einen Typ und ein Level zu. Features mit dem Attribut „elevator“ in der Spalte „building:part“ erhalten beispielsweise das Attribut „elevator in der neuen Spalte „type“. Features mit dem Attribut „room“ in der Spalte „indoor“ erhalten das Attribut „POI“ in Spalte „type“. Linien-Features mit dem Attribut „steps“ in der Spalte „highway“ und keinem Wert in der Spalte „step_count“ erhalten das Attribut „escalator“ in der Spalte „type“ und so weiter. Punkt-Features werden zunächst nicht berücksichtigt.

Die Level-Klassifikation erfolgt, analog zur Typen-Klassifikation, einerseits numerisch in der neuen Spalte „level“, andererseits wird die Klassifikation in der ebenfalls neuen Spalte „level_name“ ausformuliert, damit sie später dem Dateinamen angefügt werden kann. Dieser erlaubt kein Minus-Zeichen („-“), weswegen dieses durch ein „m“ ersetzt werden muss. Punkt-Zeichen („.“), die bei Dezimalzahlen für die Angabe von Zwischenetagen bei Treppenpodesten verwendet werden, müssen ebenso durch einen Unterstrich („_“) umgeformt werden. Außerdem muss das Semikolon, das die Level der Transitionselemente voneinander trennt, durch „___TO___“ ersetzt werden. Dabei werden immer nur das unterste und oberste Level angegeben. Die Etagen dazwischen, die beispielsweise von Aufzügen bedient werden, entfallen in der ausformulierten Level-Angabe also. Der Codeblock, der die numerische Level-Angabe umformt und ausformuliert sieht wie folgt aus:

```
1    def manipulate(var):
2        if ";" in var:
3            first = var.rsplit(";",8)[0]
4            last = var.rsplit(";",8)[-1]
5            if "." in first:
6                first = first.rsplit(".",2)[0] + "_" + first.rsplit(".",2)[-1]
7            if "." in last:
8                last = last.rsplit(".",2)[0] + "_" + last.rsplit(".",2)[-1]
9            if "-" in first and "-" in last:
10               name = "m" + first[1:] + "___TO___" + "m" + last[1:]
11               return name
12           elif "-" in first and "-" not in last:
13               name = "m" + first[1:] + "___TO___" + last
14               return name
15           elif "-" not in first and "-" not in last:
16               name = first + "___TO___" + last
17               return name
18       else:
19           if "." in var:
20               var = var.rsplit(".",2)[0] + "_" + var.rsplit(".",2)[-1]
21           if "-" in var:
22               name = "m" + var[1:]
23               return name
24           else:
25               name = var
26               return name
```

Für die neu erstellten Attribute „type“ und „level_name“ werden nun leere Listen erzeugt, die später mit den unterschiedlichen Typen beziehungsweise ausformulierten Levels befüllt werden. Durch das „set“-Argument wird sichergestellt, dass jedes Attribut nur einmal in die Liste geschrieben wird. Nun wird in einer neuen Variable die

„*arcpy.SearchCursor*“-Funktion aufgerufen, die für jedes Feature der Shape-Datei sämtliche Attribute in einer Tabellenzeile erfasst. Als nächstes kann durch die einzelnen Zeilen der eben erstellten Tabelle iteriert werden und jeweils das „type“- beziehungsweise das „level_name“-Attribut in die entsprechende Liste geschrieben werden. Für jedes Element der Typen-Liste wird nun mithilfe der „*arcpy.Select_analysis*“-Funktion eine neue Feature-Klasse mit dem entsprechenden Attributwert als Namen erstellt und in einer Geodatenbank (ESRI Geodatabase) abgelegt. Diese nach Typ klassifizierten Feature-Klassen werden nun ihrerseits nach ihrem Wert in der „level_name“-Spalte aufgetrennt, wobei das ausformulierte Level durch drei Unterstriche („___“) separiert, an das Ende des Namens der jeweiligen Feature-Klasse gehängt wird.

Nach dem Durchlauf dieser beiden Module liegen die Polygon- und Linien-Objekte differenziert nach Typ und Level als Feature Klassen in einer Geodatabase vor. Es ergeben sich sieben Typen-Klassen („elevator“, „POI“, „area“, „escalator“, „stairs“, „wall“ und „fence“), die ihrerseits noch nach ihrer Etage aufgespalten sind. Schließlich werden alle Feature-Klassen, einschließlich der Punkt-Features von dem Bezugssystem WGS84 (EPSG:4326) nach Web Mercator (EPSG:3857) umprojiziert.

6.3 Höhenpunkte und -differenzen

Um mit den nächsten Modulen fortfahren zu können, muss zunächst das DGM aufbereitet werden. Da sich die Höhenwerte des DGMs der MA41 auf das Wiener Null beziehen, muss erst ein konstanter Wert aufaddiert werden, um die Höhe über dem Meeresspiegel zu erhalten. Das Wiener Null bezieht sich auf den mittleren Pegelstand des Donaukanals bei der heutigen Schwedenbrücke. Er befindet sich 156,68 Meter über dem Nullpunkt der Adria bei Triest, den das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen als Bezugspunkt heranzieht (WIENER STADTVERMESSUNG B). Dieser Wert muss also jeder Zelle des DGMs aufaddiert werden, um vergleichbare Höhenwerte zu erlangen. Der nächste Schritt ist es, Höhenpunkte abzuleiten, die zur Berechnung der Etagenhöhen herangezogen werden können.

Hierzu wird das „*arcpy.ExtracMuliValuesToPoints_sa*“-Werkzeug aufgerufen. Dieses ermöglicht es, die Höhenwerte einer DGM-Zelle in eine neue Spalte jener Features einer Punkt-Feature-Klasse zu schreiben, die von dieser Zelle umschlossen werden. Als nächstes müssen die, durch Treppen und Rolltreppen entstehenden Höhenunterschiede ermittelt werden. Für sämtliche Treppen-Elemente wird hierzu das Attribut „step_count“ mit 0,15 multipliziert und in eine neue Spalte „height_dif“ geschrieben. Diese Rechenoperation geht davon aus, dass eine Stufe eine standardisierte Höhe von 15 Zentimetern besitzt, was, zumindest in Wien auch der Fall ist. Die gesamte, von der Treppe beschriebene vertikale Differenz, kann also durch die Stufenanzahl und die Höhe der einzelnen Stufen ermittelt werden. Der Höhenunterschied einer Rolltreppe kann nicht so genau bestimmt werden. Die geometrische Genauigkeit der Erfassung übt dabei einen großen Einfluss aus, wodurch der Fehlergrad steigt. Aus Mangel an einer genauen Berechnungsgrundlage, wie der Stufenanzahl, muss auf die Länge der Linie zurückgegriffen werden. Rolltreppen besitzen

einen Neigungswinkel zwischen 27 und 35 Grad. Wenn man von einem mittleren Neigungswinkel von 30 Grad ausgeht, ergibt sich eine Konstante von 3,7, durch die die horizontale Länge einer Rolltreppe dividiert werden muss, um ihre Höhe beziehungsweise vertikale Differenz, die sie überwindet, zu erhalten.

Die so berechneten Höhenunterschiede müssen nun an die betreffenden Höhenpunkte übergeben werden. Das sind in erster Linie jene Punkte, die das obere und untere Ende der (Roll-)Treppen bilden. Das „*arcpy.SpatialJoin_analysis*“-Werkzeug (Spatial Join) ermöglicht es, die Attribute zweier Features, abhängig von ihrer räumlichen Beziehung zueinander, zu übertragen. Die Funktion kann also dazu genutzt werden, um jenen Punkt-Features, welche die Liniengeometrien der (Roll-)Treppen schneiden, Attribute von diesen zuzuweisen. An sämtliche Höhenpunkte, die eine Treppe oder Rolltreppe schneiden, wird demnach das Attribut „height_dif“ und „level_name“ (wird in „transition“ umbenannt, da „level_name“ bereits vorhanden ist) übertragen. Neben der Geländehöhe und dem Level eines Höhenpunktes, kann nun also auch die Höhendifferenz und die bedienten Level der angrenzenden (Roll-)Treppe aus seinen Attributen entnommen werden. Schließlich wird den Höhenpunkten eine neue Spalte „Altitude“ zugefügt, die in weiterer Folge zur Berechnung der endgültigen Höhe dienen soll. Jenen Höhenpunkten, die auf Level Null liegen, wird der Höhenwert des DGMs in diese neue Spalte übertragen.

6.4 Berechnung der Etagenhöhen

Für die Berechnung der Etagenhöhe wurde ein Modul geschrieben, das alle, in den Höhenpunkten vorhandenen Level einmalig in eine leere Liste schreibt. Danach wird eine Schleife in Gang gesetzt, die für jedes Level, eine Liste „AllValues“ mit allen Werten der Spalte „Altitude“, der entsprechenden Punkt-Feature-Klasse anlegt. „AllValues“ enthält einen Eintrag für jedes Punkt-Feature des entsprechenden Levels, unabhängig davon, ob dieses bereits einen Wert in der Spalte „Altitude“ hat, oder nicht. Es werden nun wiederrum zwei neue Listen erstellt. Die eine („NotNull“) erhält einen Eintrag für jedes Feature mit „Altitude“-Wert, die andere („Null“) einen Eintrag für jedes Feature mit leerem „Altitude“-Feld. Der folgende Prozess wird ausgeführt, wenn die Liste „NotNull“ ein Drittel der Länge der Liste „Null“ aufweist. Mit anderen Worten: Wenn ein Drittel der Höhenpunkte eines Levels einen absoluten Höhenwert im Feld „Altitude“ haben, wird die Berechnung der Höhe dieser Etage in Gang gesetzt. Da es sich hier um eine essentielle Funktion im Skript handelt, hier der Code-Ausschnitt:

```
1       rows = arcpy.SearchCursor(heightPoints)
2       row = rows.next()
3       levels=set([])
4
5       while row:
6          levels.add(row.level_name)
7          row=rows.next()
8
```

```
9       for level in levels:
10
11        WhereClause = """level_name = """ + "'" + level + "'"
12        AllValues = []
13
14        for row in arcpy.da.SearchCursor(heightPoints, "altitude", WhereClause):
15            AllValues.append(row[0])
16
17        NotNull = [item for item in AllValues if item is not None]
18        Null = [item for item in AllValues if item is None]
19
20        if len(NotNull) >= round((len(Null)/100)*3.33):
```

Da im ersten Durchgang der Schleife lediglich die Höhenpunkte des Erdgeschosses über einen „Altitude“-Wert verfügen, wird folgender Prozess zunächst nur für diese in Gang gesetzt. Zu Beginn dieses Prozesses wird eine neue Schleife aufgerufen, die durch alle Verteilerebenen (Feature-Klasse „area“) iteriert und jenes heraussucht, bei welchem das Level jenem der eben selektierten Punkt-Feature-Klasse entspricht. Da im ersten Durchgang nur die Punkt-Feature-Klasse des Levels Null selektiert werden kann und es beim Karlsplatz keine entsprechende Ebene Null gibt, tritt ein alternativer Prozess in Kraft. Dabei wird ein Codeblock an das „*arcpy.CalculateField_management*“-Werkzeug übergeben, der in der Spalte „Altitude“ Höhen für jene Punkte berechnet, die über eine (Roll-)Treppe mit dem Erdgeschoß verbunden sind. Da die „Transition“-Spalte des Punkt-Features die ausformulierte Levelangabe (z.B. „-1___TO___0“) der bedienenden (Roll-)Treppe enthält, können diese ermittelt werden. Steht beispielsweise „-1“ am Beginn dieser Levelangabe und befindet sich der Punkt selbst nicht im Erdgeschoß, wird der vertikale Differenzwert der bedienenden (Roll-)Treppe vom DGM-Wert abgezogen und in die Spalte „Altitude“ geschrieben. Zum besseren Verständnis ist hier der Codeausschnitt zur Berechnungsfunktion angeführt:

```
1   codeblock_calcAlt = """def calcAlt(DEM, HeightDif, Transition, referenceLevel, Altitude):
2     if Transition.rsplit('___TO___', 1)[0] == """ + "'" + str(level) + "'" + """ and
3   referenceLevel != """ + "'" + str(level) + "'" + """:
4       return DEM + HeightDif
5     elif Transition.rsplit('___TO___', 1)[1] == """ + "'" + str(level) + "'" + """ and
6   referenceLevel != """ + "'" + str(level) + "'" + """:
7       return DEM - HeightDif
8     else:
9       return Altitude"""
10
11  arcpy.CalculateField_management(FeatureClass_Escalatorpoint, "altitude", "calcAlt( !dem!,
12  !height_dif!, !transition!, !level_name!, !altitude!)", "PYTHON_9.3", codeblock_calcAlt)
```

Da sich nun Werte in der „Altitude“-Spalte jener Punkte befinden, die mit dem Erdgeschoss verbunden sind, kann zurück zum Anfang des Moduls gesprungen werden. Dies wird dadurch ermöglicht, dass durch eine Abfrage („while“-Schleife“) das gesamte Modul so lange wiederholt, bis jedes Feature einen Wert in der „Altitude“-Spalte vorweist. Bei der neuerlichen Ausführung des Moduls wird nun erkannt, dass auch die Punkte des ersten Untergeschosses (level -1) zu über einem Drittel über einen „Altitude“-Wert verfügen. Während durch die Area-Feature-Klassen (Verteilerebenen) iteriert wird, wird außerdem erkannt, dass es eine entsprechende Feature-Klasse zu den eben selektierten Punkten gibt.

Es wird nun eine temporäre Punkt-Feature-Klasse erstellt, indem die ursprünglichen Punkte des entsprechenden Levels mit den Höhenpunkten desselben Levels verschnitten werden. Die neue Feature-Klasse erhält damit die „Altitude“-Werte der Höhenpunkte. Als nächstes wird ein weiterer Spatial Join („*arcpy.SpatialJoin_analysis*“) zwischen der neu erstellten, temporären Punkt-Feature-Klasse und der Area-Feature-Klasse durchgeführt. Dabei wird der Mittelwert aller „Altitude“-Werte an die neue, aus dem Spatial Join hervorgehende Area-Feature-Klasse gehängt. Die temporäre Punkt-Feature-Klasse kann nun gelöscht werden. Es wird ein weiterer Spatial Join durchgeführt, in welcher die Area-Feature-Klasse die gemittelten Höhenwerte wieder an die Höhenpunkte zurückgibt. Der bereits auf der vorherigen Seite angeführte Codeblock zur Höhenberechnung der, durch (Roll-)Teppen mit der neuen Area-Feature-Klasse verbundenen Punkte, wird erneut ausgeführt. Höhenpunkte, die über eine (Roll-)Treppe mit dem eben berechneten Verteilerebenen verbunden sind (z.B. Höhenpunkte der Ebene -2), verfügen damit ebenfalls über „Altitude“-Werte.

Im letzten Schritt dieser Schleife wird jene Liste, die sämtliche „Altitude“-Werte der Höhenpunkte sammelt und von der abhängt, ob das Modul weiterhin wiederholt wird, geleert und mit den neuen Werten der aktualisierten Höhenpunkte wieder befüllt. Da sich in der aktualisierten Liste immer noch Features mit leerer „Altitude“-Spalte befinden, wird das Modul von Neuem gestartet und die Höhenwerte der nächsten Etage berechnet. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis jeder Höhenpunkt über einen Wert in der „Altitude“-Spalte verfügt und damit die Höhe aller Verteilerebenen bestimmt wurde.

Im nächsten Modul werden die ermittelten Höhen der einzelnen Verteilerebenen (Area-Feature-Klassen) an alle anderen Features des jeweiligen Levels übertragen. Dies wird ein weiteres Mal mit einem Spatial Join bewerkstelligt. Dabei wird wiederrum durch die einzelnen Feature-Klassen iteriert und die, per Level zusammengehörigen selektiert und an die Funktion übergeben. Flächenhafte POIs, Aufzüge, Wände und die originalen Punkt-Feature-Klassen erhalten auf diese Weise einen „Altitude“-Wert. Die neuen, höhenbestimmten Feature-Klassen behalten dabei nur die wichtigsten Attribute, wie „level“ und „altitude“. Flächenhafte und punkthafte POIs behalten darüber hinaus jene Attribute, die ihren Typ spezifizieren, um diesen später bei der Symbolisierung zuordnen zu können.

Eine Art Spezialfall bilden, neben den anderen beiden Transitionselementen auch die Aufzüge. Diese benötigen neben der Höhe der untersten Etage, auch die vertikale

Differenz, die sie auf der Fahrt in die oberste Etage überwinden. Hierzu wird eine Schleife gestartet, die per Abgleich mit der ausformulierten Levelangabe die Punkt-Feature-Klasse der obersten, bedienten Etage ermittelt. Sodann wird ein Spatial Join durchgeführt, bei dem die Aufzugs-Features jenen „Altitude"-Wert des nächstgelegenen Punkt-Features des entsprechenden Levels erhalten. Die Höhendifferenz des Aufzugs kann nun durch die Subtraktion des oberen vom unteren „Altitude"-Wert berechnet und in einer eigenen Spalte abgelegt werden.

6.5 Geometrische Transformationen

Nach dem Durchlauf der eben beschriebenen Module verfügen nun alle Objekte, außer den Treppen und Rolltreppen über ihre endgültigen Höhenwerte. Der nächste Schritt ist es, aus den (Roll-)Treppen, die noch immer als Linien-Features vorliegen, einzelne Stufenpolygone zu berechnen und Höheninformationen zu interpolieren. Ebenso müssen Wände zu Polygonen umgerechnet werden. Zur Transformation der (Roll-)Treppen müssen die Linien zunächst anhand ihrer Stufenanzahl aufgespalten werden. Hierzu wurde ein externes Skript integriert, welches Linien anhand eines Distanzwertes teilt, oder in eine vordefinierte Anzahl von Segmenten spaltet. Das Skript, namens „*feature_line_split*" ist auf Github zu finden und steht unter der Apache Lizenz (GITHUB FEATURELINESPLIT).

Das Modul, in welches das externe Skript integriert wurde führt zunächst zwei Spatial Joins durch. Zuerst werden alle Treppengeometrien mit jenen Punkten vereint, die sie am unteren Ende schneiden. Es werden die Attribute „level", „step_count", „width" und „height_dif" des Treppen-Features sowie „altitude" vom Punkt-Feature übernommen. Letzteres wird im vereinten Linien-Feature als „altitude_lower" bezeichnet. Der zweite Spatial Join vereint das neu berechnete Treppen-Feature nun mit den Punkten, die ihr oberes Ende schneiden. Alle oben genannten Attribute werden beibehalten und neu hinzu kommt die „altitude"-Spalte des Punkt-Features, die in „altitude_upper" umbenannt wird.

Mit dem „*arcpy.CalculateField_management*"-Werkzeug wird die „height_dif"-Spalte, welche die Höhendifferenz der Treppe angibt, neu berechnet indem „altitude_upper" von „altitude_lower" abgezogen wird. Dies ist notwendig, da sich die Höhenwerte, im Zuge der Mittelung der Höhendifferenzen, leicht geändert haben und nicht mehr exakt der Stufenanzahl mal 15 Zentimeter entsprechen. Auch die „width"-Spalte wird neu berechnet indem der Wert durch zwei geteilt wird. Da dieser Wert beidseitig der Linie zur späteren Buffer-Berechnung herangezogen wird, wird nur die Hälfte des Wertes benötigt. Als nächstes wird ein neues Attribut, namens „height_segment", angelegt. Die Spalte, welche die Höhe jeder einzelnen Stufe enthalten soll, wird befüllt indem die neu berechnete Höhendifferenz durch die Anzahl der Stufen dividiert wird. Nun kann das externe Skript „*feature_line_split*" ausgeführt werden, wobei die Anzahl der Stufen definiert, wie oft die Linie geteilt werden soll. Danach wird das „*arcpy.Buffer_analysis*"-Werkzeug ausgeführt, das einen Buffer um jedes Treppensegment auf Grundlage des „width"-Attributs erzeugt.

Die geometrische Transformation der Rolltreppen läuft weitestgehend analog zu jener der Treppen ab. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Rolltreppen kein „step_count“-Attribut besitzen. Dieses wird berechnet, indem die Länge des Linien-Features durch 40 Zentimeter dividiert und das Resultat gerundet wird. Danach werden die Linien-Features anhand dieses Resultates aufgespalten und die einzelnen Segmente gebuffert. Jedes der neu berechneten Stufen-Polygon-Features enthält nun ein Attribut, das Auskunft über die relative Höhe der einzelnen Stufe gibt. Damit kann zum nächsten Modul übergegangen werden, in dem die absoluten Höhenwerte über dem Meeresspiegel für jede einzelne Stufe berechnet werden. Zur besseren Verständlichkeit, wird hier das gesamte Modul angeführt und die einzelnen Schritte erklärt:

```
1   def stepHeight():
2     fcTransitions = arcpy.ListFeatureClasses("buffer_*","","")
3     for fcTransition in fcTransitions:
4       uniVal = []
5       arcpy.AddField_management(fcTransition, "ALTITUDE", "DOUBLE", "", "", "", "",
6   "NULLABLE", "NON_REQUIRED", "")
7       point = (str(Geodatabase) + "\\alt_points___" + fcTransition.rsplit('___', 4)[1])
8       fcTransition_lyr = "lyr_" + fcTransition
9       arcpy.MakeFeatureLayer_management(fcTransition, fcTransition_lyr)
10      for row in arcpy.da.SearchCursor(fcTransition_lyr, "TARGET_FID"):
11        if row not in uniVal:
12          uniVal.append(row)
13      for n in uniVal:
14        wc = "TARGET_FID = " + str(n[0])
15        arcpy.SelectLayerByAttribute_management(fcTransition_lyr, "NEW_SELECTION", wc)
16        arcpy.SelectLayerByLocation_management(fcTransition_lyr, "BOUNDARY_TOUCHES",
17  point, "", "SUBSET_SELECTION")
18        arcpy.CalculateField_management(fcTransition_lyr, "ALTITUDE", "!altitude_lower! +
19  !height_segment!", "PYTHON_9.3")
20        steps = arcpy.da.SearchCursor(fcTransition_lyr, ['step_count', 'ALTITUDE',
21  'height_segment'])
22        for step in steps:
23          for i in range(2, int(step[0]+1)):
24            arcpy.SelectLayerByLocation_management(fcTransition_lyr, "INTERSECT",
25  fcTransition_lyr, "", "NEW_SELECTION", "")
26            cb_excludeNull = """def excludeNull(Altitude, lowAlt, heightSeg):
27              if Altitude is None:
28                return lowAlt + (""" + str(i) + """ * heightSeg)
29              else:
30                return Altitude"""
31            arcpy.CalculateField_management(fcTransition_lyr, "ALTITUDE",
32  "excludeNull(!ALTITUDE!, !altitude_lower!, !height_segment!)", "PYTHON_9.3",
33  cb_excludeNull)
```

Zu Beginn des Moduls wird eine Schleife aufgerufen, die durch alle (Roll-)Treppen-Feature-Klassen iteriert. Diese Feature-Klassen bestehen aus den einzelnen Stufen-Features, die wiederrum zu je einer (Roll-)Treppe gehören. Jeder dieser Feature-Klassen wird eine neue Spalte – „altitude“ – hinzugefügt, welche mit dem endgültigen Höhenwert befüllt werden soll. Außerdem wird jede Feature-Klasse in einen „Feature-Layer“ konvertiert und eine leere Liste („uniVal“) zur Sammlung der einzelnen (Roll-)Treppenobjekte angelegt. Diese Konvertierung in einen Feature-Layer ist notwendig, um später das „*arcpy.SelectLayerByAttribute_management*“-Werkzeug ausführe zu können. Im nächsten Schritt wird mithilfe eines Search Cursors („*arcpy.da.SearchCursor*“) das Attribut „TARGET_FID“ einmalig in die eben erstellte Liste „uniVal“ geschrieben. Dieses Attribut wird von ArcGIS automatisch vergeben und identifiziert das Ziel-Feature eines Spatial Join. Es kann somit zur Identifizierung der (Roll-)Treppe, der die einzelnen Stufen angehören, herangezogen werden. Die Liste „uniVal“ enthält also für jede Treppe und Rolltreppe einen Eintrag. Die folgende Schleife wird für jede Treppe, die nun als eine Sammlung von Stufen-Features vorliegt, einmal ausgeführt.

Eine erste Selektion mit dem Werkzeug „*arcpy.SelectLayerByAttribute_management*“ wählt jene Stufenelemente aus, die zum eben aufgerufenen (Roll-)Treppenobjekt der „uniVal“-Liste gehören. Das Attribut „TARGET_FID“ identifiziert dabei mithilfe einer SQL-Query die jeweilige Sammlung von Stufen-Features. Aus dieser Auswahl wird nun jenes einzelne Stufenelement selektiert, welches das Punkt-Feature am unteren Ende der (Roll-)Treppe schneidet. Für dieses erste Stufenelement wird als nächstes der „altitude“-Wert berechnet, indem der Ausgangshöhe („altitude_lower“) die relative Höhe der Stufe („height_segment“) aufaddiert wird.

Im nächsten Schritt wird eine weitere „for“-Schleife aufgerufen, die jedoch nur dazu dient, sich das Attribut „step_count“ des zuvor ausgewählten Stufenelements ausgeben zu lassen. Mithilfe dieses Attributs wird nun eine letzte Schleife in Gang gesetzt, die anhand der Anzahl an Stufen wiederholt wird. Die Variable „i“ dient dabei als numerischer Identifikator des aktuellen Stufenelements. Mit dem „*arcpy.SelectLayerByLocation*“-Werkzeug wird das nächste, angrenzende Stufenelement ausgewählt und die vorherige Selektion aufgehoben. Für das aktuelle Stufenelement wird der „altitude“-Wert berechnet, indem die Ausgangshöhe mit dem Produkt aus „i“ und „height_segment“ addiert wird.

Diese letzte Schleife läuft für jede Sammlung von Stufenelementen eines (Roll-)Treppen-Objekts durch. Die übergeordnete Schleife wird für jedes (Roll-)Treppen-Objekt einmal ausgeführt und dies wiederrum geschieht einmal für jede (Roll-)Treppen-Feature-Klasse – also einmal pro Etage. Ist dieser Prozess durchgelaufen, besitzt jedes einzelne Stufenelement einen eigenen Höhenwert in der „altitude“-Spalte. Die 3D Modellierung ist nun beinahe abgeschlossen. Der letzte Schritt ist die Umwandlung der linienhaften Wände in Polygone mittels Buffer, beziehungsweise deren Neuberechnung für flächenhafte POIs, da die Wände im SIT-Schema nur implizit vorhanden, also nicht eigens digitalisiert sind. Dabei werden die Polygone erst gebuffert und danach von den neu entstandenen Feature-Klassen mit dem „*arcpy.Erase_analysis*“-Werkzeug abgezogen. Der dadurch zurückbleibende Rest, bildet als Ring um die Polygone die Außenwände der POIs.

Für die 3D Modellierung der Station Karlsplatz benötigte das Python Skript rund 15 Minuten. Mit den manuellen Vorarbeiten ergibt sich ein Zeitaufwand von 20 Minuten für den Modellierungsprozess

7 Symbolisierung und Visualisierung der 3D Modelle

Die letzten beiden Prozessschritte bei der Erstellung einer 3D Karte sind die Symbolisierung und die Visualisierung. Auch wenn diese beiden Schritte essentiell für den gesamten Prozess sind, sind sie, abgesehen von der Formulierung der Designimplikationen in Kapitel 4, nicht mehr unmittelbar Teil dieser Arbeit. Mit dem letzten Kapitel zur automatischen Modellierung der 3D Modelle, sind nun alle in Abschnitt 1.2 formulierten Forschungsfragen beantwortet. Hinzu kommt, dass beide Prozessschritte je nach der letztendlichen Nutzungsweise sehr stark variieren. Ein wesentliches Kriterium dabei ist, ob die 3D Karte interaktiv und damit unmittelbar, also „on-the-fly" gerendert werden muss, oder ob es sich um eine statische oder animierte Darstellung handeln soll. Ist Letzteres der Fall, bleibt viel Zeit, die Karte zu rendern und die komplexen Gestaltungsvariablen, Licht und Schatten des Abschnittes 4.13 können voll zur Geltung gebracht werden. Wenn aber Ersteres der Fall ist, muss der rechenintensive Schattenwurf per se in Frage gestellt werden und für die Beleuchtung muss man mit einigen wenigen globalen Lichtquellen sein Auslangen finden.

Spezialisierte 3D Software wird in ersteren Fall kaum notwendig sein, stattdessen wird die JavaScript-Schnittstelle WebGL (Web Graphics Library) und andere Web-Technologien interessant. Handelt es sich um statische oder animierte Darstellungen kann auf umfangreiche Software-Pakete wie Cinema 4D oder das quelloffene Blender zurückgegriffen werden. Für diese Arbeit wurden beide Technologien inspiziert. Der Vollständigkeit halber sollen beide Arbeitsabläufe hier in ihren Grundzügen erklärt werden. Im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Kapiteln, stellen die folgenden Ausführungen jedoch keine expliziten und theoriegestützten Empfehlungen. Sie sollen lediglich Perspektiven eröffnen, was theoretisch machbar wäre. Im letzten Kapitel wird zudem ein Ausblick gegeben, wie die hier vorgestellten Ergebnisse zukünftig eingesetzt werden könnten und wo eine weiterführende Forschung anknüpfen könnte. Im Anhang schließlich werden einige Visualisierungen präsentiert, die mit Cinema 4D erstellt wurden.

7.1 Erstellung der 3D Symbole

Punkt- und flächenhafte POIs werden mit 3D Symbolen dargestellt. Wie in Abschnitt 4.9 erwähnt, dient das Design des Wiener U-Bahn Würfels sowie ähnlich gestaltete Pyramiden als Vorlage für die Symbole. Die vier senkrechten Flächen der beiden Körper, stellen assoziative Piktogramme gemäß dem bildhaften Prinzip nach ARNBERGER (1966) dar. Dabei handelt es sich um jene Piktogramme, welche auch in den U-Bahn-Stationen der Wiener Linien zu sehen sind und welche unter OGD frei zur Verfügung stehen (OPENGOVERNMENTDATA). Die flächenhaften POIs auf der anderen Seite werden durch ihr Logo, so es sich um ein allgemein bekanntes handelt, repräsentiert.

Der Würfel wird zunächst in der 3D Software Cinema 4D modelliert. Es sei festgehalten, dass dieser Arbeitsschritt jedoch in einem beliebigen 3D Programm ausgeführt werden kann. Hierzu wird erst ein Würfel und danach eine, im Verhältnis 1:1,4 größere Kugel erstellt. Diese Grundkörper können in Cinema 4D automatisch erstellt werden und müssen dann nur noch richtig skaliert werden. Im nächsten Schritt wird beiden Körpern derselbe Koordinatenursprung zugewiesen, sodass sie sich schneiden. Die zwölf Kanten des Würfels ragen nun knapp aus der Außenhülle der Kugel hervor. Als nächstes wird ein sogenanntes „Boole"-Objekt erstellt, welchem die beiden Körper zugewiesen werden. In den Optionen des Boole-Objektes kann nun definiert werden, wie sich die beiden Körper zueinander verhalten sollen. Mit der Einstellung „A intersect B" werden die beiden Körper verschnitten und nur der, von beiden ausgefüllte Raum bleibt erhalten. Das Ergebnis ist ein Würfel mit abgerundeten Flächen (Abb. 46).

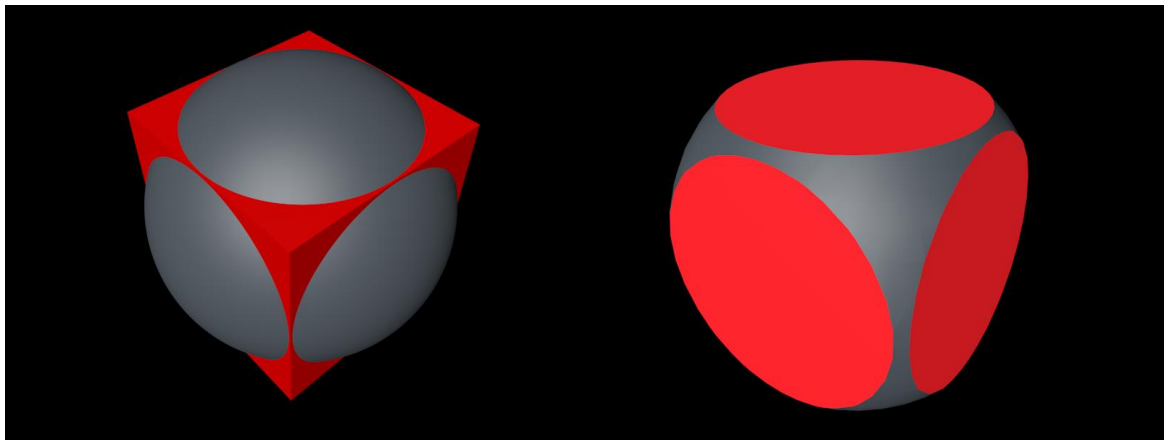


Abb. 46: Würfel und Kugel im Verhältnis 1:1,4 mit identem Koordinatenursprung

Den vier senkrechten Flächen des Würfels muss nun eine Textur zugewiesen werden. Die Piktogramme der Wiener Linien sind als SVG-Dateien (Scalable Vector Graphics), ein gängiges Vektor-Format, erhältlich. (OPENGOVERNMENTDATA) Nach dem Download können sie in einem Vektor-Graphik Programm wie Adobe Illustrator bearbeitet werden. Abgesehen von den Logos werden für die 3D Symbole zwei Farben verwendet. Einerseits und wie in Abschnitt 4.9 erläutert ein dominanter Rotton, andererseits das assoziative Blau der Wiener U-Bahn Würfel. Diese beiden Farben bilden jeweils den Hintergrund der Symbole. Die tatsächlichen Piktogramme erscheinen in Weiß oder Schwarz. Die Farbgebung und die Erstellung eines Rahmens sind somit die einzigen Arbeitsschritte, die mit Illustrator durchgeführt werden müssen. Danach kann eine Raster-Graphik exportiert werden, die in Cinema 4D als Textur zugewiesen werden kann.

Die abgerundeten Ecken des Würfels bekommen den Rot- oder Blauton des Symbolhintergrundes zugewiesen. Das Material kann weiterbearbeitet werden, indem ihn verschiedene Eigenschaften zugewiesen werden. Wie in Abschnitt 4.10 bereits erwähnt, besitzen die Wiener U-Bahn Würfel Lampen in ihrem Inneren, sodass sie auch bei Dunkelheit gut erkennbar sind. Dieses Aussehen wird nachempfunden, indem die „Luminance"-Option aktiviert wird. Dadurch leuchtet das Objekt von sich aus und ist somit auch sichtbar ist, wenn es nicht direkt von einer Lichtquelle erfasst wird.

7.2 Extrusion und Konvertierung mit qgis2threejs

Nachdem die Punkt-Daten durch volumetrische 3D Symbole ersetzt wurden, erfolgt die Symbolisierung der übrig bleibenden Polygone durch Extrusion und der Definition der Oberflächenaspekte. Für die Bearbeitung in einem 3D Programm muss das Datenformat zunächst konvertiert werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten dies zu tun. Die Methode, die im Folgenden erklärt wird, ist interessant, weil sie zweierlei tut. Einerseits konvertiert und extrudiert sie die Daten in gängige 3D Formate wie COLLADA (Collaborative Design Activity) oder Wavefront OBJ. Andererseits exportiert sie einige JavaScript- und ein HTML-Dokument (Hypertext Markup Language), welches die Daten mit WebGL und dessen Bibliothek „ThreeJS“ im Browser visualisiert. Es handelt sich um eine einfache Visualisierung mit globaler Beleuchtung und ohne Schattenwurf (Abb. 47). Die Berechnung ist jedoch schnell und eignet sich für On-the-fly Visualisierungen. Außerdem bietet sie umfangreiche Navigationsfunktionen für die interaktive Betrachtung der Modelle. Es kann direkt in den Code eingegriffen werden, wodurch sich die JavaSkript-Dateien zur Integration und Weiterverarbeitung in komplexeren Anwendungen eignen.

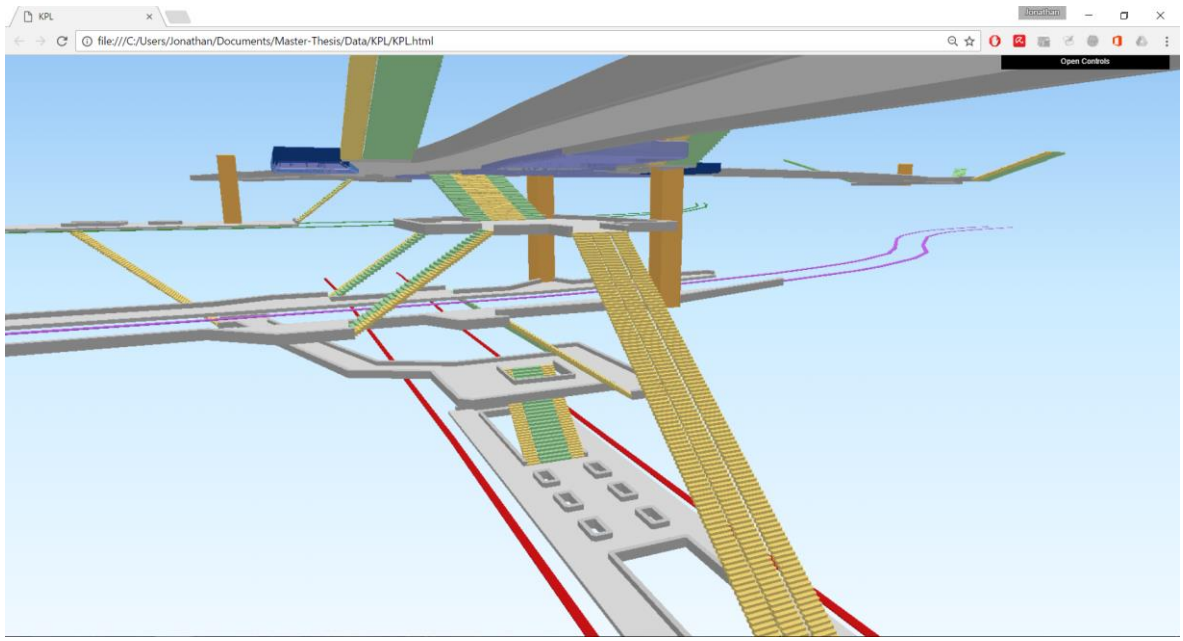


Abb. 47: Interaktive Visualisierung der U-Bahnstation Karlsplatz mittels ThreeJS (WebGL) im Browser

Das Werkzeug, mit dem dies umgesetzt werden kann, nennt sich „qgis2threejs“ und ist ein Plug-In für die Open-Source GIS Software QGIS. (GITHUB QGIS2THREEJS) Sein häufigster Anwendungsfall ist die dreidimensionale Darstellung eines DGMs mit drapierter Textur. Allerdings ermöglicht es auch, die dreidimensionale Darstellung von Vektordaten, indem sie Höhenwerte aus einem Attribut ausliest, oder man diese manuell zuweist. Darüber hinaus können Werte definiert werden, anhand derer die Objekte extrudiert werden. Sämtliche Attribute bleiben dabei erhalten. Somit sind Beschriftungen möglich und durch das Anklicken eines Objektes erscheint ein Pop-Up Fenster mit einer Reihe an Metadaten und Attributen.

In der Kontrollbox in der rechten, oberen Ecke können Layer ein- und ausgeblendet oder Transparenzen zugewiesen werden. Den Oberflächen kann entweder eine einfache Farbe oder aber eine Textur zugewiesen werden. Für Punktdaten kann ein vordefinierter Körper, wie Kreis oder Zylinder, oder aber ein COLLADA-Modell verwendet werden. Somit ist es auch möglich, die zuvor erstellten 3D Symbole darzustellen. Leider können bei den COLLADA-Modellen aber keine Texturen angezeigt werden. Schließlich können in den globalen Einstellungen auch der Hintergrund und eine vertikale Überhöhung definiert werden. In Abbildung 47 beispielsweise, beträgt diese 200 Prozent.

Die zweite Funktion von qgis2threejs ist der Export in 3D Graphik-Formate zur Weiterverarbeitung in einer spezialisierten Software. Diese Funktion wurde auch für diese Arbeit genutzt. Die in den Einstellungen vorgenommenen Extrusionen, die Farbgebung sowie die vertikale Überhöhung bleiben erhalten. Da jedoch Attribute und geographische Koordinaten verloren gehen entfallen bei dieser Konvertierung viele Funktionen. Den Visualisierungsmöglichkeiten allerdings sind nun mithilfe eines 3D Programms kaum noch Grenzen gesetzt. Der gesamte Symbolisierungsprozess betrug für die Station Karlsplatz rund zwei Stunden. Der weitaus größte Teil dieser Zeit wurde für die Erstellung der 3D Symbole aufgewendet. Da die meisten Symbole in anderen Visualisierungen wieder verwendet werden können, muss dieser Arbeitsschritt normalerweise nur einmal ausgeführt werden

7.3 Visualisierung mit Cinema 4D

Die mit qgis2threejs erstellten COLLADA-Modelle können nun in Cinema 4D geladen werden. Die Abschnitte 4.12 und 4.13 geben im Wesentlichen die zu erledigenden Arbeitsschritte vor. Zunächst kann aber noch bei den Oberflächeneigenschaften der einzelnen Objekte nachgebessert werden. Von qgis2threejs wird für jede Objektklasse ein Material angelegt, in dem zu diesem Zeitpunkt nur eine Farbe definiert ist. Der Materialeditor in Cinema 4D bietet eine Fülle an Optionen. Es können Strahlungs- und Reflexionseigenschaften definiert oder Texturen und Bumpmaps zugewiesen werden. Wie in Abschnitt 4.10 bereits erwähnt erhalten die Böden der Verteilerebene sowie die Aufzüge eine solche Bumpmap. Dabei handelt es sich um eine einfache Rastergraphik, die Mikrostrukturen durch Schattenwurf simuliert. (HÄBERLING 2004) Die Bumpmap, die den Böden zugewiesen wird besteht aus einem einfachen, regelmäßigen Raster, welcher Bodenplatten simulieren sollte. Bei den Aufzügen betonen vertikale Strukturlinien die Bewegungsrichtung des Aufzugs. Neben der Bumpmap werden außerdem die Optionen „Reflection“ und „Specular“ aktiviert. Einigen Objekten, wie den Transitionselementen wird ein schwacher „Luminance“-Faktor zugewiesen. Dieser bewirkt, wie bereits in Abschnitt 7.1 erwähnt eine Aufhellung des Objektes, auch wenn es außerhalb der Reichweite einer Lichtquelle liegt. Darüber hinaus erhalten die Gleisobjekte relativ intensive Reflexionen. Der Rest der Materialien wird unverändert von qgis2threejs übernommen.

Nachdem die Materialeigenschaften endgültig festgelegt wurden, kann mit der eigentlichen Visualisierung begonnen werden. Cinema 4D erlaubt das einfache Einfügen von Lichtquellen in beliebiger Anzahl. Diese Licht-Objekte können dabei unterschiedliche Formen annehmen. Da im vorliegenden Beispiel die realen Lichtbedingungen der Leuchtstoffröhren simuliert werden sollen, werden die Licht-Objekte als Zylinder dargestellt. Mit Kontrollknoten können die Objekte skaliert, verschoben oder rotiert werden. So wird ihnen erst ein kleiner Radius von wenigen Zentimetern zugewiesen, dann werden sie in die Länge gezogen und entlang der Längsausdehnung der zu beleuchtenden Flächen aufgespannt. Handelt es sich zudem um eine relativ breite Fläche, werden mehrere Reihen dieser zylindrischen Leucht-Objekte nebeneinandergestellt. Die Höhe der Leucht-Objekte beträgt etwa vier Meter über dem Boden. In den Optionen kann wiederrum eine Fülle an Einstellungen vorgenommen werden.

Zunächst wird unter dem Reiter „General“ die Lichtart eingestellt. Wie in Abschnitt 4.13 erläutert wird hier Umgebungslicht eingesetzt, das in Cinema 4D als „Area“-Licht bezeichnet wird. Auch die Schattenart kann hier spezifiziert werden. Sie wird ebenfalls auf „Area“ gestellt. Unter dem Reiter „Details“ kann die Lichtgeometrie verändert werden. Neben der zylindrischen Form kann auch der Leucht-Radius und ein sogenannter „Falloff“ definiert werden. Der Falloff gibt jene Distanz an, in der die Lichtintensität von 100 auf 0 Prozent abfällt. Objekte außerhalb des Falloffs werden durch die Lichtquelle nicht mehr beleuchtet. Bereits mit diesen Einstellungen wird die Rechenleistung des Computers stark beansprucht. Die vielen weiteren Einstellungen, welche den Realismus der Visualisierung weiter erhöhen können, bleiben daher unberücksichtigt.

Als nächstes können Kameraobjekte eingefügt werden, die insbesondere für Animationen notwendig sind. Die wohl einfachste Methode eine solche zu erstellen, wäre es die Kamera an einen zuvor digitalisierten Pfad zu hängen. Sie bewegt sich dabei mit vordefinierter Geschwindigkeit und Blickrichtung entlang dieses Pfades und exportiert diese, als Kameraflug bezeichnete Fahrt als Videodatei oder Frame-Abfolge. Ein solcher Kameraflug soll auch im Anschluss an diese Arbeit aufgenommen und zusammen mit weiteren Anschauungsmaterial unter *www.unet.univie.ac.at/~a0707856/master_thesis.html* veröffentlicht werden.

Den letzten Schritt der Visualisierung bildet die Definition der globalen Variablen. Diese kann in den „Render Settings“ von Cinema 4D vorgenommen werden. Die für diese Arbeit interessantesten Variablen, sind „Ambient Occlusion“ und „Global Illumination“, die im Abschnitt 4.13 bereits besprochen wurden. Da Global Illumination die benötigte Rechenzeit um ein Vielfaches erhöhen würde, wird trotz guter Ergebnisse darauf verzichtet. Bei Ambient Occlusion verhält es sich ganz ähnlich. Wegen der etwas kürzeren Rechenzeit und den vergleichsweise sehr guten Ergebnissen, wird es aber für die hier präsentierten Beispiele beibehalten. Einige dieser Beispiele können dem Anhang (Kapitel 11) entnommen werden.

Der Zeitaufwand für die Visualisierung ist somit stark abhängig vom gewünschten Ergebnis. Während die Visualisierung mittels qgis2threeJS im Browser nur einige Sekunden dauert, ist sie mit Cinema 4D wesentlich zeitaufwändiger, da eine Fülle an

Einstellungen zu treffen sind und beispielsweise Lichtquellen manuell modelliert werden müssen. Exklusiv der Renderzeit muss für eine Station der Größe des Karlsplatzes mit etwa 30 Minuten gerechnet werden. Die Renderzeit eines einzelnen Frames mit den oben erwähnten Einstellungen und einer Auflösung von 1920 x 1080 Pixeln beträgt zwischen fünf und 25 Minuten.

8 Zusammenfassung

Zweck dieser Arbeit war es, auf Grundlage kognitionspsychologischer Erkenntnisse zur kognitiven Codierung des Raums beim Menschen und traditionellen, kartographischen Gestaltungskonventionen, Implikationen für das Design von 3D Indoor Karten abzuleiten, sowie einen Workflow für deren Erstellung zu entwickeln. Dies ist insbesondere deshalb von Relevanz, da die rasante Entwicklung von computergestützten, mobilen Navigationssystemen es in absehbarer Zeit erlaubt, diese auch innerhalb von Gebäuden zu nutzen. Während zu anderen Aspekten dieser Entwicklung intensiv geforscht wird, lassen Konventionen zum adäquaten Design von Karten, die solche Systeme zukünftig stützen müssen, weiter auf sich warten. Gerade in einer Indoor Umgebung könnten 3D Karten entscheidende Vorteile für die Darstellung eines, durch mehrere Stockwerke vertikal segmentierten Raums bieten.

Die Literaturanalyse in Kapitel 2 hat jedoch gezeigt, dass es nach wie vor eine offene Frage ist, ob dreidimensionale, kartographische Visualisierungen tatsächlich Vorteile für die räumliche Orientierung und Wegfindung des Kartennutzers bringen. Mehrere wissenschaftliche Untersuchungen, die Wegfindungsaufgaben anhand von zwei- und dreidimensionalen Abbildungen an Probanden testeten, kamen hier zu unterschiedlichen Ergebnissen. (CHITTARO & VENKATARAMAN 2006; FONTAINE 2001; HUANG ET AL. 2012; LI & GIUDICE 2013; MÜNZER & STAHL 2008; MÜNZER & STAHL 2011; OULASVIRTA ET AL. 2009) Eine zentrale Annahme dieser Arbeit ist es, dass die Aussagekraft besagter Studien, durch die fehlende Berücksichtigung kartographischer Standards beim Design der „Test-Karten“, verzerrt wurde und dies ein Grund für die widersprüchlichen Ergebnisse war.

Die im zweiten Kapitel präsentierten Erkenntnisse deuten darauf hin, dass 3D Karten aus theoretischer Sicht durchaus Vorteile bringen könnten. Sie fördern einerseits *konfigurales Wissen* (engl. „survey knowledge“), indem sie einen umfassenden Überblick über das gesamte Gebiet bieten und die räumlichen Beziehungen der einzelnen Objekte zueinander darstellen. Andererseits erlauben sie es, durch die schrägperspektivische Betrachtung auch Vorteile des *prozessualen Wissens* (engl. „procedural knowledge“ oder „route knowledge“) zu nutzen. Diese bestehen insbesondere in der Reduktion der kognitiven Rotationen, die notwendig sind, um von der allozentrischen Perspektive des Kartenbetrachters in die egozentristische Perspektive der navigierenden Person zu wechseln. (THORNDYKE & HAYES-ROTH 1982; DARKEN & SIBERT 1996) Es können somit Vorteile beider Typen kognitiver Repräsentation von Raum kombiniert werden.

Ein zweiter Vorteil liegt in der vertikal segmentierten Beschaffenheit des Indoor Raums. Durch mehrere, sich überlagernde Stockwerke, ist es unmöglich das gesamte Bauwerk aus einer allozentrischen Perspektive abzubilden. (LI & GIUDICE 2013) In abgeschwächter Form zeigt sich dies selbst bei kartenverwandten Darstellung von Bergregionen vergangener Jahrzehnte, wo perspektivische Panoramen den traditionellen Karten oft vorgezogen wurden, da sie den vertikalen Charakter der Landschaft besser vermitteln können. Mithilfe

von perspektivischen 3D Karten ist es somit auch möglich zwischen die Stockwerke eines Gebäudes zu blicken und das Bauwerk in seiner Gesamtheit abzubilden. Damit rückt die vertikale Z-Achse, als in der traditionellen Kartographie beinahe unberücksichtigte Dimension in den Fokus.

8.1 Beantwortung von Forschungsfrage I

Die Literaturanalyse und damit die Beantwortung der *ersten Forschungsfrage*, haben gezeigt, dass die Z-Achse, entgegen vorheriger Annahmen, durchaus Teil der kognitiven Karten des Menschen ist. Dieser kann somit auch entlang der dritten Dimension ein konfigurales Verständnis des Raums entwickeln und dessen Vorteile für Orientierung und Wegfindung nutzen. Da jedoch die kognitive Codierung der Z-Achse, im Gegensatz zu den Achsen der Ebene, einer nicht-metrischen, grob-ordinalen Skalierung folgt (JEFFERY ET AL. 2012), kommt den *vertikalen Transitionselementen* (Treppen, Rolltreppen und Aufzügen) eine herausragende Bedeutung zu. *Sie dienen in ihrer Funktion als Landmarken gewissermaßen als Referenzpunkte für die Verknüpfung mehrerer, vertikal gestaffelter, kognitiver Karten.* (LI ET AL. 2016)

In Kapitel 3 wurden neben den Grundlagen der kartographischen Gestaltungslehre nach JACQUE BERTIN (1974) und ERIK ARNBERGER (1966), dessen Adaptionen für computergenerierte 3D Karten von CHRISTIAN HÄBERLING (2004) untersucht. Letzterer legte eine umfangreiche Systematik der unterschiedlichen Gestaltungsaspekte und deren Gestaltungsvariablen vor. Sie basiert auf einer von ANDREA TERRIBILINI (2001) vorgestellten Prozesskette zur Erstellung von 3D Karten. Diese Prozesskette und analog dazu die zugehörigen Gestaltungsvariablen wurden für die Anforderungen dieser Arbeit erweitert. Daraus ergibt sich die Abfolge *Erfassung, Digitalisierung, Modellierung, Symbolisierung* und *Visualisierung*, die als Grundgerüst für die Ableitung von Designimplikationen und den Workflow zur Erstellung einer 3D Karte herangezogen wird (siehe Abb. 16 in Abschnitt 3.3). Operationen, die der Generalisierung zuzurechnen sind, kommen dabei als übergeordnete, globale Gestaltungsvariablen in mehreren dieser Prozessschritte zur Anwendung.

8.2 Beantwortung von Forschungsfrage II

Kapitel 4 zog zur Beantwortung der *zweiten Forschungsfrage* jeden einzelnen Gestaltungsaspekt heran und definierte die Ausprägung der einzelnen Variablen unter Berücksichtigung der behandelten Literatur. Verwendungszweck, Zielpublikum, Anforderungen an die Ersteller und die spezifischen Charakteristiken des darzustellenden Gebietes wurden definiert und bilden ebenfalls wichtige Kenngrößen zur Beantwortung der Frage. Als Testgebiet und zur Illustration der Ergebnisse wurde die Wiener *U-Bahn-Station Karlsplatz* gewählt, die sich über fünf Etagen in den Untergrund erstreckt. In Abschnitt 4.2 wurde zunächst die Selektion der abzubildenden Kartenobjekte vorgenommen. Diese orientiert sich am Grad der Generalisierung und der Frage, wieviel

Information zur Lösung von Wegfindungsaufgaben und zur Orientierung im Inneren von Gebäuden tatsächlich notwendig ist. (KLIPPEL 2003)

Nach der Festlegung der Erfassungs- und Digitalisierungsvariablen sowie der Zuweisung von Höhenwerten im Zuge der 3D Modellierung, sind es die Variablen der Symbolisierung, die den Kartenobjekten ihre endgültige Form geben. Die ebenfalls im Prozessschritt der Modellierung vorgenommenen geometrischen Transformationen der Linienelemente zu Polygonen, sind die Voraussetzung für die automatische Erstellung volumetrischer Körper auf Grundlage der Symbolisierungsvariablen. Diese wird durch die Extrusion aller flächenhafter Objekte durch klassenspezifische Werte erreicht. Hier findet auch das in Abschnitt 2.5 beschriebene, kognitive Prinzip, der asymmetrischen Codierung des vertikalen Raums (BRANDT ET AL. 2015; JEFFERY ET AL. 2016; WILSON ET AL. 2004), sein digitales Äquivalent. Durch die Definition einer vertikalen Überhöhung (engl. „vertical exaggeration“) wird die Z-Achse gewissermaßen auseinandergezogen und ermöglicht so eine bessere Sicht auf die, sonst dicht gestaffelten, horizontalen Ebenen.

Die punkthaft erfassten und digitalisierten POIs, werden durch ein, dem bildhaften Prinzip (ARNBERGER 1966) folgenden, 3D Symbol repräsentiert. Dieses orientiert sich am Design des Wiener U-Bahn Würfels, der als fester Bestandteil des Wiener Stadtbildes eine unmittelbare Assoziation mit der U-Bahn herstellt. Für die weniger wichtigen punkthaften POIs, welche die Stationseinrichtungen der Wiener Linien repräsentieren, werden Pyramiden verwendet, die in ihrem Design an den Würfeln angelehnt sind. So wird eine rasche qualitative Unterscheidung von punkt- und flächenhaften POIs ermöglicht. An den vier senkrechten Seiten der beiden Körper befinden sich Piktogramme der jeweiligen POI-Klasse, welche die Wiener Linien als OGD-Datensatz kostenlos zur Verfügung stellen. Durch dieses Design wird sichergestellt, dass das POI-Symbol aus jeder Richtung erkannt werden kann.

Die Gestaltungsvariable Farbe wurde auf der theoretischen Basis der Farbenlehre (IMHOF 1972; GROSSER & SCHOPPMEYER 2001) und der Priorität der einzelnen Objekte festgelegt. Durch sie können vor allem Differenzierung nach qualitativen Kriterien sowie Bewertung durch farbliche Betonung ausgedrückt werden. Unter Berücksichtigung ihrer Ausdehnung und eines farbharmonischen Gesamteindrucks, wurden die Kartenobjekte durch ihre Farbgebung in folgender, absteigender Weise priorisiert: POIs, Transitionselemente, Gleise und Bahnsteigkanten, Toiletten, Stationseinrichtungen, Gastronomiebetriebe, Geschäfte, Wände, Etagenflächen, Hintergrund;

In der Literatur finden sich zahlreiche Stimmen, die sich gegen photorealistische Texturen aussprechen (siehe Abschnitt 4.1), da diese einen unnötigen Detailreichtum in die Karte bringen und sich oft nur schlecht mit den gröberen 3D Modellen kombinieren lassen. (OULASVIRTA ET AL. 2009; SEMMO 2016) Eine bemerkenswerte Ausnahme bilden Texturen mit regelmäßigen Mustern. Diese können dazu beitragen, dass Objekte schneller wahrgenommen werden, indem sie leichter von anderen Objekten abzugrenzen sind. (BARDEL 2001; REAGAN 2000; TUFTE 1999) Außerdem unterstützt der sogenannte Texturgradient, durch das, mit zunehmender Entfernung engmaschiger werdende Muster, die Tiefenwahrnehmung ausgedehnter Flächen. (HÄBERLING 2004) Aus diesen Gründen

werden die Etagenflächen mit einer Bumpmap eines regelmäßigen Rasters und die Aufzüge mit einer Bumpmap vertikaler Strukturlinien drapiert.

Die Variablen der Kamera bestimmen den Standort der Modellbetrachtung und sind damit für den kognitionspsychologisch so wichtigen Faktor der Perspektive verantwortlich. Mit dem Ausrichtungseffekt muss hier jenes Prinzip berücksichtigt werden, welches besagt, dass sich die Kamera immer im Rücken des Kartenbetrachters befinden muss und die, vor ihm liegenden Objekte, immer oben in der Karte zu finden sein müssen. (DARKEN & SIBERT 1996; LEVINE ET AL. 1984, WARREN & SCOTT 1993) Alle Variablen müssen so aufeinander abgestimmt werden, dass die horizontale wie vertikale Objektverdeckung minimiert wird und ein möglichst umfassendes Bild der Station bei gleichzeitiger Leserlichkeit der Karte geboten wird. Ist dies aufgrund der Ausdehnung der Station nicht möglich, kann auch auf interaktive Navigationsfunktionen oder Kameraflüge in Form von Videos zurückgegriffen werden. Insbesondere Letztere eignen sich, mehreren Untersuchungen zufolge, gut zur Vermittlung von Routeninformationen und unterstützen die Aufrechterhaltung der Orientierung im Raum. (GOLDIN & THORNDYKE 1983; MÜNZER & STAHL 2008)

Hauptverantwortlich für die Tiefenwahrnehmung in einer 3D Karte ist, neben der Verdeckung und den Größeneffekten der Entfernung, auch der Schattenwurf. (FOLEY ET AL. 1995) Dieser ist abhängig von der Definition der Lichtquellen. Ziel dieser Arbeit war es die Beleuchtungssituation der U-Bahn-Station unter Berücksichtigung der Renderzeit, möglichst realitätsnah widerzugeben. Es wurde versucht, die Beleuchtungseigenschaften der, für die Station typischen, Leuchtstoffröhren zu simulieren, indem innere und äußere Lichtgeometrie sowie die Lichtart und -farbe entsprechend angepasst wurden. Moderne 3D Software bietet eine Fülle an Optionen, um das Lichtverhalten und den daraus resultierenden Schattenwurf möglichst realitätsnah darzustellen. Diese Optionen schlagen sich jedoch sehr stark in der Zeit nieder, die für das Rendern benötigt wird. Es muss also ein Kompromiss zwischen realistischer Visualisierung und Renderzeit gefunden werden.

Im Gegensatz zum Sonnenlicht, welches bei entsprechender Intensität einen harten Schlagschatten wirft, ist das Licht im Inneren von Gebäuden viel diffuser. Ein wesentlicher Teil des Lichts, der eine Indoor Umgebung erhellt, stammt nicht direkt von der Lichtquelle selbst, sondern wird von anderen Objekten reflektiert. Das 3D Programm „Cinema 4D“ bietet mehrere Möglichkeiten dies zu simulieren. Der Kompromiss fiel letztendlich auf die Einstellung „Area Light“. Auf die zusätzliche, global wirksame Einstellung „Global Illumination“ wurde, trotz guter Ergebnisse, aus Gründen der Renderzeit verzichtet. Für Schatten wurde analog zur Lichtart die Einstellung „Area Shadow“ gewählt, die bewirkt, dass dessen Schärfe beziehungsweise Härte mit zunehmender Länge des Schattenwurfs abnimmt. Als zusätzliche globale Einstellung wurde „Ambient Occlusion“ aktiviert. Diese Einstellung bewirkt, dass der Schattenwurf in Ritzen oder Ecken intensiver ausfällt, als auf ebenen Flächen. Mit dieser Kombination aus Licht- und Schatteneinstellungen wurde ein zufriedenstellender Kompromiss zwischen realitätsnaher Indoor Beleuchtung und Renderzeit erreicht.

8.3 Beantwortung von Forschungsfrage III

Der technische Teil der Arbeit umfasst die Dokumentation der durchgeführten Arbeitsschritte und soll, zur Beantwortung von Forschungsfrage III. einen Workflow aufzeigen, der es OSM Mappern ermöglicht, im Rahmen von VGI Indoor Daten zu erfassen. VGI und insbesondere die OSM wurden als Plattform identifiziert, die bereits heute Zugriff auf eine Fülle an Indoor Daten bietet und sich zukünftig zu einer der wichtigsten Quellen für diese sonst nur schwer erhältlichen Daten, in einheitlicher und georeferenzierter Form, entwickeln könnte. (GOETZ & ZIPF 2012A) Das SIT-Schema (Simple Indoor Tagging) wurde für die Zwecke dieser Arbeit erweitert und wird zu Beginn von Kapitel 5 ausführlich erklärt. In weiterer Folge wurde ein Arbeitsablauf entwickelt, durch den es mit einfachen Mitteln und grundlegenden Kenntnissen der Digitalisierung im OSM Editor JOSM möglich ist, Indoor Daten so zu erfassen und aufzubereiten, dass daraus automatisiert 3D Modelle und in weiterer Folge 3D Karten erstellt werden können.

Durch den Verzicht auf spezielles, vermessungstechnisches Gerät, einfachen Messtechniken wie dem Schrittmaß und der Verwendung des weit verbreiteten OSM Editors JOSM wird sichergestellt, dass die Kosten niedrig gehalten und Replizierbarkeit durch OSM Aktive gewährleistet wird. Für Erfassung und Digitalisierung der U-Bahnstation Karlsplatz wurden etwa 18 Stunden benötigt. Dieser Wert liegt, auf Grund der Größe der Station, allerdings weit über dem Zeitaufwand für durchschnittliche U-Bahn Stationen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass eine durchschnittliche Station mit zwei Untergeschoßen, in Form eines Verteilergeschosses auf -1 und den Bahnsteigen auf -2 problemlos in insgesamt vier Stunden erfasst und digitalisiert werden kann. Die weiteren Prozessschritte gehen im Allgemeinen schnell von statten. Lediglich für die einmalige Erstellung der 3D Symbole wurden in etwa zwei Stunden aufgewendet. Außerdem muss genügend Zeit für das Rendering eingeplant werden, wenn man sich für aufwendige Einstellungen in spezialisierten 3D Programmen entscheidet.

8.4 Beantwortung von Forschungsfrage IV

Forschungsfrage IV. fragt, wie sich solcherart erfasste und, in der OSM digitalisierte Daten automatisiert in ein 3D Modell umrechnen lassen. In der, im sechsten Kapitel vorgestellten Vorgehensweise, werden die Daten durch eine Overpass Abfrage aus der OSM exportiert und an ein eigens angefertigtes Python Skript übergeben. Dieses nutzt ein DGM und die, in den Objektattributen der Treppen, erfasste Stufenanzahl, um realistische Höhenwerte für jedes Element der U-Bahn-Station zu berechnen. Außerdem transformiert es die einzelnen Geometrien der Objekte solcherart, dass sie, im Zuge der Symbolisierung nur noch extrudiert werden müssen, um ihre endgültige Form zu erhalten. Diese Extrusion kann auf vielfältige Art und Weise durchgeführt werden. Als besonders vielversprechender Ansatz erwies sich der Datenexport mit dem QGIS Plug-In „qgis2threejs“. Neben dem Export in gängige 3D Datenmodelle, erlaubt das Plug-In auch die automatische Erstellung von 3D Modellen in WebGL, zur interaktiven Betrachtung im Browser.

8.5 Ausblick

Genau hier ist ein Punkt, an dem eine weitergehende Entwicklung dieser Arbeit anknüpfen könnte. Der wahrscheinlich sinnvollste Einsatz von 3D Karten, ist deren interaktive Aufbereitung im Browser. Hier könnten sie als digitale und interaktive Umgebungspläne auf Homepages verlinkt werden oder die altgedienten You-Are-Here Karten ablösen. Eine wichtige Komponente, um die Karte auch in mobilen Navigationssystemen verwenden zu können, ist die Implementierung von Routingfunktionalität. Da weder WebGL, noch die gängigen 3D Formate eine solche Funktionalität erlauben, müssen Routenberechnungen an anderer Stelle stattfinden. Vorstellbar wäre es, die, auf Grundlage von GIS Daten, berechneten Routen on-the-fly mit den Höheninformationen des 3D Modells zu verknüpfen. Dies könnte über einen geeigneten Attributschlüssel, wie der Etagenzahl, in Kombination mit einem räumlichen Abgleich erfolgen. Danach müsste die Route, auf dieselbe Weise wie zuvor das 3D Modell, ins WebGL-Format exportiert werden.

Auch die Routenvisualisierung bietet noch genügend Raum für weitergehende Untersuchungen. VAARANIEMI ET AL. (2013) haben hier mit ihrem Ansatz der, durch vordergründige Objekte durchleuchtenden Straßen einen vielversprechenden Ansatz geliefert (siehe Abschnitt 4.10). Es bleibt auch die Frage, wie sich 3D Indoor Karten in ein übergeordnetes System, wie eine Webmap integrieren lassen. Umso komplizierter ist diese Frage, da sich das hier dargestellte Bauwerke im Untergrund befindet. Bestehende Technologien, um 3D Objekte auf Webmaps darzustellen (z.B. GOOGLEMAPS; OSMBUILDINGS, MAPBOXJS), erlauben es bisher nicht unterhalb der Erdoberfläche zu blicken. Als Reaktion auf eine Nutzer-Umfrage kündigte CESIUMJS im Frühjahr 2017 an, eine solche Funktionalität implementieren zu wollen. Es bleibt abzuwarten, ob dies tatsächlich umgesetzt wird. Bis dahin wäre es vorstellbar, bereits existierende Indoor Routing Systeme, die auf 2D Karten mit umschaltbaren Etagen-Layern setzen (siehe Einleitung), um eine Alternativansicht zu erweitern. Sobald eine Route durch ein Gebäude verläuft, könnte dem Nutzer die Möglichkeit gegeben werden, sich eine 3D Karte des betreffenden Gebäudes mit dem, im Inneren verlaufenden, Routenabschnitt in einem separaten Fenster anzeigen zu lassen.

Zu guter Letzt und als logische Fortführung der hier präsentierten Arbeit, können die hier entwickelten, kartographischen Empfehlungen für das Design von Indoor Karten, dazu beitragen die Frage zu klären, ob diese tatsächlich Vorteile für die Orientierung und Wegfindung im Indoor Raum bieten. Die Antwort auf diese Frage verspricht interessante Ergebnisse für die Kognitionspsychologie und besitzt weitreichende Implikationen für die moderne Kartographie.

9 Literatur

AMERICAN PHYSICAL SOCIETY (2008): *Energy future. Think efficiency*. – College Park, USA.

ARNBERGER E. (1966): *Handbuch der thematischen Kartographie*. – Wien: Verlag Franz Deuticke.

ASLAN I., SCHWALM M., BAUS J., KRÜGER A. & SCHWARTZ T. (2006): *Acquisition of spatial knowledge in location aware mobile pedestrian navigation systems.* – In: Proceedings of the 8th conference on human-computer interaction with mobile devices and services. – Helsinki, Finland (2006), 105-108.

BARDEL W. (2001): *Depth cues for information design.* Master's Thesis – Carnegie Mellon University, Pittsburgh.

BERTIN J. (1974): *Graphische Semiologie.* – Berlin: Walter de Gruyter Verlag.

BRANDT T., HUBER M., SCHRAMM H., KUGLER G., DIETERICH M. & GLASAUER S. (2015): *„Taller and shorter": Human 3-D spatial memory distorts familiar multilevel buildings.* – In: Plos ONE, 10 (10), 1-12.

BUCHROITHNER M. & SCHENKEL R. (2001): *3D-Visualisierung von Geodaten – perzeptionstheoretische und präsentationstechnische Grundlagen.* – In: Kartographische Bausteine, Band 19, TU Dresden, 112-120.

CARLSON L., HÖLSCHER C., SHIPLEY T. & CONROY-DALTON R. (2010): *Getting lost in buildings.* – In: Current Directions in Psychological Science, 19 (5), 284-289.

CHITTARO L. & VENKATARAMAN S. (2006): *Navigation aids for multi-floor virtual buildings: A comparative evaluation of two approaches.* – In: Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. – Limassol, Cyprus (2006).

DARKEN R. & SIBERT J. (1996): *Navigating large virtual spaces*. – In: International Journal of Human-Computer Interaction, 8 (1), 49-72.

DOBSON M. (1980): *The influence of the amount of graphic information on visual matching.* – In: The Cartographic Journal, 17 (1), 26-32.

DÖLLNER J. (2001): *Informationsvisualisierung mit dynamischen, interaktiven 3D-Karten.* – In: Kartographische Nachrichten, 4/2001, 180-185.

ELIAS B., PAELKE V. & KUHNT S. (2005): *Concepts for the cartographic visualization of landmarks.* – In: GARTNER G. (EDS.): Location based services and telecartography: Proceedings of the symposium 2005, Geowissenschaftliche Mitteilungen, 1149-1155. – Vienna, Austria (2005).

ELMQVIST N., ASSARSSON U. & TSIGAS P. (2007): *Employing dynamic transparency for 3D occlusion management: Design issues and evaluation.* – In: BARANAUSKAS C., PALANQUE P., ABASCAL J. & BARBOSA S. (EDS.): Human-Computer Interaction – INTERACT 2007. Lecture Notes in Computer Science, 4662, 532-545. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

FOLEY J., VAN DAM A., FEINER S. & HUGHES J. (1995): *Computer graphics – Principles and practice.* – New York: Addison-Wesley Publishing Company.

FONTAINE S. (2001): *Spatial cognition and the processing of verticality in underground environments.* – In: MONTELLO D. (EDS.): Spatial information theory, 387-399. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

GÄRLING T., LINDBERG E., CARREIRAS M. & BÖÖK A. (1986): *Reference systems in cognitive maps.* – In: Journal of Experimental Psychology, 6 (1), 1-8.

GÄRLING T., LINDBERG E. & MÄNTYLÄ T. (1983): *Orientation in buildings: Effects of familiarity, visual access and orientation aids.* – In: Journal of Applied Psychology, 68 (1), 177-186.

GARTNER G. & RADOCZKY V. (2005): *Schematic vs. topographic maps in pedestrian navigation: How much map detail is necessary to support wayfinding.* – In: MENG L., ZIPF A. & REICHENBACHER T. (EDS.): Map-based mobile services – Theories, methods and implementations, 159-171. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

GIUDICE N., WALTON L. & WORBOYS M. (2010): *The informatics of indoor and outdoor space: A research agenda.* – In: Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness. – San Jose, USA (2010), 47-53.

GOETZ M. (2012): *Using crowdsourced indoor geodata for the creation of a three-dimensional indoor routing web application.* – In: Future Internet, 4 (4), 575-591.

GOETZ M. & ZIPF A. (2012A): *Extending OpenStreetMap to indoor environments: Bringing volunteered geographic information to the next level.* – In: RUMOR M., ZLATANOVA S. & LEDOUX H. (EDS.): Urban and Regional Data Management: UDMS Annual 2011 – Delft, The Netherlands, 47-58.

GOETZ M. & ZIPF A. (2012B): *Towards defining a framework for the automatic derivation of 3D CityGML models from volunteered geographic information.* – In: International Journal of 3-D Information Modelling (IJ3DIM), 1 (2), 1-16.

GOLDIN S. & THORNDYKE P. (1983): *Spatial learning and reasoning skill.* – In: PICK H. & ACREDOLO L. (EDS.): Spatial orientation: Theory, research and application, 195-217. – New York: Plenum Press.

GOODCHILD M.F. (2007): *Citizens as voluntary sensors: Spatial data infrastructure in the world of web 2.0.* – In: International Journal of Spatial Data Infrastructures Research, 2, 24-32.

GROSSER K. & SCHOPPMEYER J. (2001): *Farbanwendung in der Kartographie.* – In: BOLLMAN J. & KOCH W. (EDS.): Lexikon der Kartographie und Geomatik in zwei Bänden, Band 1, A bis Karti, 220-224. – Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.

HÄBERLING C. (2004): *Topografische 3D-Karten: Thesen für kartografische Gestaltungsgrundsätze.* Ph.D. Thesis – ETH Zürich.

HÄBERLING C., BÄR H. & HURNI L. (2008): *Proposed cartographic design principles for 3D Maps: A contribution to an extended cartographic theory.* – In Cartographica, 43 (3), 175-188.

HAKE G. & GRÜNREICH D: (1994): *Kartographie, 7. Auflage.* – Berlin: Walter de Gruyter Verlag.

HAKLAY M. (2010): *How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets.* – In: Environment and Planning B-Planning & Design, 37 (4), 682-703.

HANLEY G. & LEVINE M. (1983): *Spatial problem solving: The integration of independently learned cognitive Maps.* – In: Memory & Cognition, 11(4), 415-422.

HERMAN J., BLOMQUIST S. & KLEIN C. (1987): *Children's and adults' cognitive maps of very large unfamiliar environments.* – In: British Journal of Developmental Psychology, 5 (1), 61-72.

HOLDING C. & HOLDING D. (1989): *Acquisition of route network knowledge by males and females.* – In: Journal of General Psychology, 116 (1), 29-41.

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), 284-299.

HUANG H., SCHMIDT M. & GARTNER G. (2012): *Spatial knowledge acquisition with mobile maps, augmented reality and voice in the context of GPS-based pedestrian navigation: Results from a field test*. – In: Cartography and Geographic Information Science, 39 (2), 107-116.

IMHOF E. (1963): *Kartenverwandte Darstellungen der Erdoberfläche – eine systematische Übersicht.* – In: IMHOF E. (EDS.): Internationales Jahrbuch für Kartographie, 54-99. – Gütersloh: Bertelsmann Verlag.

IMHOF E. (1972): *Thematische Kartographie.* – Berlin: Walter de Gruyter Verlag.

JEFFERY K., JOVALEKIC A., VERRIOTIS M. & HAYMAN R. (2012): *Navigating in a 3D world.* – In: Behavioral and Brain Sciences, 23 (5), 523-543.

JOBST M. (2008): *Ein semiotisches Modell für kartographische Kommunikation mi 3D.* Ph.D. Thesis – Vienna University of Technology.

JONES C. (1997): *Geographical information systems and computer cartography*. – Essex: Addison Wesley Longman.

KAPLAN R., KAPLAN S. & DEARDORFF H. (1974): *The perception and evaluation of a simulated environment.* – In: Man-Environment Systems, 4, 191-192.

KLIPPEL A. (2003): *Wayfinding choremes: conceptualizing wayfinding and route direction elements.* Ph.D. Thesis – University of Bremen.

KUEH C. (2007): *A sociocybernetic approach to wayfinding map studies: The systems of people-map-space interactions*. – In: Kybernetes, 36 (9/10), 1406-1421.

LAWTON C. (1996): *Strategies for indoor wayfinding: The role of orientation*. – In: Journal of Environmental Psychology, 16 (2), 137-145.

LEVINE M., MARCHON I. & HANLEY G. (1984): *The placement and misplacement of You-Are-Here maps.* – In: Environment and Behavior, 16 (2), 139-157.

LI H., COREY R., GIUDICE U. & GIUDICE N. (2016): *Assessment of visualization interfaces for assisting the development of multi-level cognitive maps.* – In: SCHMORROW D. & FIDOPIASTIS C. (EDS.): Foundations of Augmented Cognition: Neuroergonomics and Operational Neuroscience, 308-321. – Cham: Springer International Publishing.

LI H. & GIUDICE N. (2012A): *Using mobile 3D visualization techniques to facilitate multi-level cognitive map development of complex indoor spaces.* – In: GRAF C., GIUDICE N. & SCHMID F. (EDS.): Proceedings of the International Workshop on Spatial Knowledge Acquisition with Limited Information Displays (SKALID'12), 31-36. – Monastery Seeon, Germany (2012).

LI H. & GIUDICE N. (2012B): *The effects of visual granularity on indoor spatial learning assisted by mobile 3D information displays.* – In: STACHNISS C., SCHILL K. & UTTAL D. (EDS.): Spatial Cognition VIII: Lecture Notes in Computer Science, 163-172. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

LI H. & GIUDICE N. (2013): *The effects of 2D and 3D maps on learning virtual multi-level indoor environments.* – In: Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL International Workshop on Map Interaction, 7-12. – Orlando, USA (2013).

LORD F. (1941): *A study of spatial orientation in children*. – In: Journal of Educational Research, 34 (7), 481-505.

LORENZ A., THIERBACH C., BAUR N. & KOLBE T. (2013): *Map design aspects, route complexity, or social background? Factors influencing user satisfaction with indoor navigation maps*. – In: Cartography and Geographic Information Science, 40 (3), 201-209.

LOVELACE K., HEGARTY M. & MONTELLO D. (1999): *Elements of good route directions in familiar and unfamiliar environments.* – In: FREKSA C. & MARK D. (EDS.): Spatial information theory. Cognitive and computational foundations of geographic information science, 65-82. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

LUDWIG I., VOSS A. & KRAUSE-TRAUDES M. (2010): *Wie gut ist OpenStreetMap? Zur Methodik eines automatisierten objektbasierten Vergleichs der Straßennetze von OSM und Navteq in Deutschland.* – In: GIS.Science, 4, 148-158.

MACEACHREN A. (1995): *How maps work: Representation, visualization and design.* – New York: The Guilford Press.

MAY A., ROSS T., BAYER S. & TARKIAINEN M. (2003): *Pedestrian navigation aids: Information requirements and design implications.* – In: Personal Ubiquitous Computing, 7 (6), 331-338.

MENG L. (2005): *Egocentric design of map-based mobile services.* – In: The Cartographic Journal, 42 (1), 5-13.

MICHON P. & DENIS M. (2001): *When and why are visual landmarks used in giving directions*?. – In: MONTELLO D. (EDS.): Spatial Information Theory, 292-305. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

MOESER S. (1988): *Cognitive mapping in a complex building.* – In: Environment and Behavior, 20 (1), 21-49.

MONTELLO D. & PICK H. (1993): *Integrating knowledge of vertically aligned large-scale spaces.* – In: Environment and Behavior, 25 (3), 457-484.

MÜNZER S. & STAHL C. (2008): *Learning of visual instructions for indoor wayfinding*. – In: HÖLSCHER C. (EDS.): Poster Proceedings of Spatial Cognition, 65-68. – Freiburg, Germany (2008).

MÜNZER S. & STAHL C. (2011): *Learning routes from visualizations for indoor wayfinding: presentation modes and individual differences*. – In: Spatial Cognition & Computation, 11 (4), 281-312.

MURALIDHARAN S. (2015): *On-the-fly map generator for OpenStreetMap data using WebGL.* Master's Thesis – San José State University.

NOSSUM A. (2013): *Exploring new visualization methods for multi-storey indoor environments and dynamic spatial phenomena.* Ph.D. Thesis – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

OULASVIRTA A., ESTLANDER S. & NURMINEN A. (2009): *Embodied interaction with a 3D versus 2D mobile map*. – In: Personal Ubiquitous Computing, 13 (4), 303-320.

PASSINI R. (1984): *Wayfinding in architecture.* – New York: Van Nostrand Reinhold.

PHILLIPS R. (1979): *Making maps easy to read: A summary of research.* – In: KOLER P., WROLSTAD M. & BOUMA H. (EDS.): Processing of visual language. Vol. 1, 165-174. – New York: Plenum Press.

POLYS N., KIM S. & BOWMAN D. (2005): *Effects of information layout, screen size, and field of view on user performance in information-rich virtual environments.* – In: Proceedings of the ACM symposium on virtual reality software and technology, 07-09. – Monterey, USA (2005).

PRESSON C. & HAZELRIG M. (1984): *Building spatial representations through primary and secondary learning.* – In: Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition, 10 (4), 716-722.

RADOCZKY V. (2004): *Kartographische Unterstützungsmöglichkeiten zur Routenbeschreibung in Fußgänger Navigationssystemen im In- und Outdoorbereich*. Diploma Thesis. – Vienna University of Technology.

RAMM F. & TOPF J. (2009): *OpenStreetMap: Die freie Weltkarte nutzen und mitgestalten.* – Berlin: Lehmanns Media.

REAGAN D. (2000): *Human perception of objects.* – Sunderland: Sinauer Association.

REICHENBACHER T. & SWIENTY O. (2007): *Attention-guiding geovisualisation.* – In: Proceedings of the AGILE '07, 8-11. – Washington D.C., USA (2007).

SEMMO A. (2016): *Design and implementation of non-photorealistic rendering techniques for 3D geospatial data.* Ph.D. Thesis – Universität Potsdam.

SIEGEL A. & WHITE S. (1975): *The development of spatial representations of large-scale environments.* – In: REESE H. (Eds.): Advances in Child Development and Behavior, 10 (3), 9-55.

SPENCE R. (2007): *Information visualization: Design for interaction.* – Upper Saddle River: Prentice Hall.

TAYLOR R. & HOPKIN V. (1975): *Ergonomic principles and map design.* – In: Applied Ergonomics, 6 (4), 196-204.

TERRIBILINI A. (2001): *Entwicklung von Arbeitsabläufen zur automatischen Erstellung von interaktiven, vektorbasierten topographischen 3D-Karten.* Ph.D. Thesis – ETH Zürich.

THORNDYKE P. (1981): *Distance estimation from cognitive maps.* – In: Cognitive Psychology, 13 (4), 526-550.

THORNDYKE P. & HAYES-ROTH B. (1982): *Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation*. – In: Cognitive Psychology, 14 (4), 560-589.

TUFTE E. (1997): *Visual explanations. Images and quantities, evidence and narrative.* – Cheshire: Graphics Press.

TUFTE E. (1999): *Envisioning information* – Cheshire: Graphics Press.

VAARANIEMI M., FREIDANK M. & WESTERMANN R. (2013): *Enhancing the visibility of labels in 3D navigation maps.* – In: POULIOT J., DANIEL S., HUBERT F. & ZAMYADI A. (EDS.): Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences, 23-40. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

WARE C. (2004): *Information visualization: Perception for design.* San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

WARREN D. & SCOTT T. (1993): *Map alignment in traveling multisegment routes.* – In: Environment and Behaviour, 25 (5), 643-666.

WILSON P., FOREMAN N., STANTON D. & DUFFY H. (2004): *Memory for targets in a multilevel simulated environment: Evidence for vertical asymmetry in spatial memory*. – In: Memory and Cognition, 32 (2), 283-297.

WITMER B., BAILEY J., KNERR B. & PARSONS K. (1996): *Virtual spaces and real world places: transfer of route knowledge.* – In: International Journal of Human-Computer Studies, 45 (4), 413-428.

ZIELSTRA D. & ZIPF A. (2010): *A comparative study of proprietary geodata and volunteered geographic information for Germany*. – In: 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science. – Guimarães, Portugal (2010).

10 Online Ressourcen

ARCPY: http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html?v=3&q=arcpy.mapping#/What_is_ArcPy/000v000000v7000000/ [21.04.2017].

BASEMAP: https://basemap.at/ [03.03.2017].

BINGMAPS: https://www.bing.com/maps/ [31.01.2017].

CESIUMJS: https://cesiumjs.org/ [27.04.2017].

EBAY: http://www.ebay.de/itm/DIGITALER-WINKELMESSER-20-CM-WINKELMESSGERAT-STELLWINKEL-MIT-LINEAL-DIGITAL-/141914108789 [02.03.2017].

EEGEO: http://www.eegeo.com/2015/07/a-sneak-peek-into-our-indoor-mapping-rd/ [20.03.2017].

FIONA: http://toblerity.org/fiona/ [13.04.2017].

GDAL/OGR: www.gdal.org [13.04.2017].

GEOJSON: http://geojson.org/ [06.03.2017].

GITHUB FEATURELINESPLIT: https://github.com/Holisticnature/FeatureLineSplit [19.04.2017].

GOOGLEMAPS: https://maps.google.at/ [31.01.2017].

MAPBOXJS: https://www.mapbox.com/mapbox.js/api/v3.1.0/ [27.04.2017].

OPENGOVERNMENTDATA: https://www.data.gv.at/katalog/dataset/fd3b5bee-bef4-4acd-8ea8-fc9d24aa024f [07.03.2017]

OPENLEVELUP!: http://openlevelup.net/ [31.01.2017].

OPENSTATIONMAP: openstationmap.org/html.html [31.01.2017].

OPENSTREETMAP FORUM: https://forum.openstreetmap.org/ [29.03.2017].

OPENSTREETMAP WIKI (A): https://wiki.openstreetmap.org/ [02.03.2017].

OPENSTREETMAP WIKI (B): https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Comparison_of_editors [03.03.2017].

OPENSTREETMAP WIKI (C): https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Bing_Maps [03.03.2017].

OPENSTREETMAP WIKI (D): http://wiki.openstreetmap.org/w/images/9/99/JOSM_Keyboard_shortcuts_cheat_sheet.png [03.03.2017].

OPENSTREETMAP WIKI (E): https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Simple_Indoor_Tagging [10.04.2017].

OPENSTREETMAP WIKI (F): https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Overpass_API [13.04.2017].

OSMBUILDINGS: https://osmbuildings.org/ [27.04.2017].

OSMSTATS: http://osmstats.neis-one.org/ [29.03.2017].

OVERPASS TURBO: https://overpass-turbo.eu/ [06.03.2017].

PYQGIS: http://docs.qgis.org/testing/en/docs/pyqgis_developer_cookbook/ [13.04.2017].

GITHUB QGIS2THREEJS: https://github.com/minorua/Qgis2threejs [21.04.2017].

TAGINFO: https://taginfo.openstreetmap.org/ [29.03.2017].

WHEELMAP: https://wheelmap.org/ [10.04.2017].

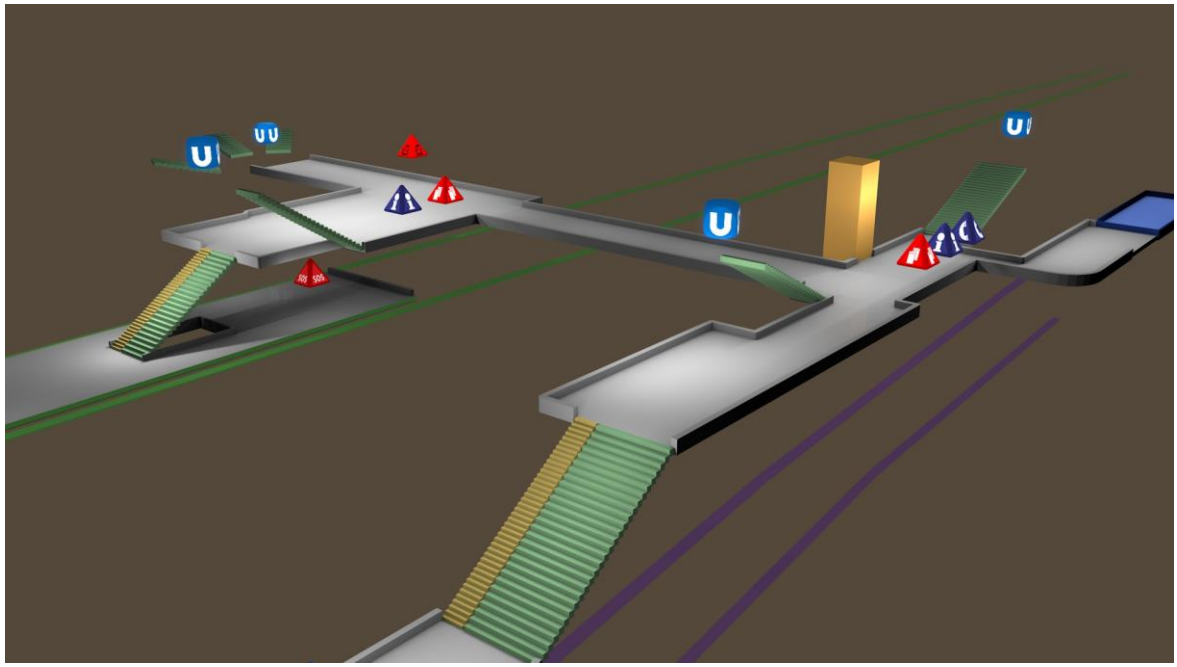
WIEN.AT: https://www.wien.gv.at/wiki/index.php?title=Datei:U-Bahn-W%C3%BCrfel.jpg [09.03.2017].

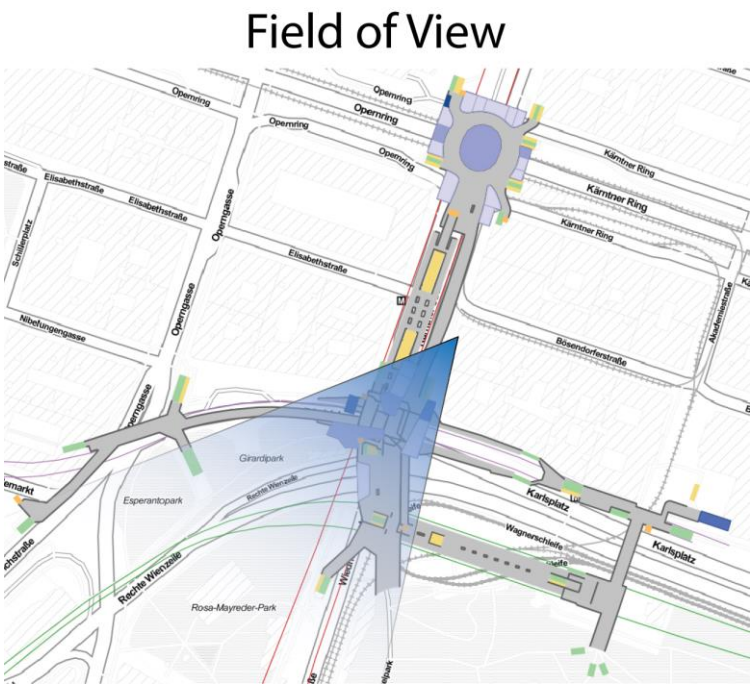
WIENER STADTVERMESSUNG (A): https://www.wien.gv.at/ma41datenviewer/public/start.aspx [03.03.2017].

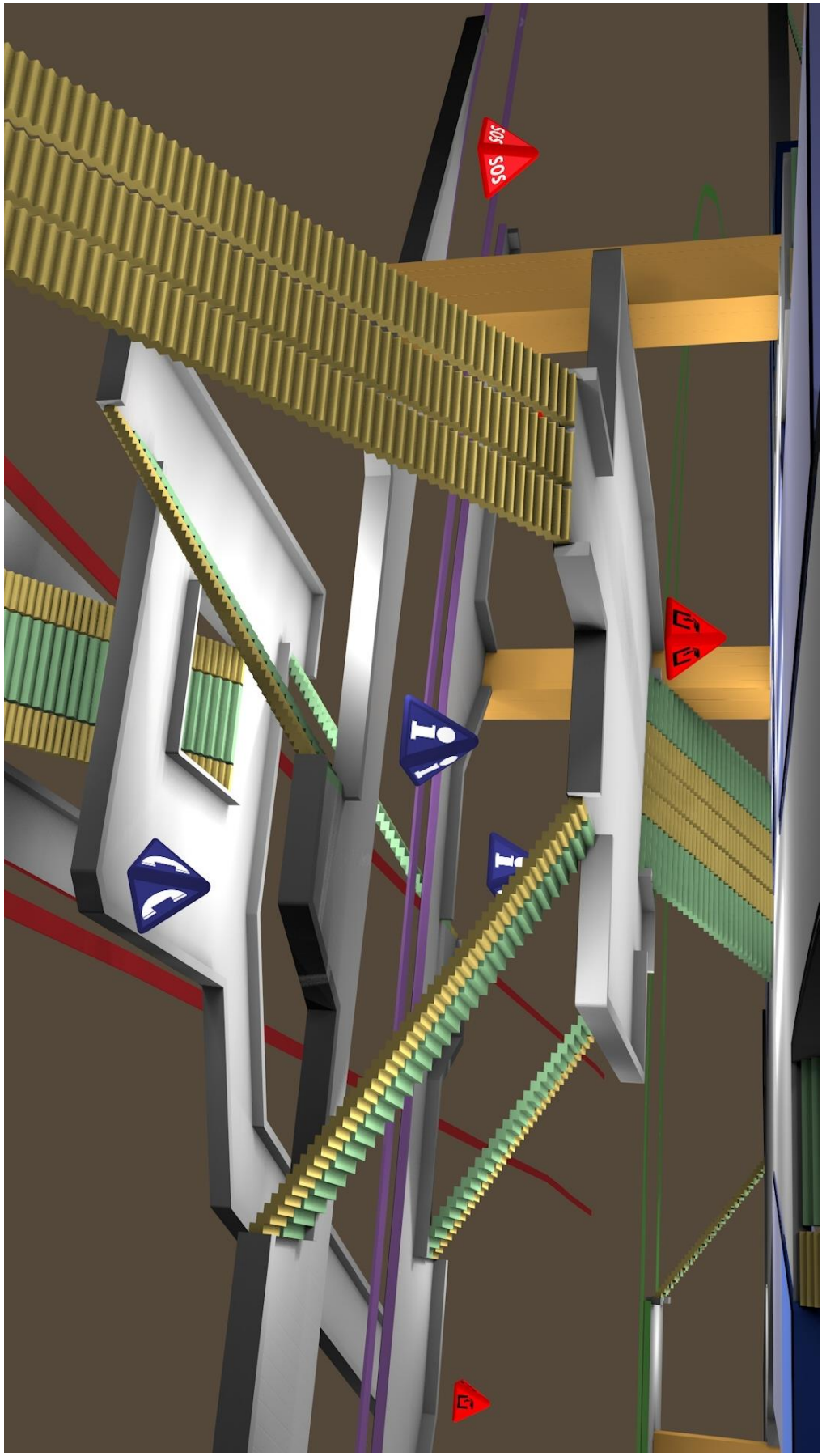
WIENER STADTVERMESSUNG (B): https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten/festpunkt.html [18.04.2017].

11 Anhang

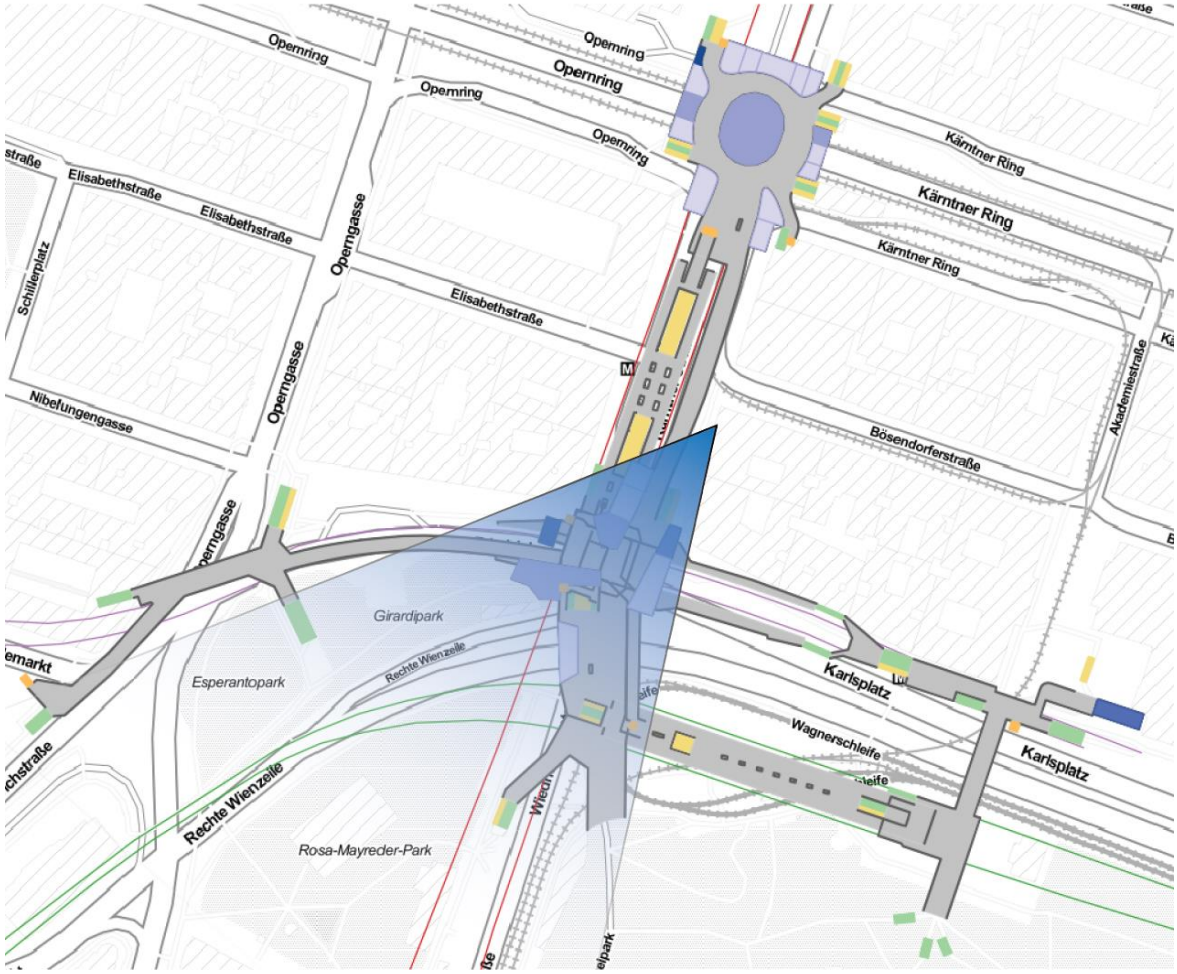
Unter *www.unet.univie.ac.at/~a0707856/master_thesis.html* kann in naher Zukunft neben weiteren Anschauungsmaterial auch eine interaktive WebGL Visualisierung und ein Kameraflug abgerufen werden. Weiterführende Arbeiten im Bereich der Visualisierung der hier präsentierten Ergebnisse, werden ebenfalls unter dieser Adresse veröffentlicht. Ausgewählte 3D Renderings der mit Cinema 4D kartographisch aufbereiteten U-Bahn-Station Karlsplatz werden hier im Anhang in statischer Form präsentiert.

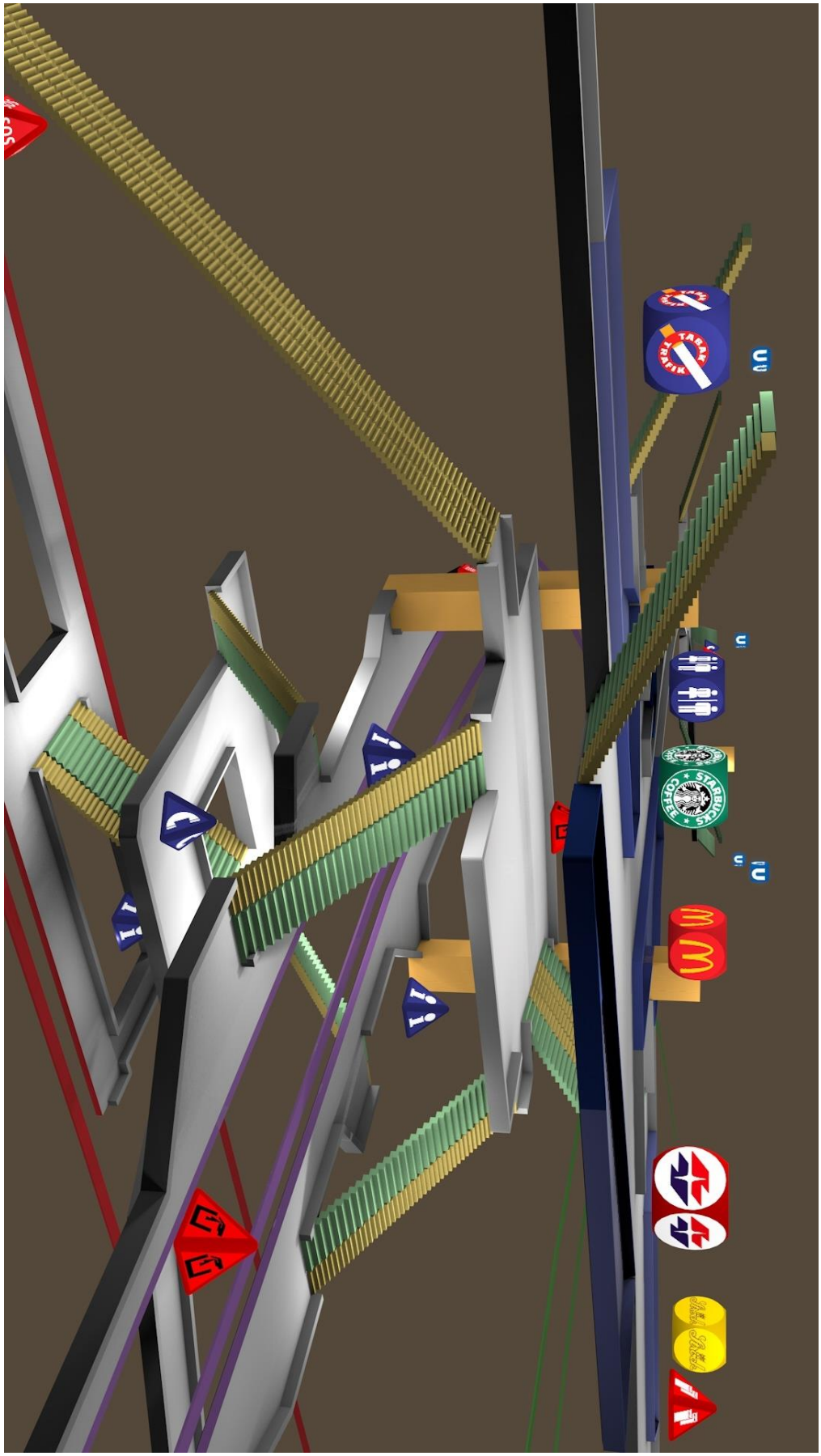




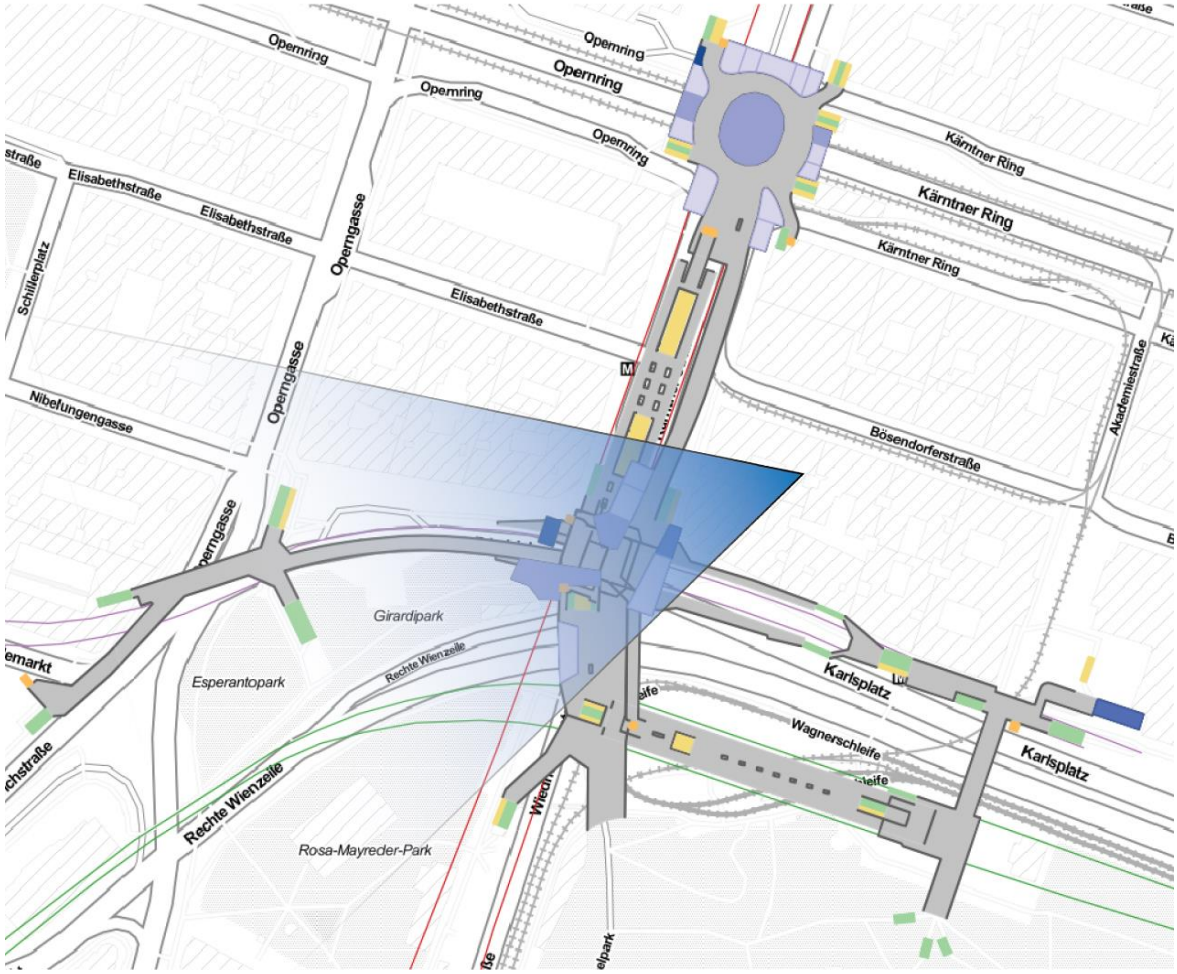

SOS
SOS

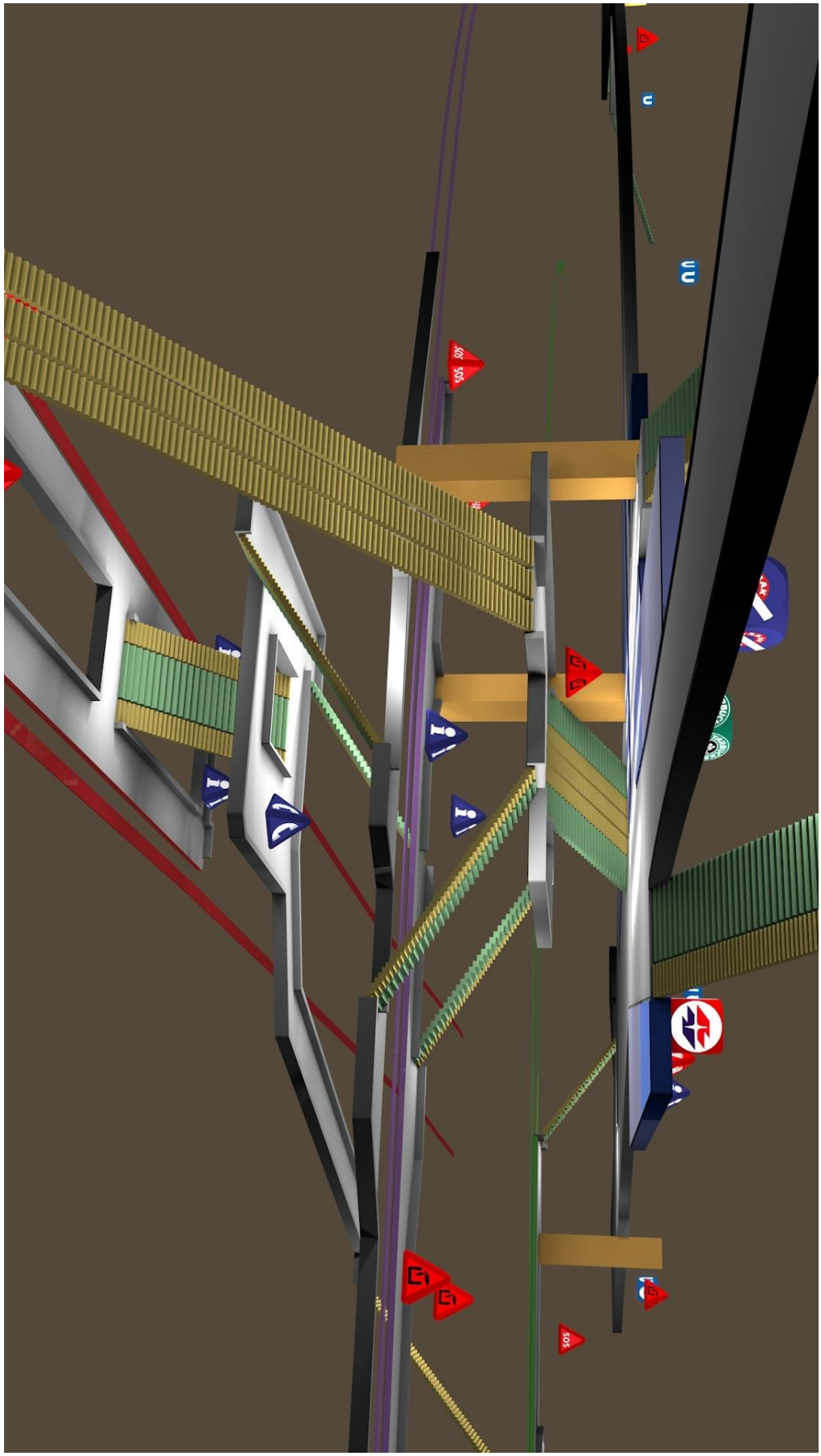
Field of View



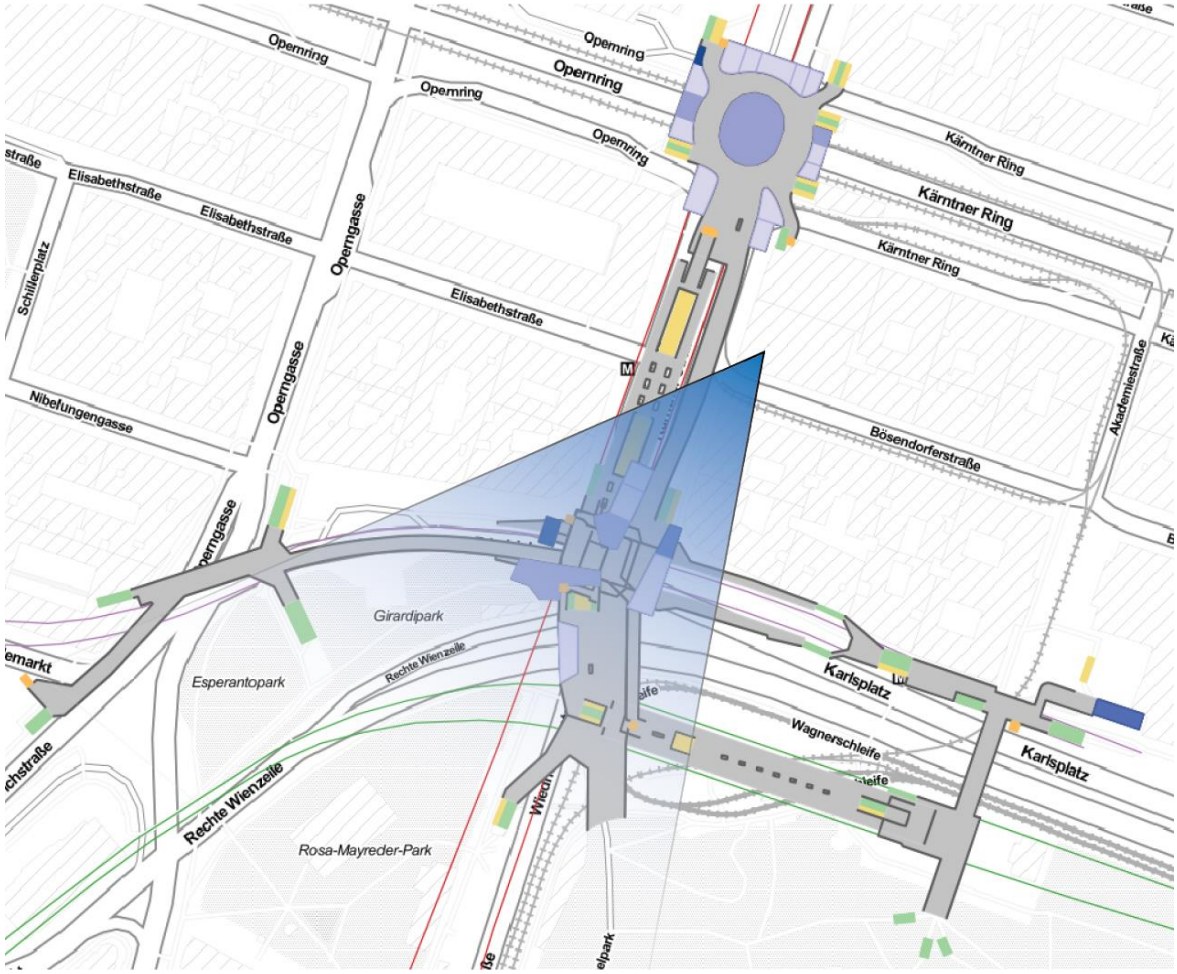

STARBUCKS
COFFEE

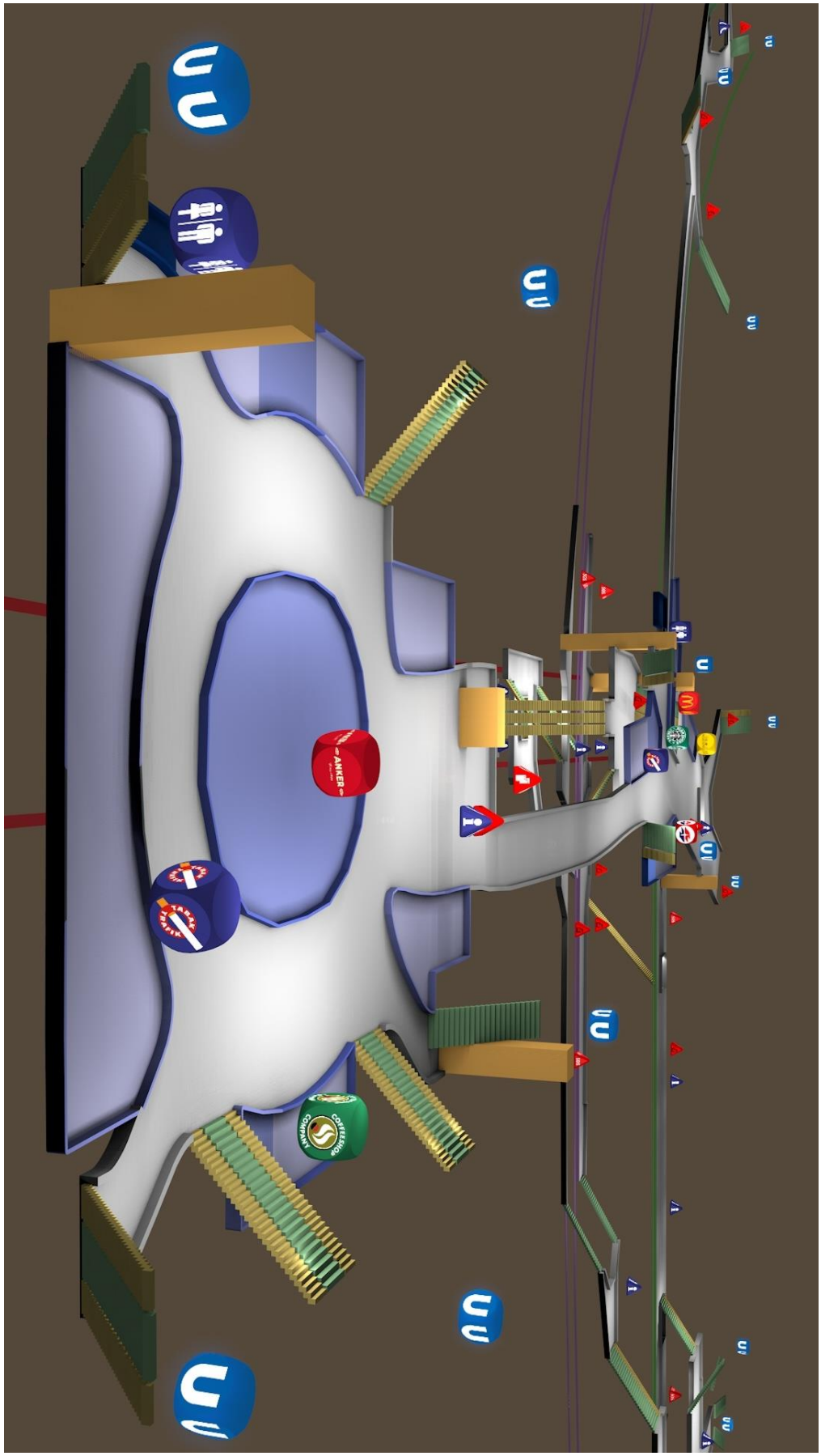
Field of View

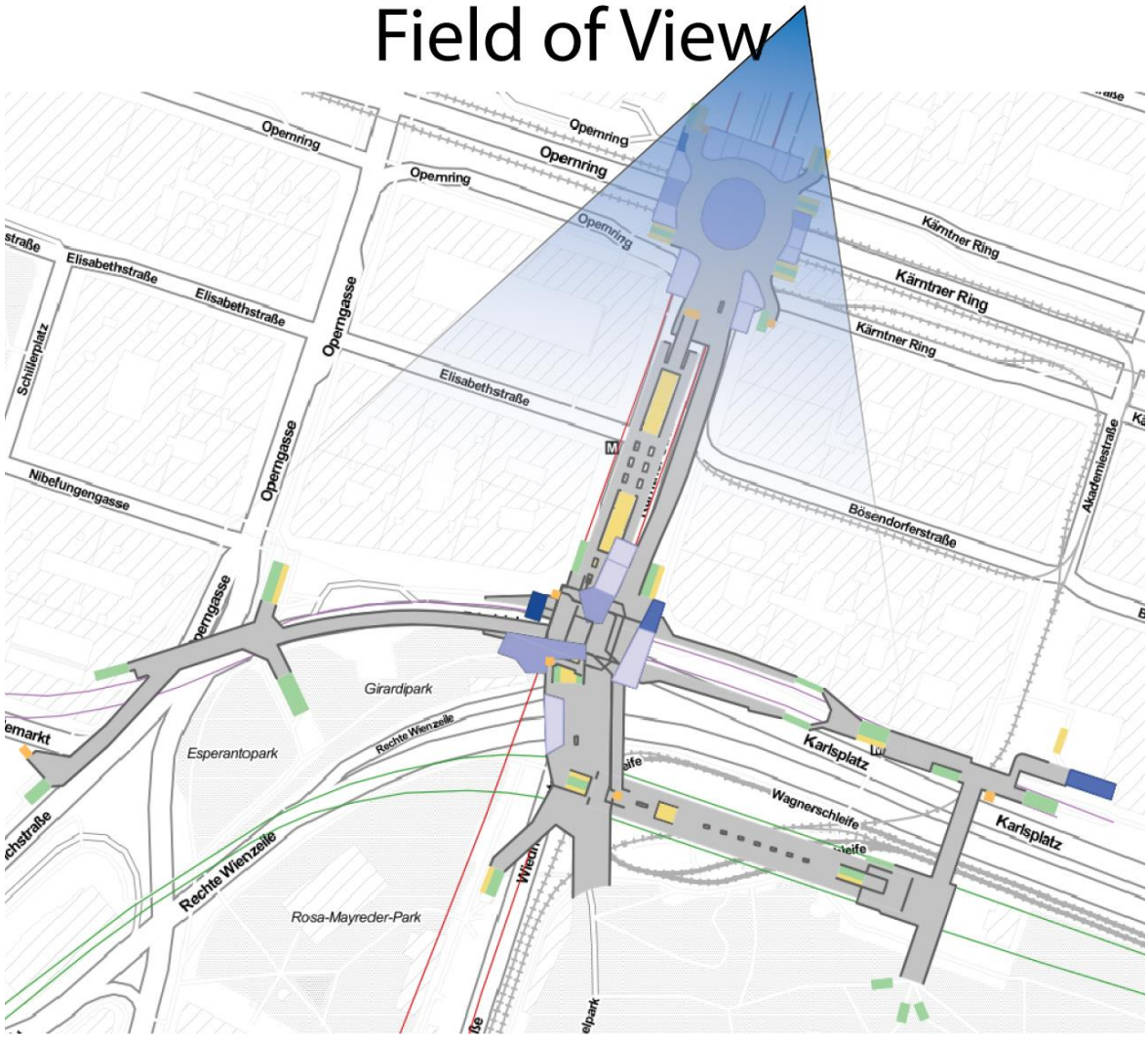


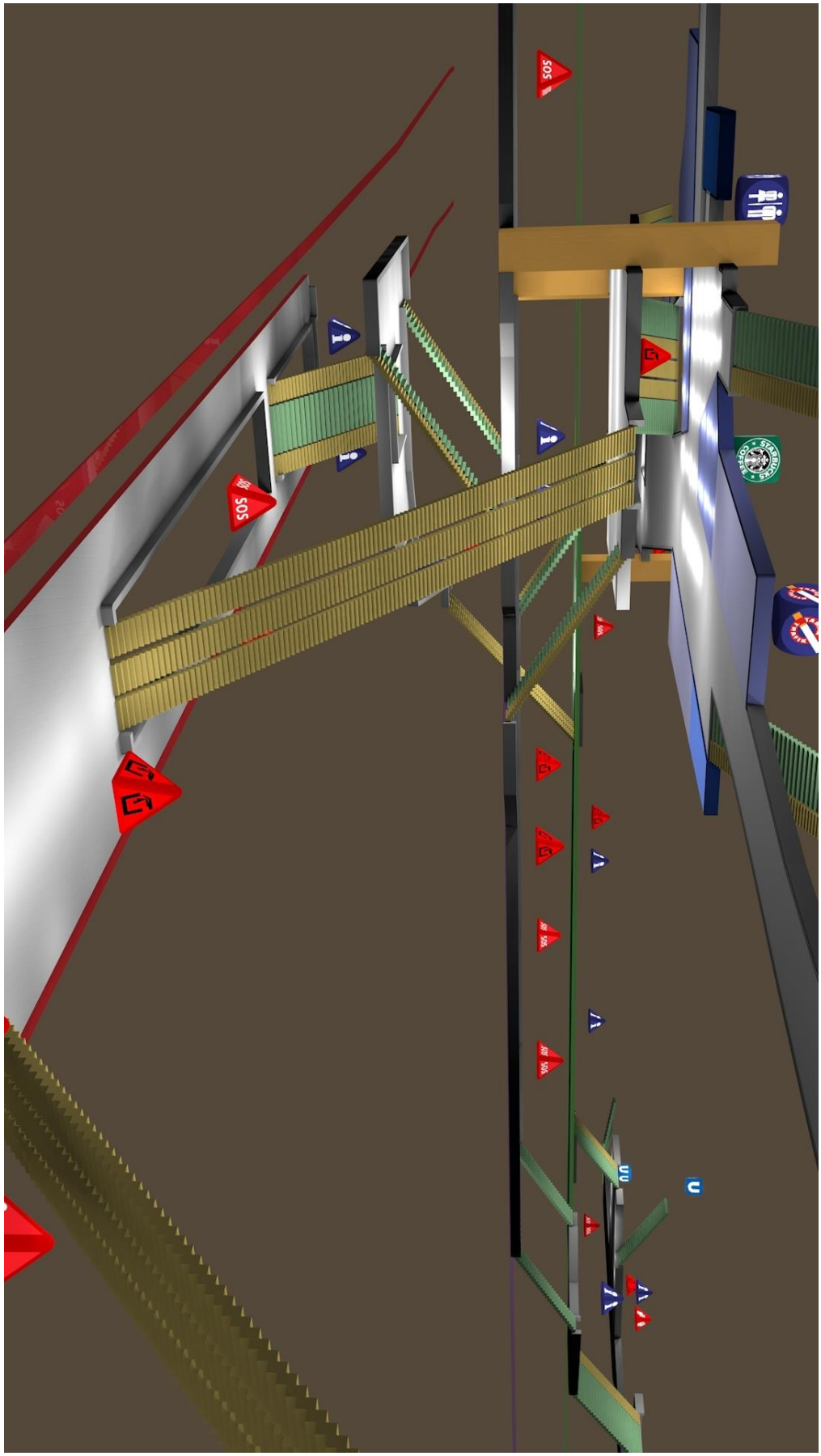


Field of View

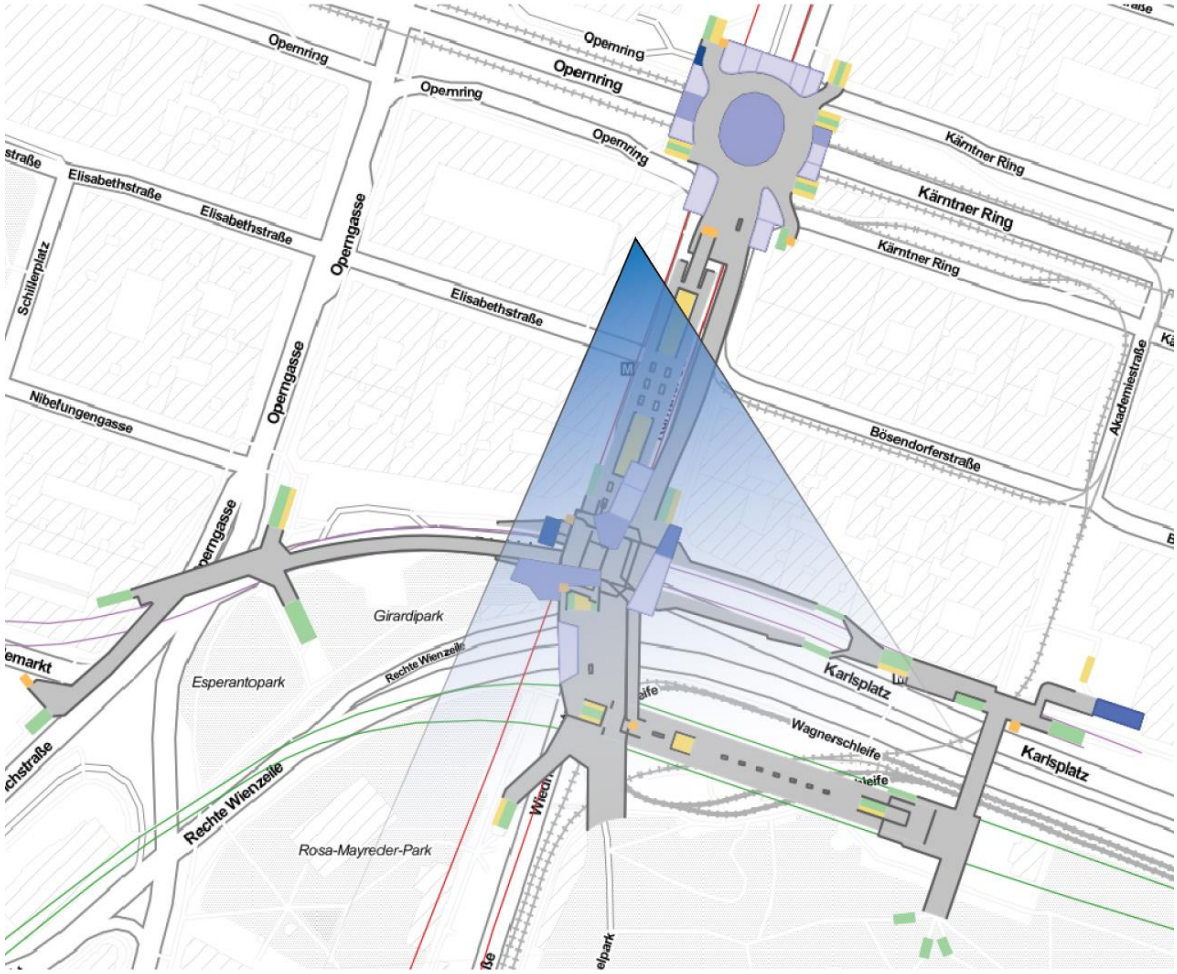


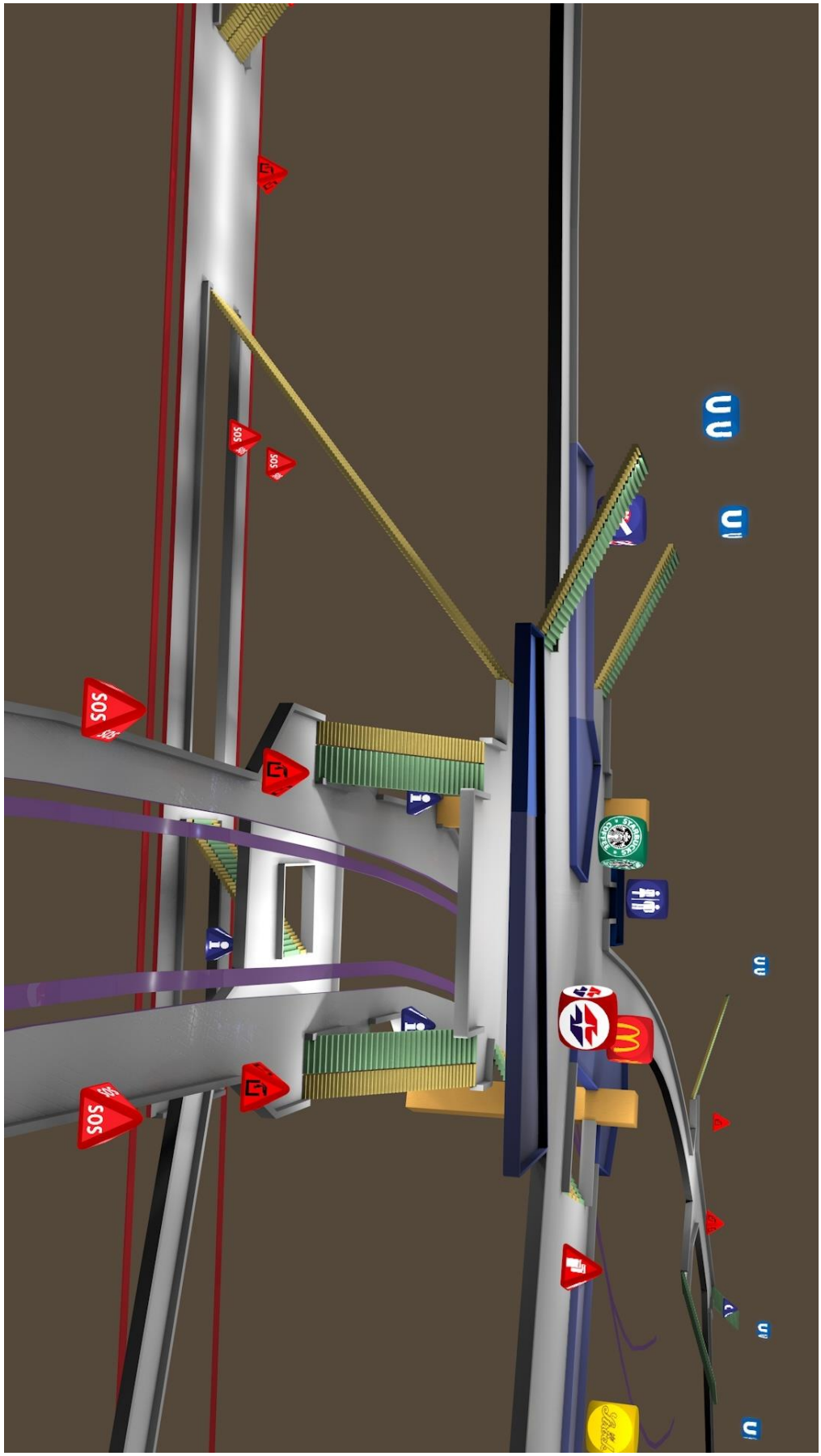

ANKER
COMPANY


Field of View
Opernring
Opernring
Opernring
Opernring
Kärntner Ring
Kärntner Ring
Kärntner Ring
Elisabethstraße
Elisabethstraße
Elisabethstraße
Schillerplatz
Operngasse
Operngasse
Nibelungengasse
Bösendorferstraße
Akademiestraße
Girardipark
Esperantopark
Rechte Wienzeile
Rechte Wienzeile
Rosa-Mayreder-Park
Karlsplatz
Karlsplatz
Wagnerschleife

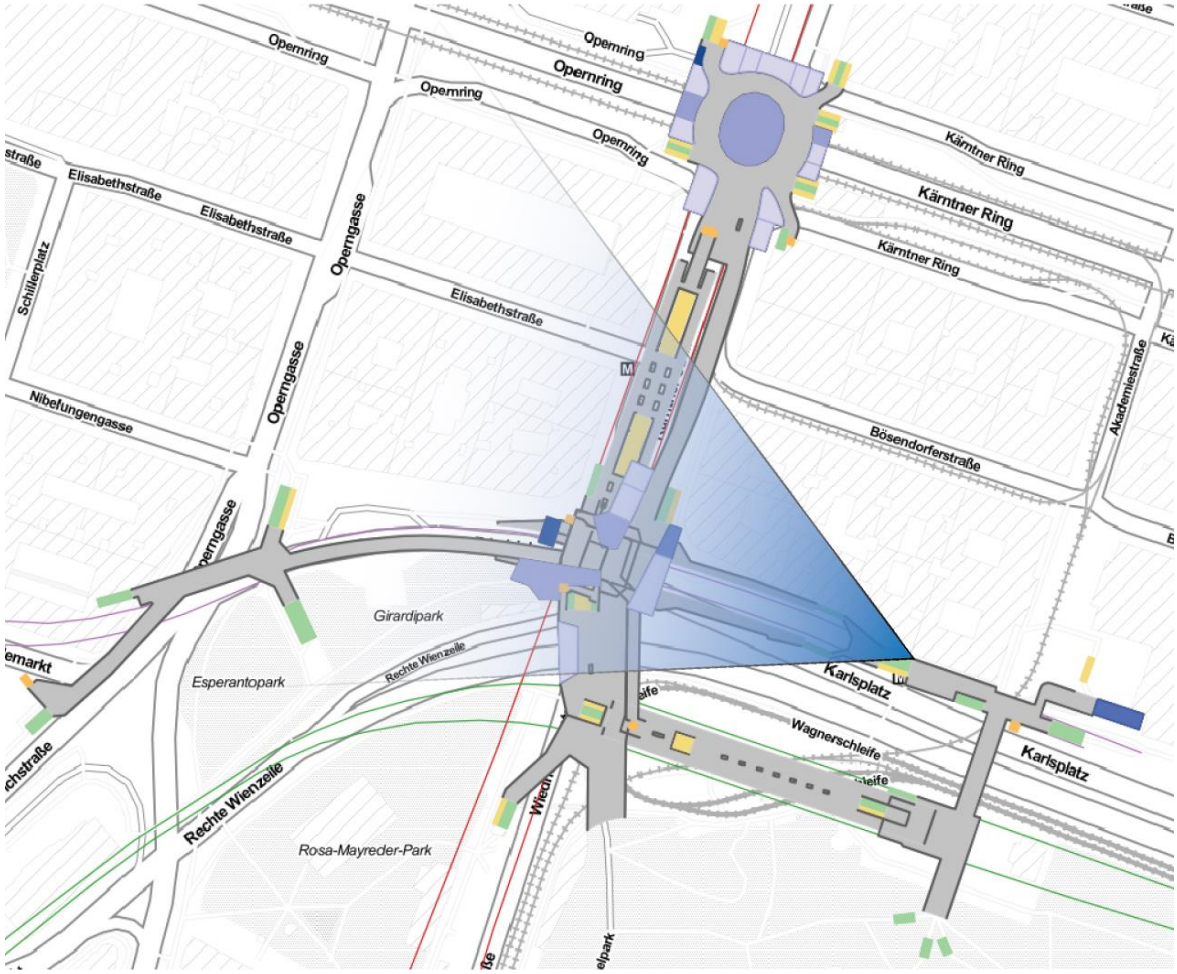

SOS
SOS
SOS
SOS
SOS

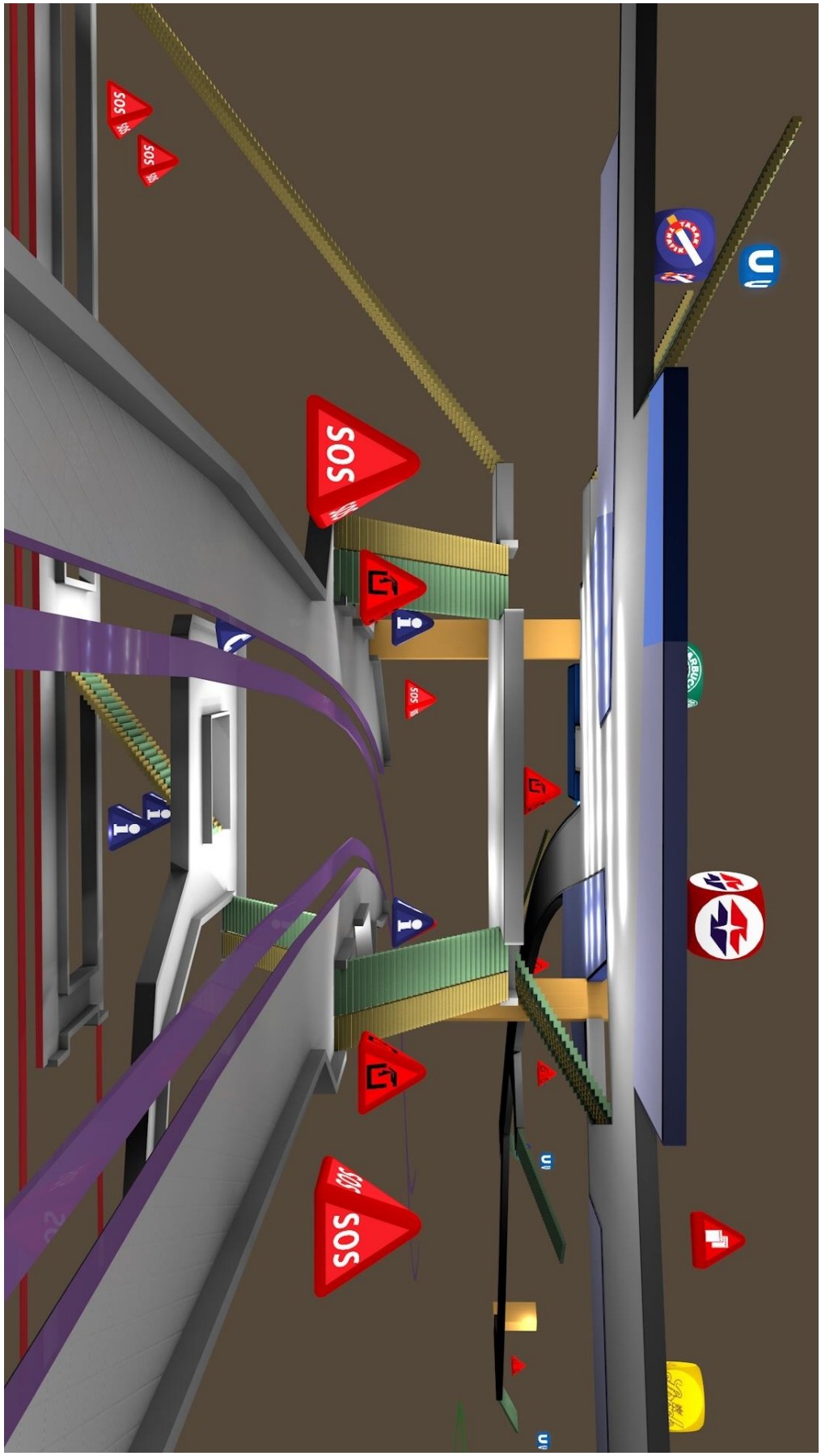
Field of View



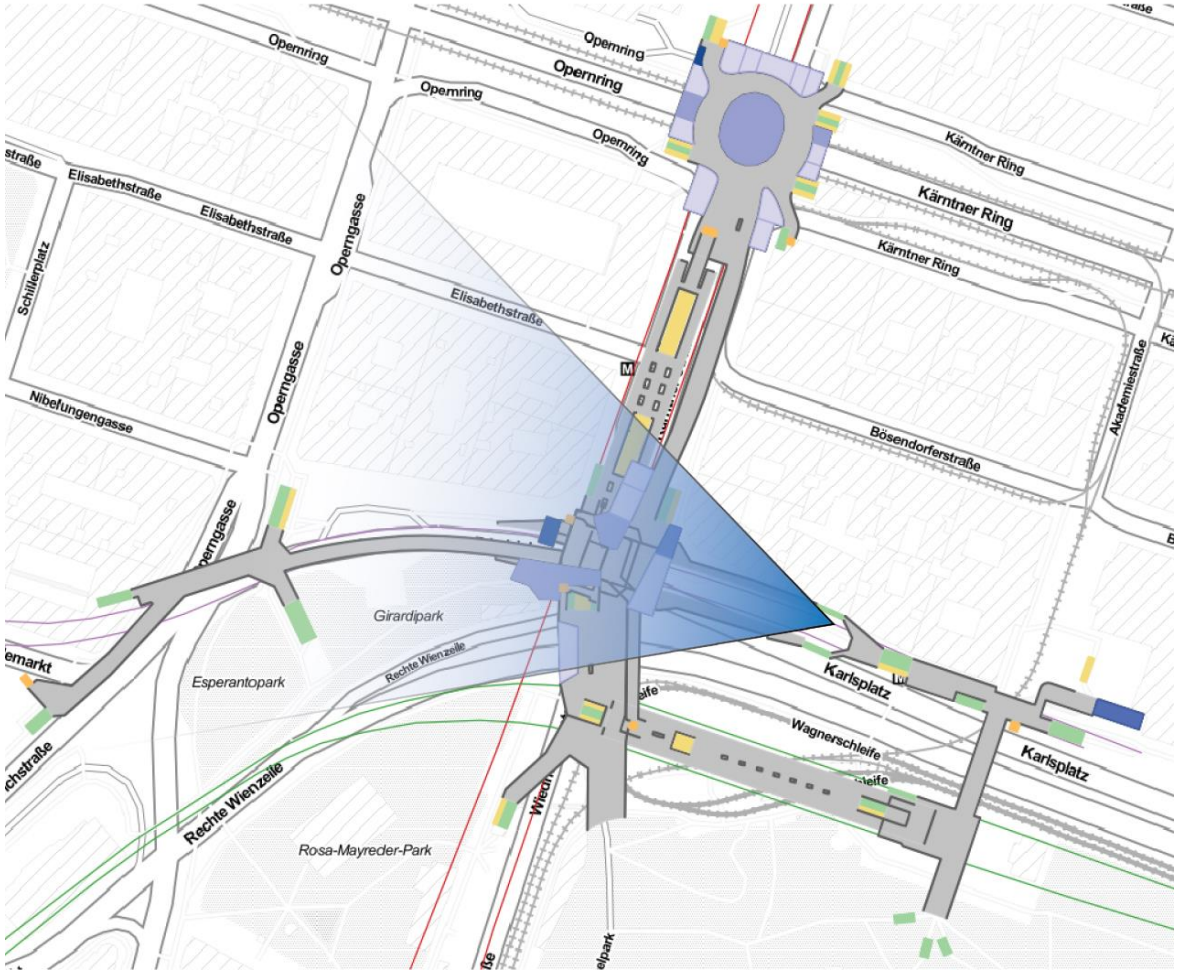

SOS
SOS
SOS
SOS

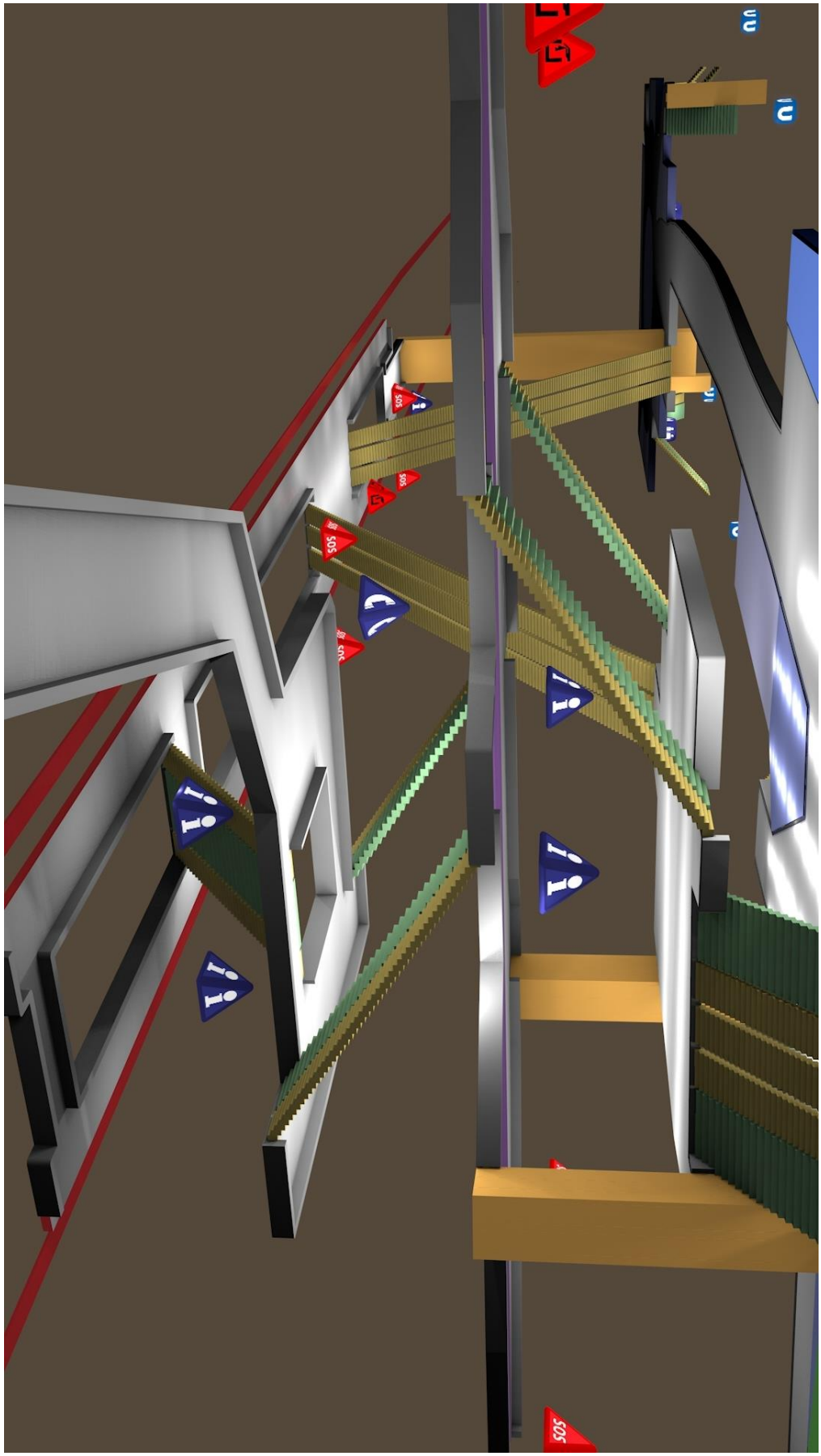
Field of View



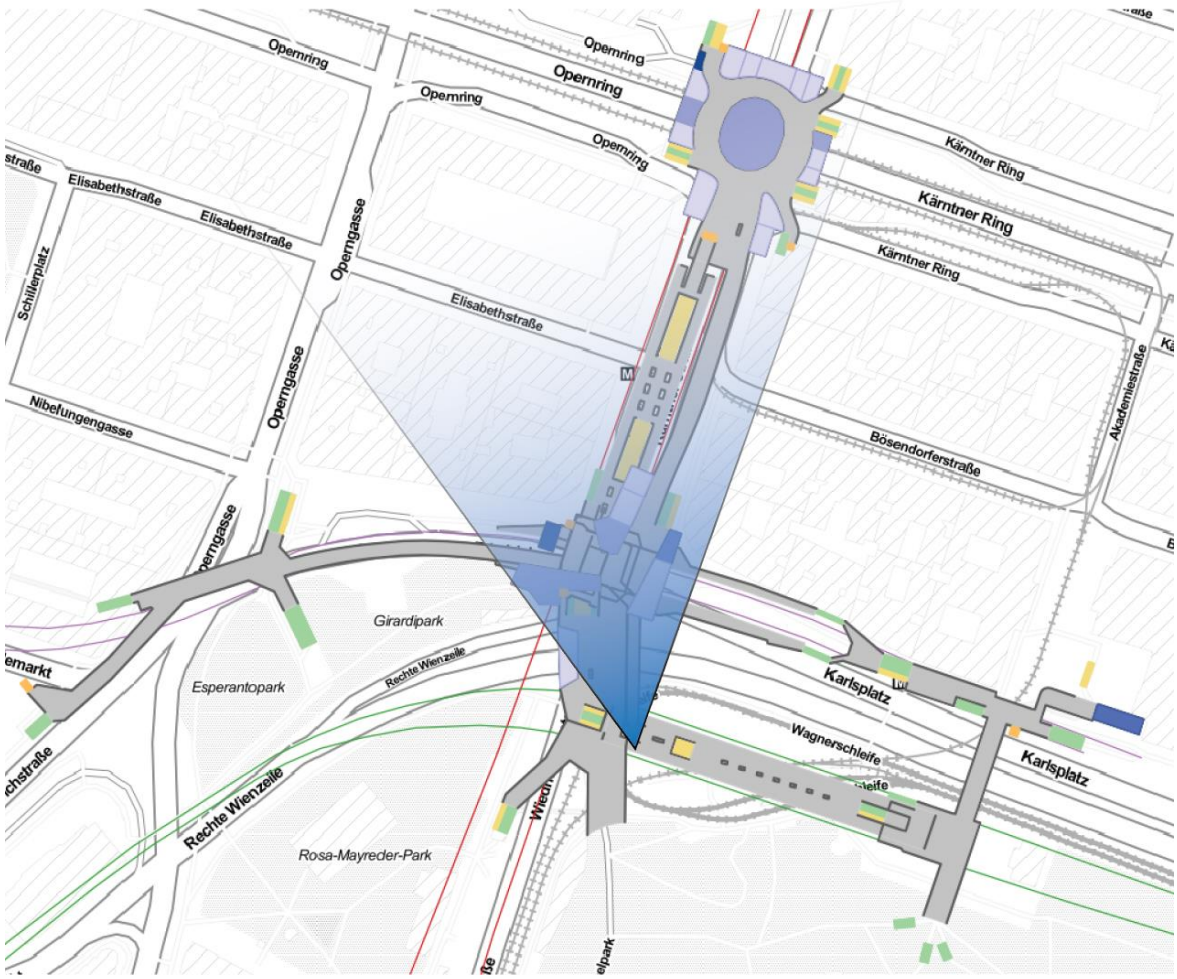

SOS
SOS
SOS
SOS

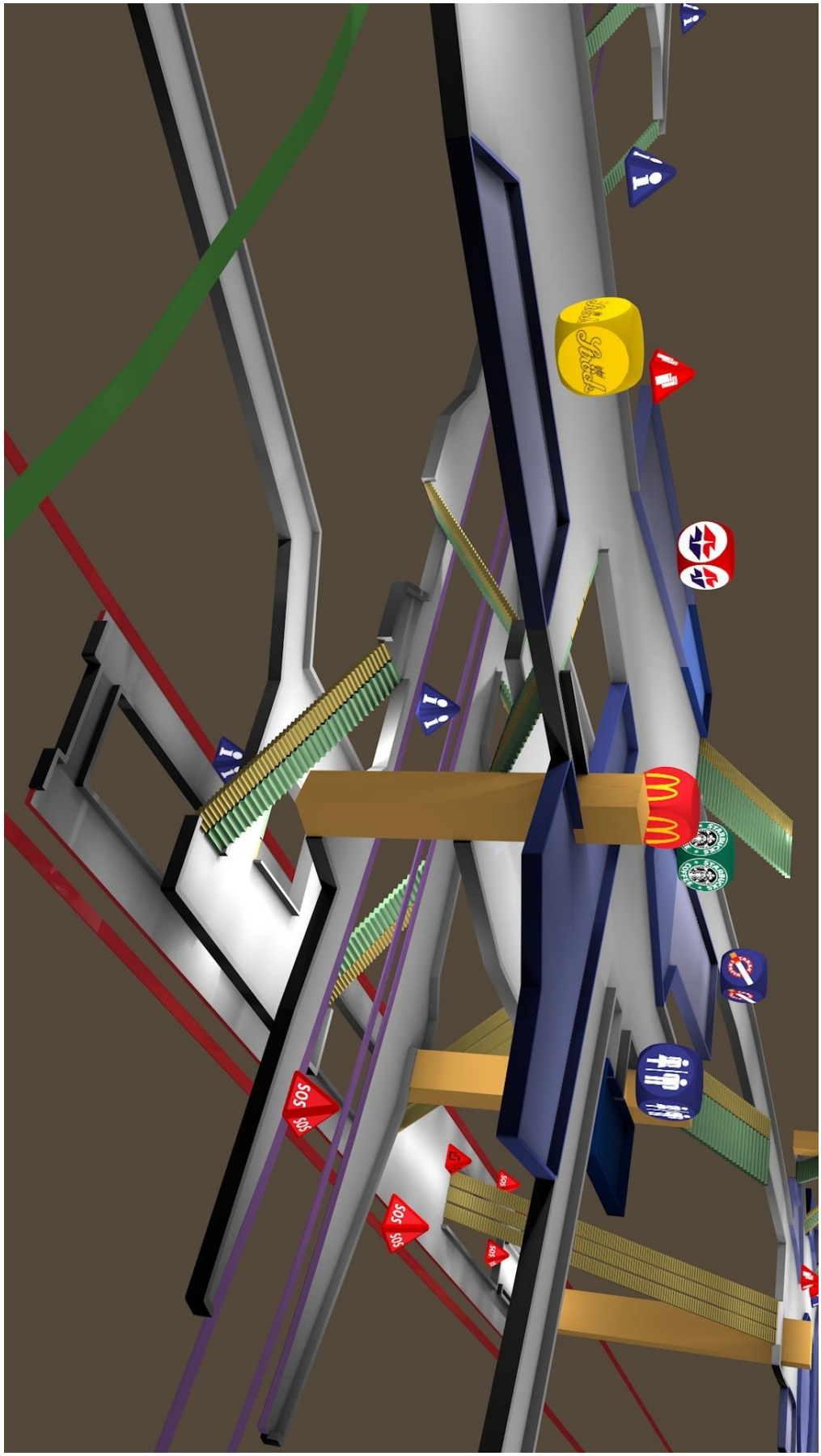
Field of View



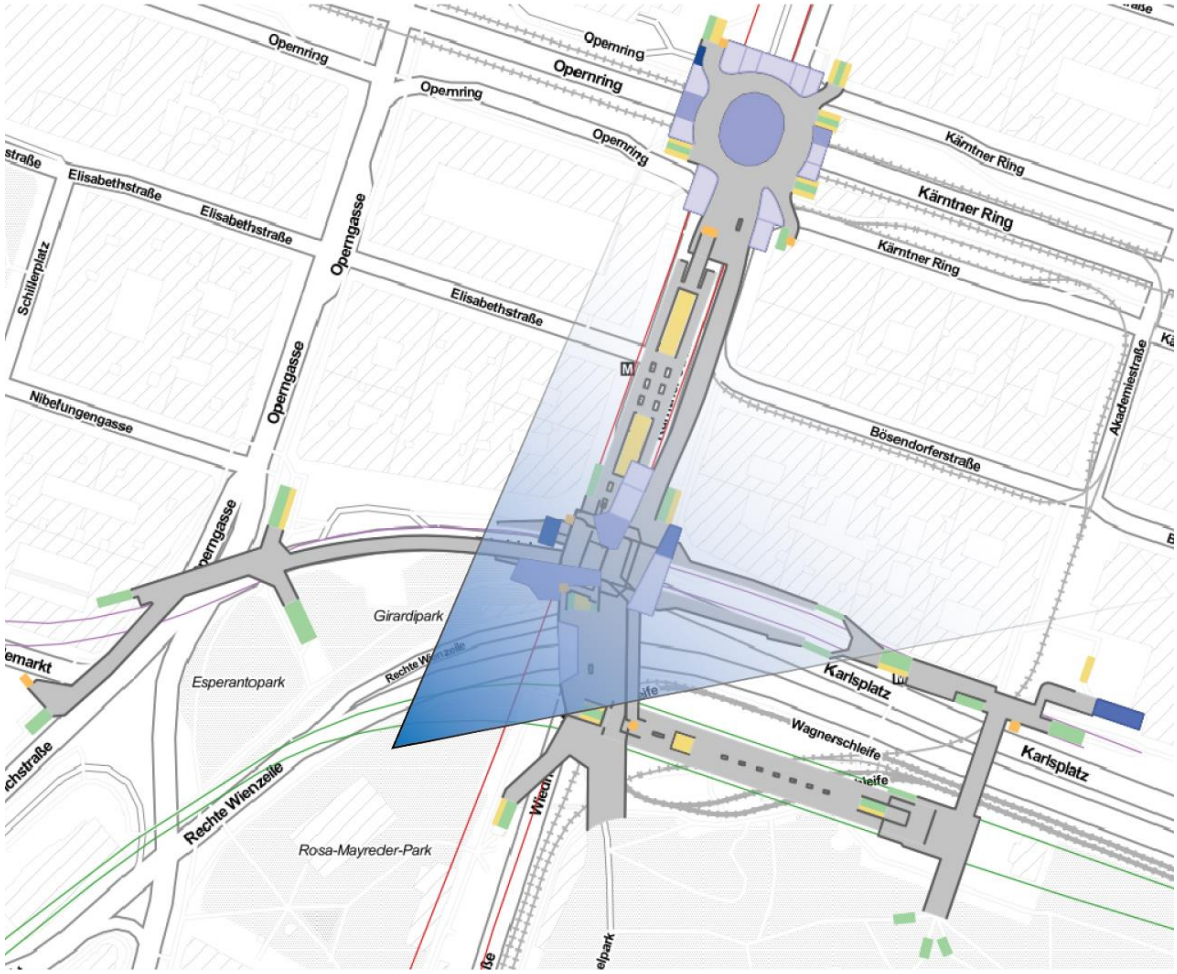

SOS
SOS
SOS
SOS

Field of View



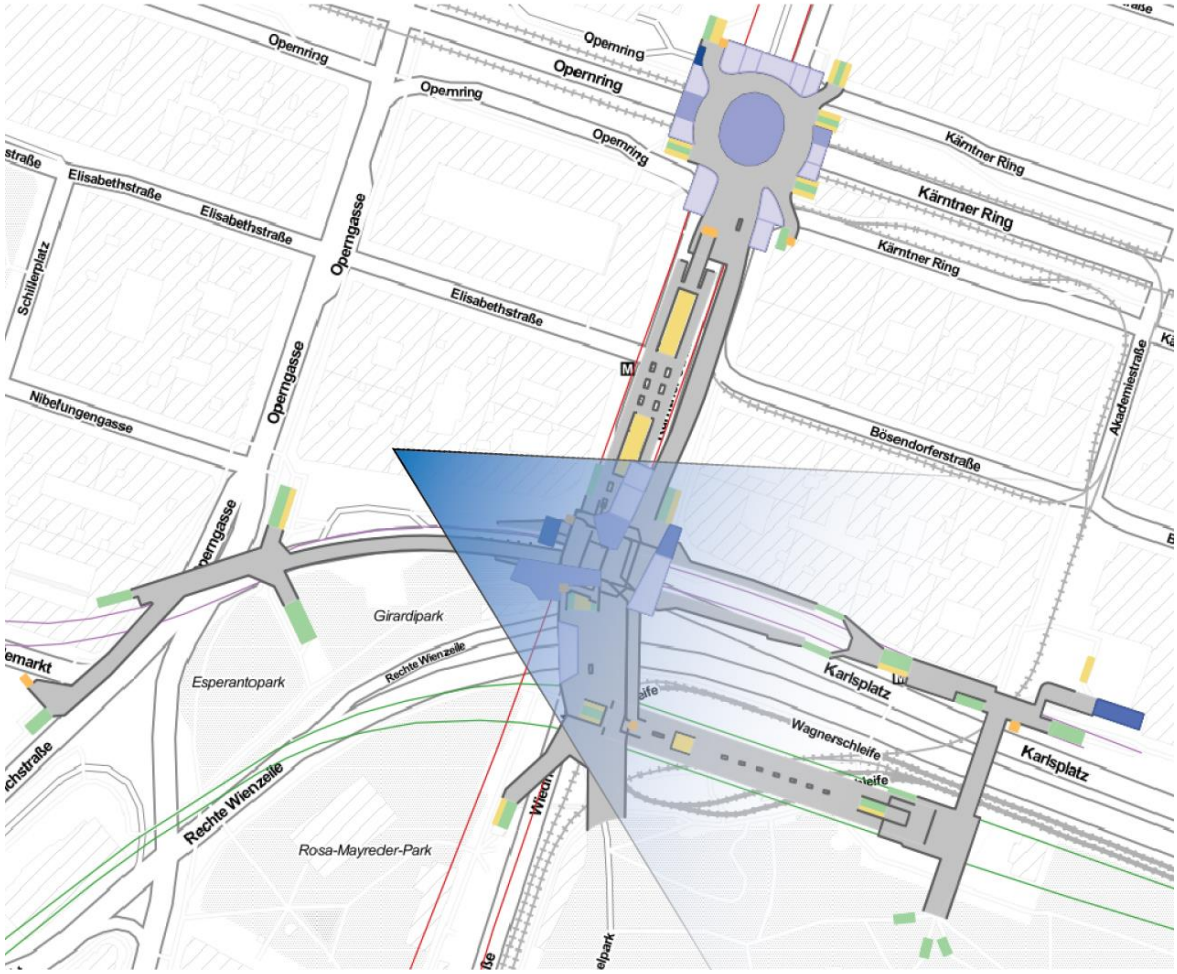

SOS
SOS
SOS
SOS

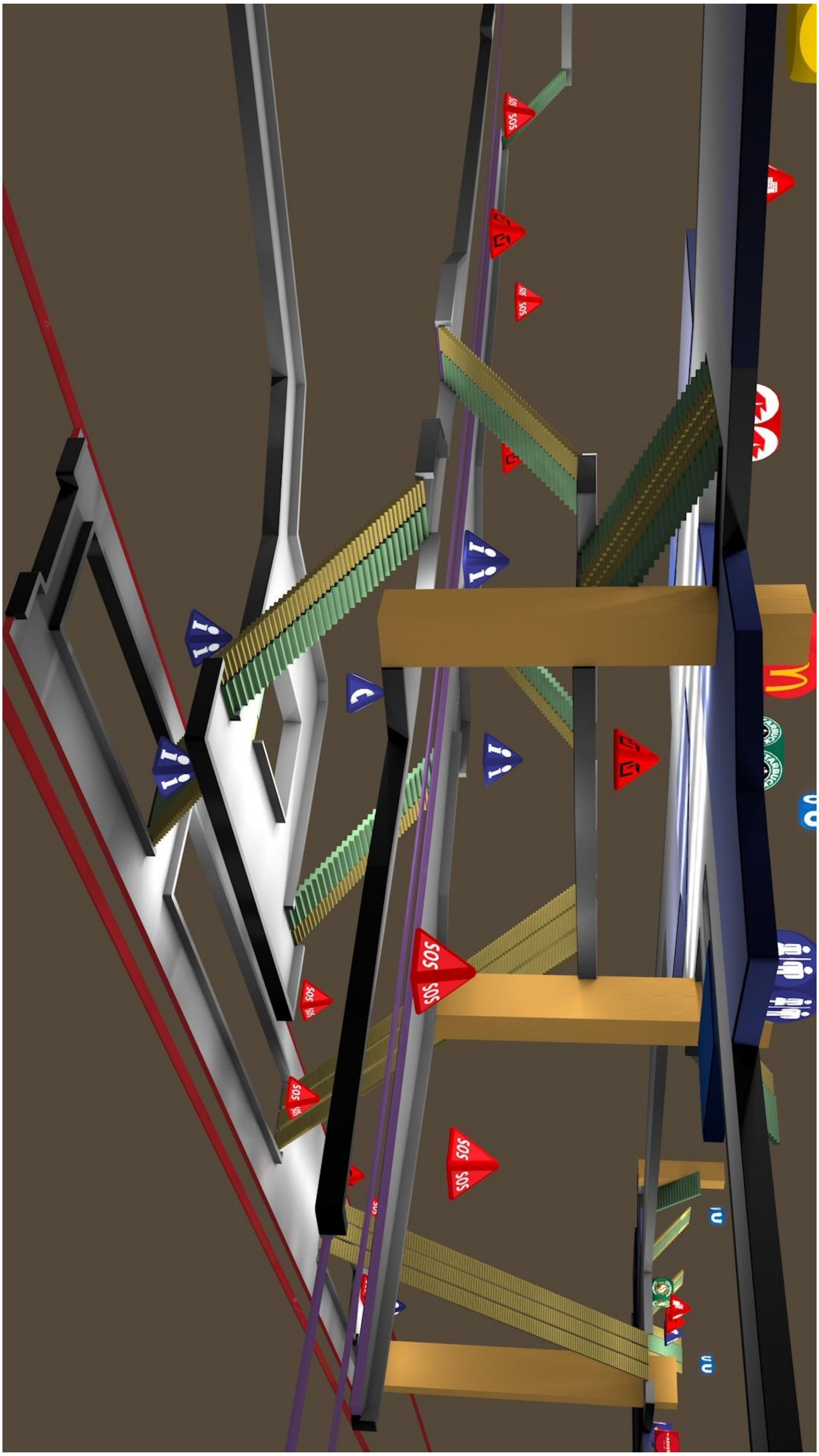
Field of View



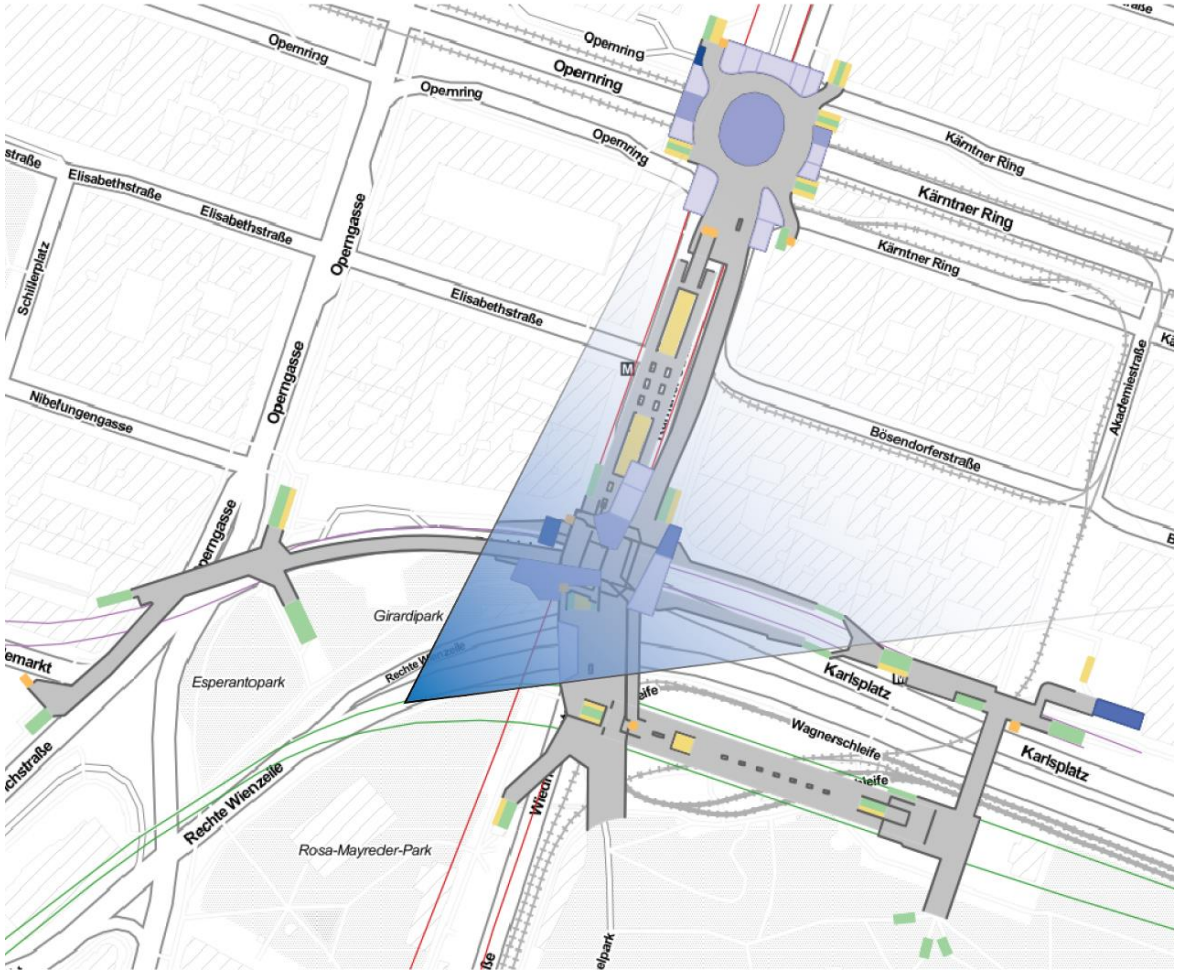
SOS
SOS
SOS

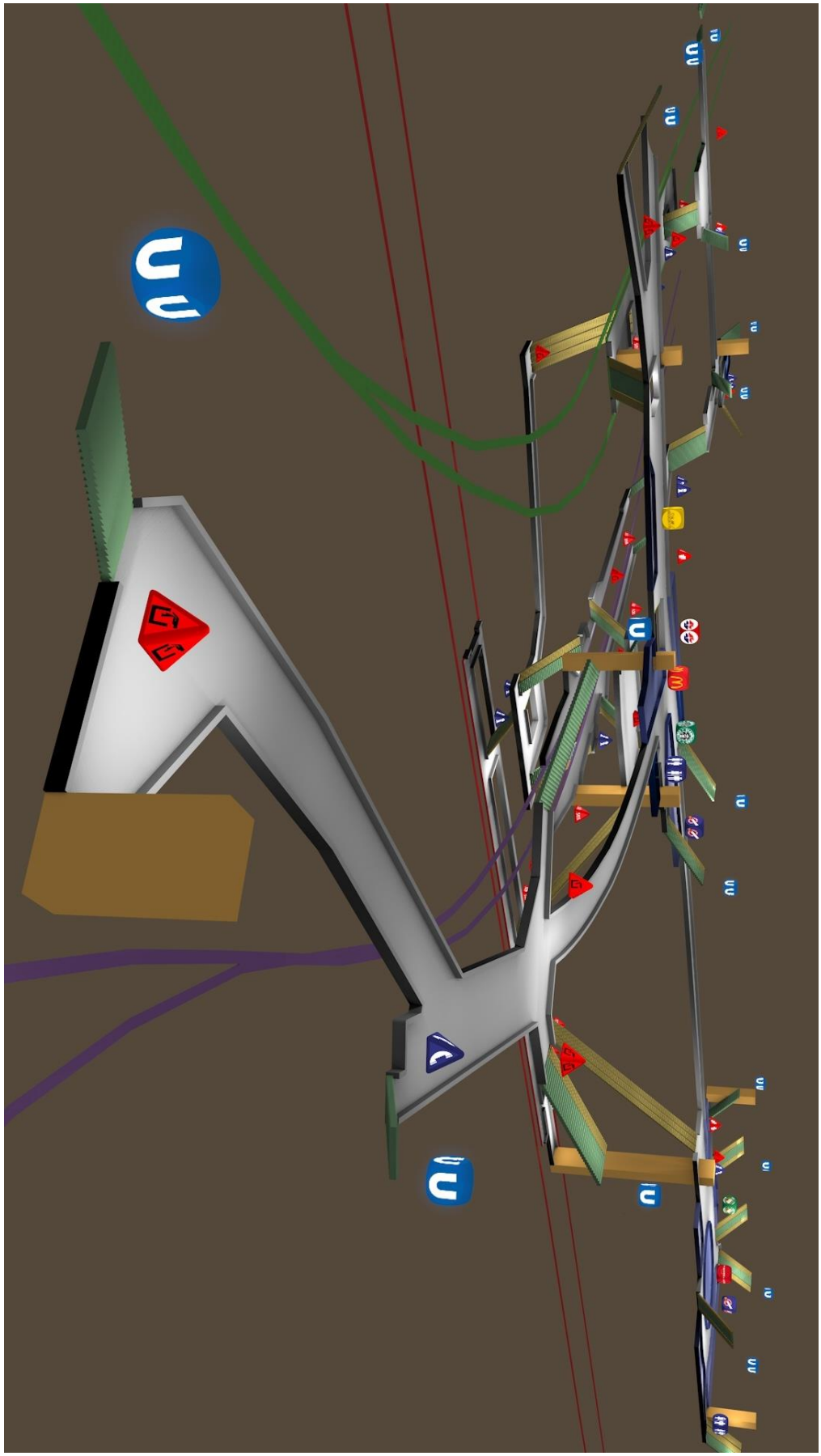
Field of View



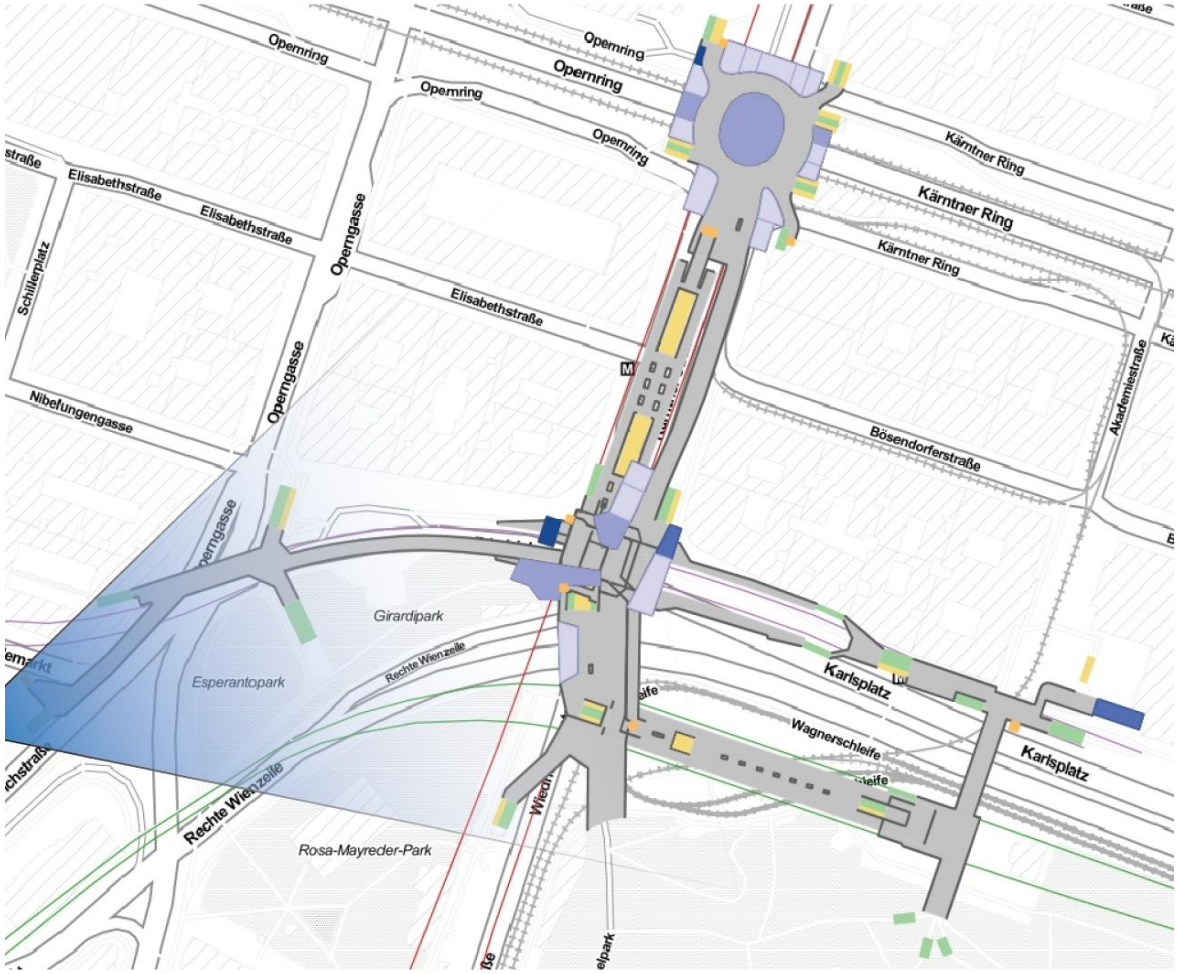


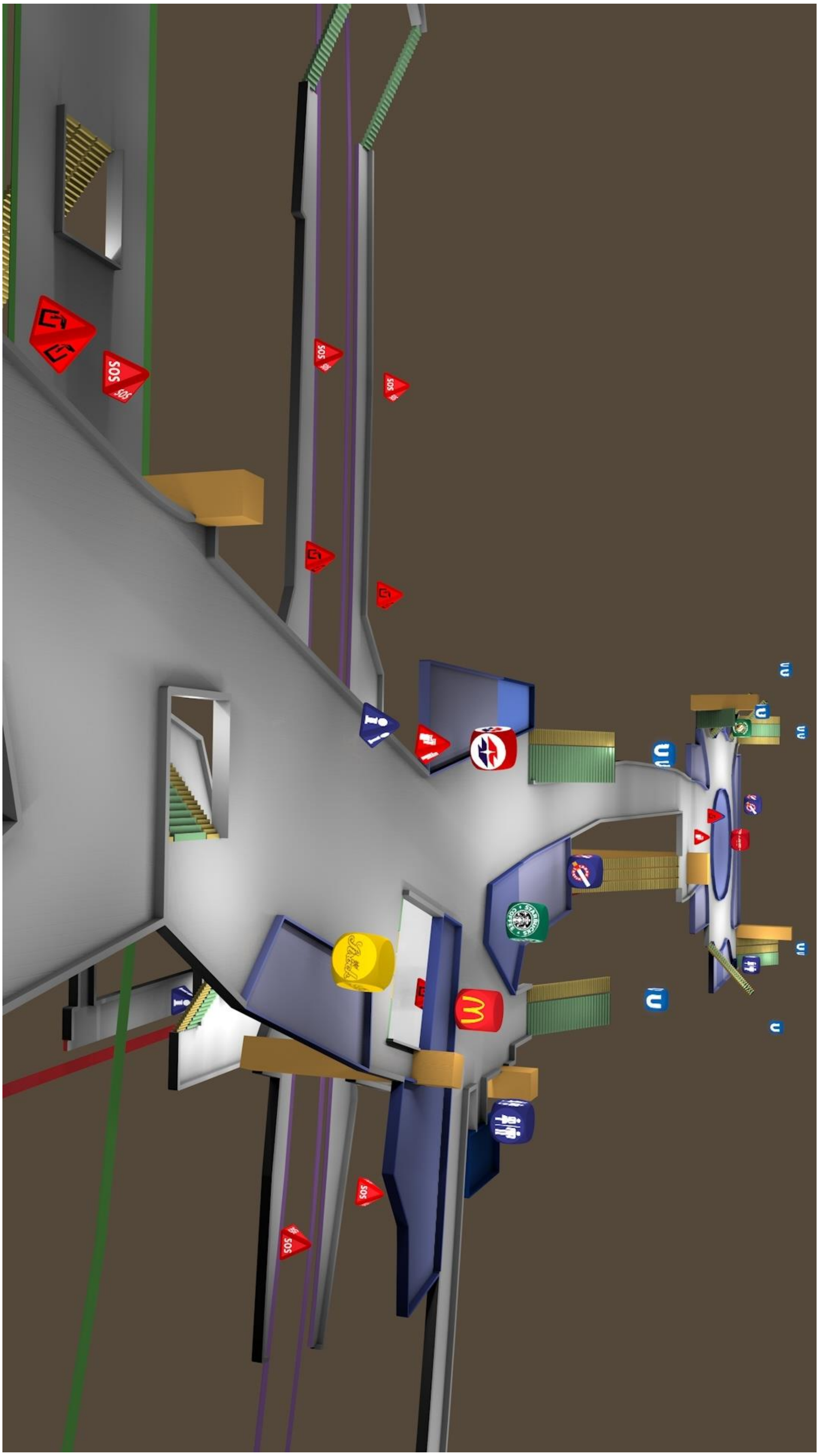
Field of View



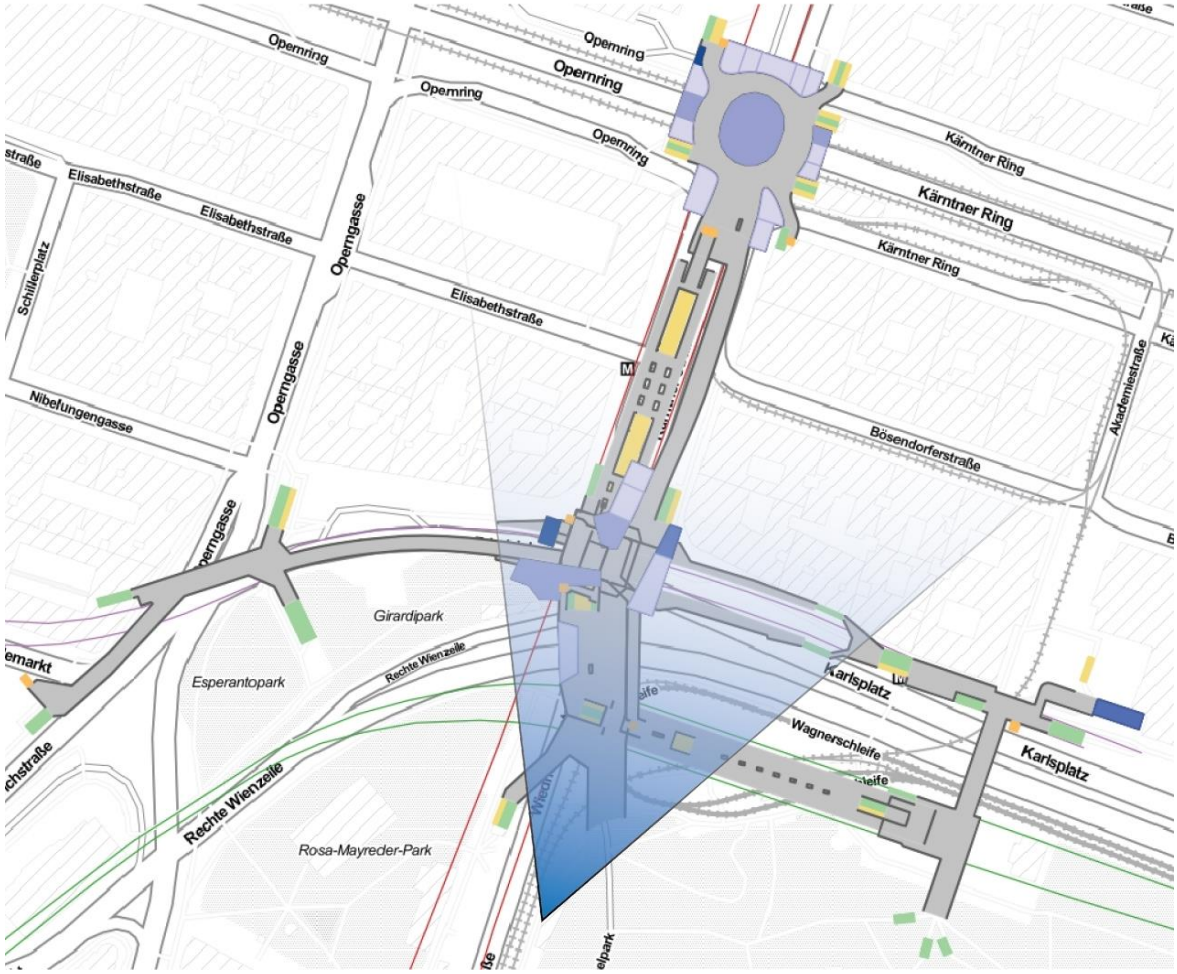


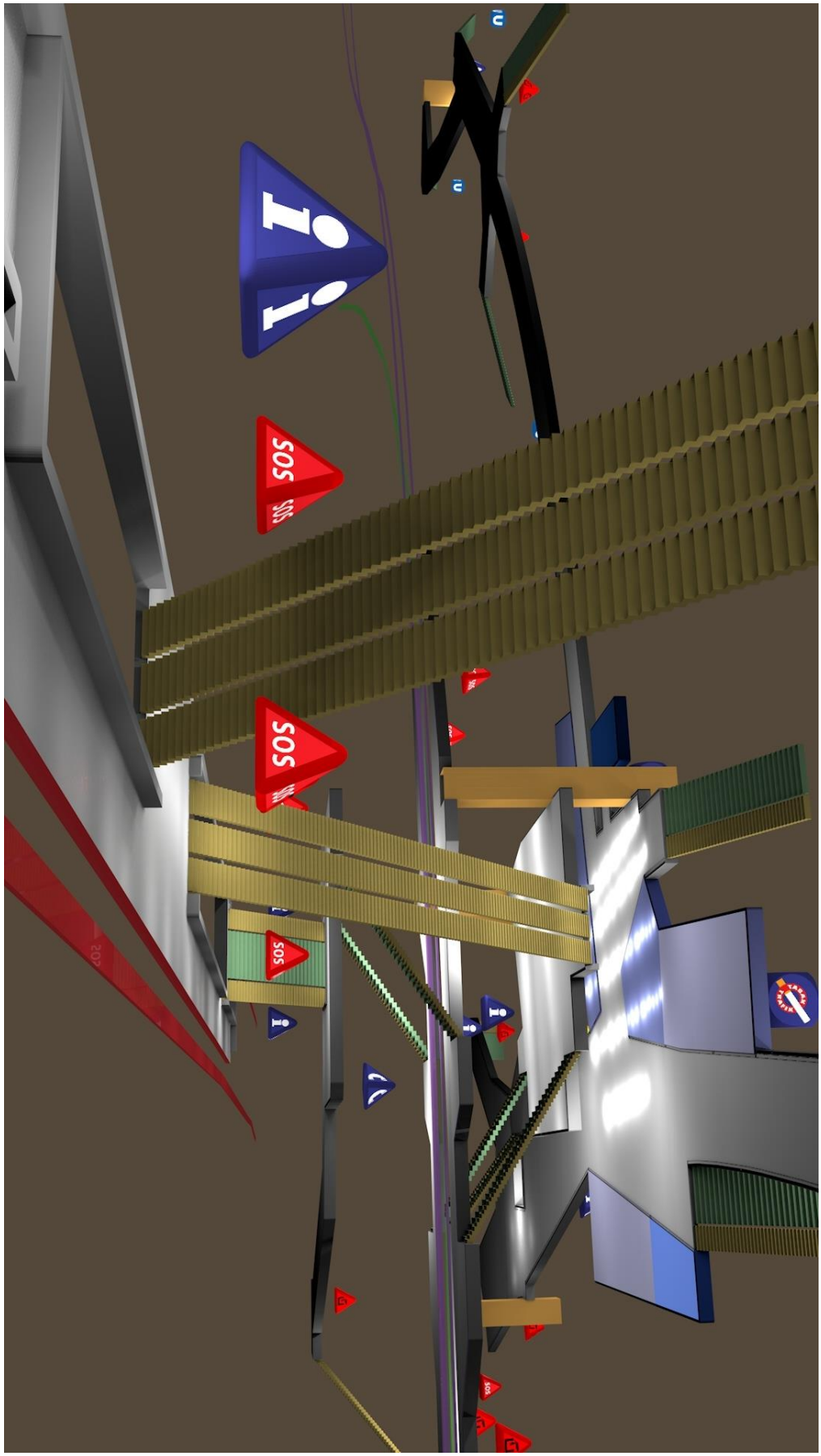
Field of View



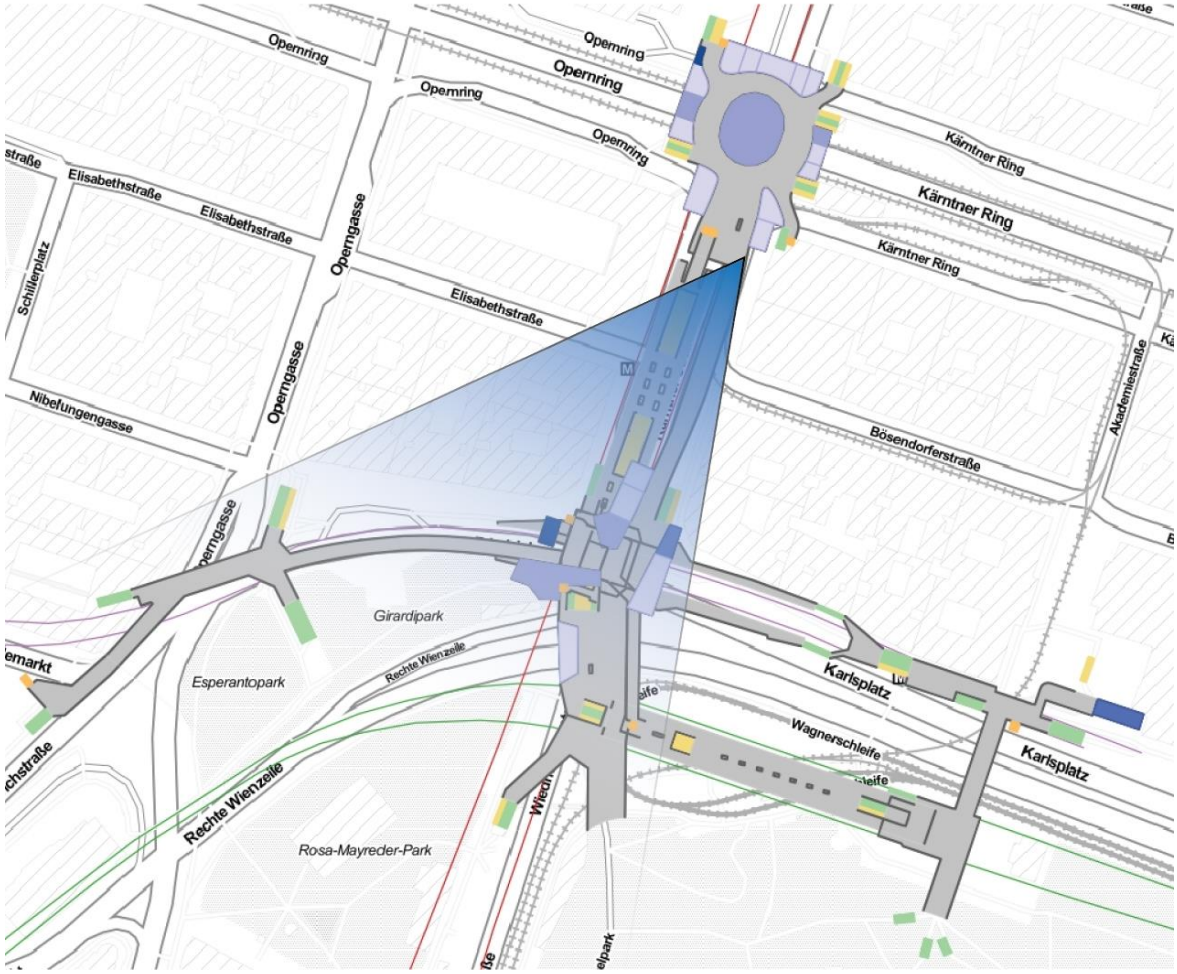


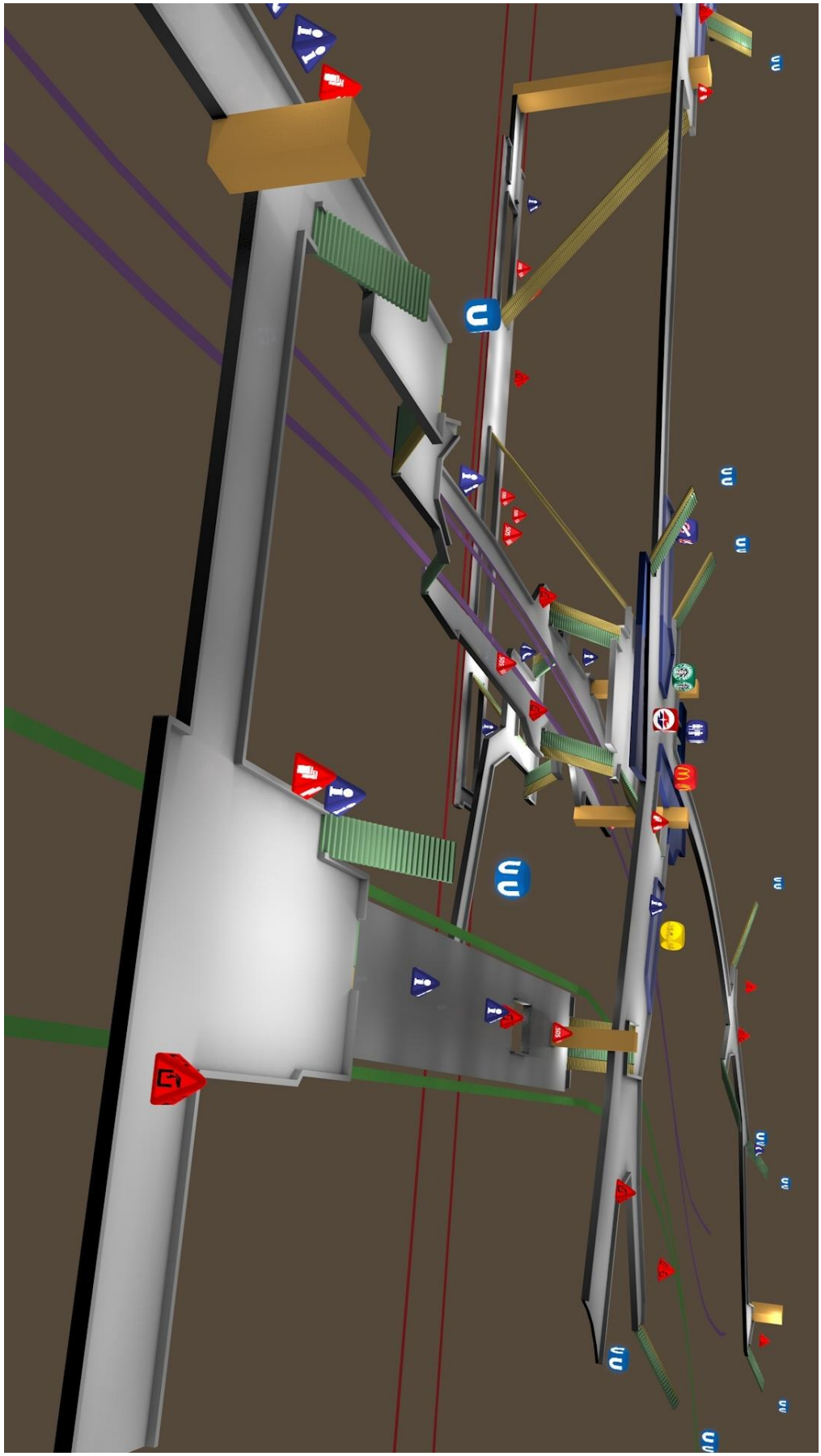
Field of View



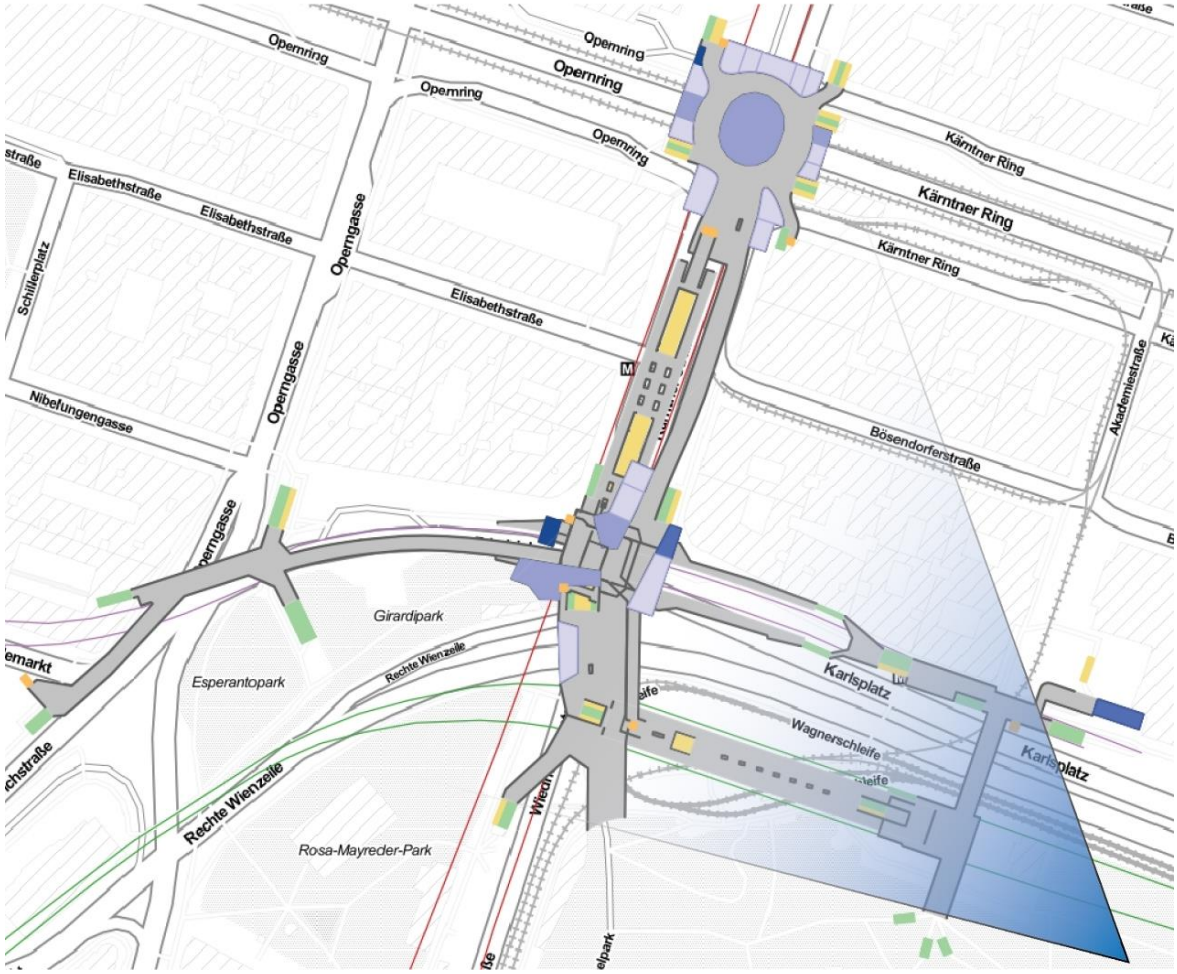

SOS
SOS
SOS

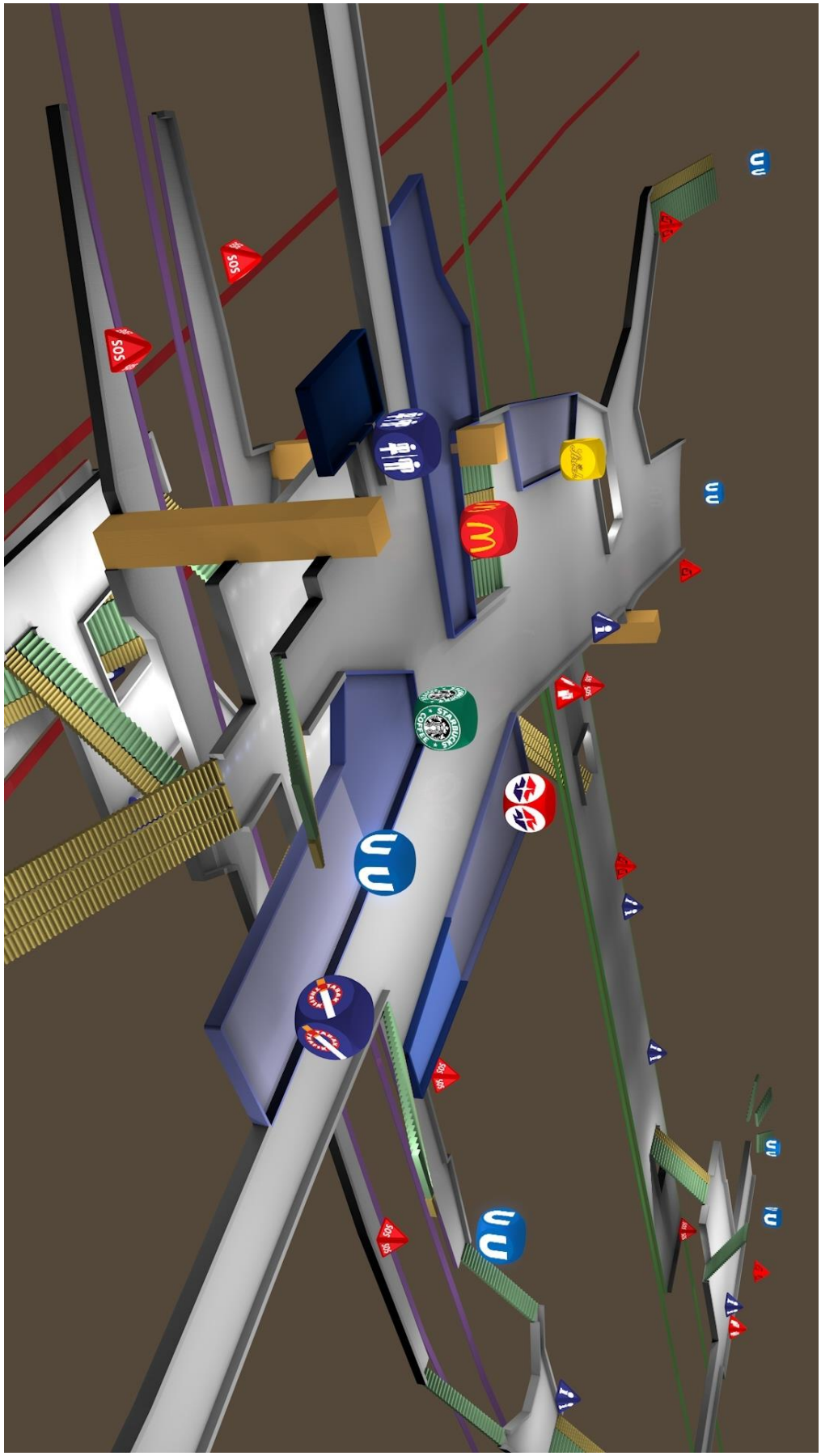
Field of View



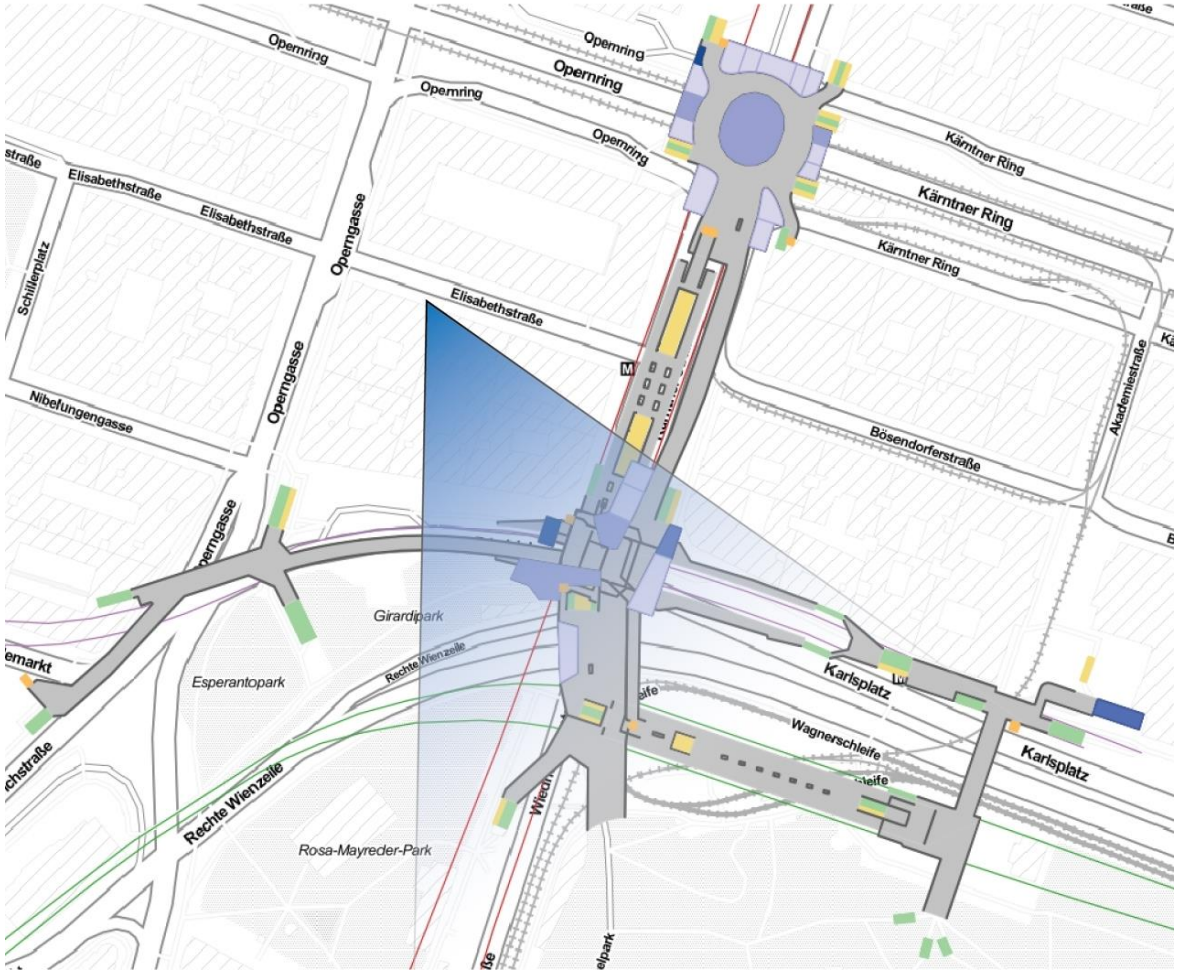


Field of View





Field of View



Ich versichere:

- dass ich die Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Publikationen entnommen sind, als solche kenntlich gemacht sind.
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Datum Unterschrift