

MULTIMODALE NAVIGATIONSANWENDUNGEN FÜR CITYGML MITTELS GRAPHDATENBANKEN

Felix Olbrich, Thomas H. Kolbe

Zusammenfassung: Dieser Beitrag demonstriert das Potenzial des CityGML-3.0-Standards zur Modellierung von Verkehrsnetzen für multimodale und kombinierte Indoor- und Outdoor-Navigationsanwendungen unter Verwendung einer Graphdatenbank für die Suche kürzester Wege und zur Ermittlung optimaler Routen. Zu diesem Zweck wurde ein Testdatensatz erstellt, der Vermessungsdaten des Straßenraums, die in OpenDRIVE modelliert wurden, sowie ein von Hand modelliertes Parkhaus, das Verkehrsflächen und Gebäudeelemente kombiniert, zusammenführt. Der Ansatz nutzt eine Graphdatenbank, um den abgebildeten CityGML-Datensatz zu analysieren und kürzeste Routen zu finden, die verschiedene Verkehrsarten nutzen und Innen- und Außenräume in einer einzigen Suche verbinden. Die Routenergebnisse werden anschließend im virtuellen Cesium-Globus visualisiert.

Schlüsselwörter: CityGML, Graphdatenbanken, multimodal, Navigation, Indoor-/Outdoor

MULTIMODAL NAVIGATION APPLICATIONS FOR CITYGML 3.0 USING A GRAPH DATABASE

Abstract: This work explores the potential of the reworked CityGML transportation module in version 3.0 for multimodal routing including a combined usage of indoor and outdoor spaces. CityGML 3.0 conform data is derived from an initial OpenDRIVE dataset to obtain detailed street space data. The resulting CityGML dataset is enriched with a hand-modeled parking garage and then mapped to a Neo4j graph database. Further preprocessing in the database creates a multimodal routing network. The proposed approach can find the shortest paths in a multimodal transportation network connecting street and building elements. Route results are visualized using the Cesium virtual globe.

Keywords: CityGML, graph database, multimodal, navigation, indoor-outdoor

1 EINFÜHRUNG

Navigation ist eine der prominenten Anwendungen der Geodäsie. Denn hier vereinen sich die verschiedenen geodätischen Disziplinen. Messdaten und Datenmodelle, Algorithmen sowie Kartenvisualisierungen erzeugen ein Produkt, das uns tagtäglich begleitet. Während es bereits sehr gute Navigationsanwendungen für Fahrzeug-, Fußgänger- oder Fahrradnavigation sowie den öffentlichen Nah- und Fernverkehr, aber auch spezialisierte Innenraumnavigationssysteme (Schuldt et al. 2022) gibt, so fehlt weiterhin eine durchgehende Navigationsführung unter Berücksichtigung von Innen- und Außenräumen sowie mehrerer Fortbewegungsarten. Ruhdorfer et al. (2018) konnte bereits die Kopplung von Verkehrssimulation und 3D-Stadtmodellen nachweisen. Allerdings wurde in dieser Arbeit angemerkt, dass das City-Geography-Markup-Language-(CityGML-)Transport-Modul (CityGML Version 2) weiterentwickelt werden muss, um Verkehrsinfrastrukturen besser abzubilden.

Die aktuelle Version 3.0 des internationalen Open-Geospatial-Consortium-(OGC-)Standards CityGML bietet ein vielversprechendes Konzept zur integrierten Modellierung von Verkehrsräumen (TrafficSpace) im Außen- sowie im Innenraum von Gebäuden (Beil

et al. 2020, Kolbe et al. 2023). Zudem ermöglicht das überarbeitete Transportmodul von CityGML 3.0 die spurgenaue Modellierung von Straßennetzwerken sowie die Darstellung verschiedener Fortbewegungsarten (z. B. Fußgänger, Fahrrad, Automobil) in einem konsistenten Datenmodell (Beil et al. 2022).

Dieser Beitrag basiert auf den Ergebnissen der Masterarbeit von Olbrich (2023) und untersucht das Transportmodul und die Anwendbarkeit der aufgezählten Aspekte zur Berechnung optimaler Routen in einem CityGML-Datensatz mit Verkehrsnetzwerken für Fußgänger und Fahrzeuge (Olbrich 2023). Zur Analyse der Netzwerkstruktur wird eine Graphdatenbank eingesetzt.

2 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

Das Ziel des Ansatzes ist die multimodale Analyse von Routen zwischen zwei Straßenraumobjekten eines CityGML-Datensatzes. Aufgrund der Neuheit der aktuellen Version des CityGML-Standards ist die Anzahl verfügbarer Datensätze mit detaillierten Straßenräumen stark begrenzt. Daher wurden Transportnetzwerke, welche ursprünglich im OpenDRIVE-Datenmodell modelliert wurden, nach CityGML überführt (Asam e. V. 2024). Der Prozess zur

Autoren

M. Sc. Felix Olbrich
 Technische Universität München (TUM)
 Arcisstraße 21
 D-80333 München
 E: felix.olbrich@tum.de
 ORCID: 0000-0002-7139-4284

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Thomas H. Kolbe
 Technische Universität München (TUM)
 Arcisstraße 21
 D-80333 München
 E: thomas.kolbe@tum.de
 ORCID: 0000-0003-1456-0423

Erstellung von CityGML 3.0 aus OpenDRIVE-Daten wurde unter Verwendung der Software r:trän durchgeführt (Schwab et al. 2023). Zudem wurde ein handmodelliertes Parkhausgebäude in diesen Straßennetzwerk-Datensatz integriert, um die Anwendung des Ansatzes innerhalb von Gebäuden zu demonstrieren. In den Tests wurden OpenDRIVE-Daten von drei Gebieten – Grafing bei München, Hamburg und Ingolstadt – getestet, um die Übertragbarkeit auf andere Örtlichkeiten nachzuweisen. Im Folgenden wird jedoch lediglich der „Grafing bei München“-Datensatz verwendet. Dieser wurde zunächst mittels des „Data Inspector“ der Feature Manipulation Engine (FME) auf seinen Umfang und Besonderheiten hin untersucht (Safe Software Inc. 2025).

CityGML Version 3.0 besitzt ein überarbeitetes Transportation Module. Unter anderem wurden dem Standard neue TrafficSpace-Objekte (Verkehrsräume) hinzugefügt, welche die bisherigen TrafficAreas erweitern. Diese Verkehrsräume (TrafficSpaces) folgen dem in CityGML 3.0 neu eingeführten Raumkonzept. TrafficSpaces stellen den Verkehrsraum dar, in dem sich der Verkehr bewegt. Die TrafficAreas bilden die Grundflächen der TrafficSpaces. Zusätzlich gibt es ClearanceSpaces über den TrafficSpaces, welche Freiräume oberhalb beschreiben, in denen sich ein mobiles Objekt bewegen kann, ohne auf Hindernisse zu stoßen. Zudem kann eine Straße in drei Granularitätsstufen dargestellt werden: von der Repräsentation der Straßenachse bis zur spurgenaue Darstellung. Eine Unterscheidung der einzelnen Spuren nach Transportart (z. B. Fahrzeug, Fahrrad, Fußgänger) ist ebenfalls gegeben. TrafficSpaces werden mit Vorgänger- (predecessor) und Nachfolgerlinks (successor) verbunden, um Netzwerke zu erzeugen (Beil et al. 2020, Kolbe et al. 2023).

Abbildung 1 zeigt das verfügbare Straßennetzwerk von Grafing bei München in CityGML 3.0. Dieser Datensatz wurde von OpenDRIVE nach CityGML

konvertiert und mit einem handmodellierten Parkhaus erweitert. Der finale CityGML-Datensatz hat eine Größe von 496 MB und enthält 9 118 TrafficSpaces. Abbildung 2 zeigt das in CityGML 3.0 modellierte Parkhaus sowie einen Ausschnitt des Straßennetzwerks in 3D.

Diese aufbereiteten CityGML-Testdaten wurden anschließend in eine Graphrepräsentation überführt. Die Überführung von CityGML in eine Graphdarstellung wurde bereits von Nguyen et al. (2018) im Rahmen räumlich-semantischer Vergleiche großer



Abbildung 1: Straßennetzwerk von Grafing bei München in CityGML 3.0, FME Data Inspector

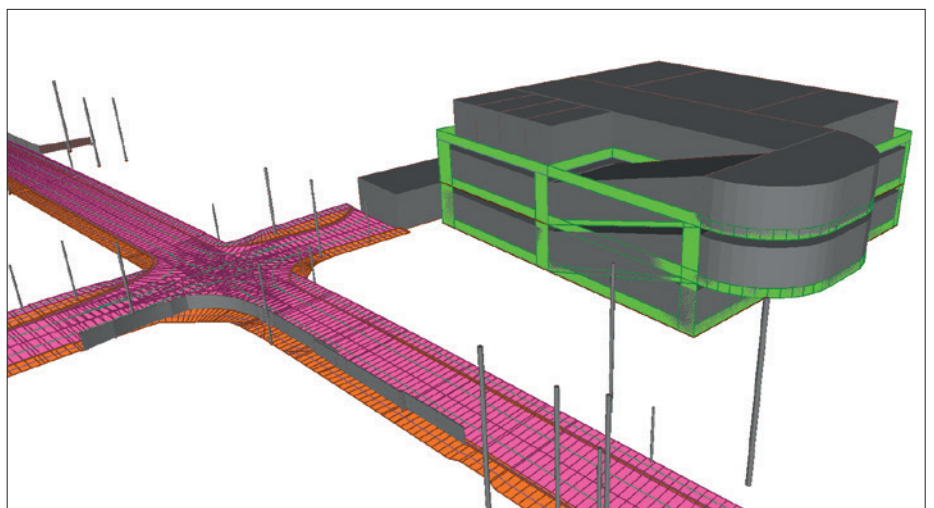


Abbildung 2: 3D-Darstellung des CityGML-3.0-Parkhauses im Straßennetzwerkdatensatz, FME Data Inspector

3D-Stadtmodelle angewandt. Hierfür wurde die Datenbanksoftware Neo4j verwendet. Neo4j ist eine Graphdatenbank, welche im Vergleich zu relationalen Datenbanken Daten nativ in einer Graphrepräsentation speichert. (Neo4j Inc. 2025a). Der Abbildungsschritt der CityGML-Daten auf die Graphdatenbank wurde mittels der Software citymodel-compare vollzogen (Nguyen et al. 2023). Neben der hierarchischen Gliederung können in CityGML zusätzliche Objektbeziehungen eingeführt werden. Da CityGML bereits eine Graphenstruktur besitzt, wird durch die Übertragung auf die Graphdatenbank das CityGML-Datenmodell nicht verändert. Somit können alle Elemente und Beziehungen auch in der Graphdatenbank dargestellt und analysiert werden. Die Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen der Verkehrsräume (TrafficSpaces) des Transportmoduls spielen in der nachfolgenden Erzeugung des Transportnetzwerks und der „kürzeste Pfade“-Suche zunächst die wichtigste Rolle, da diese direkt im CityGML-Datensatz vorhanden waren.

Nachdem die CityGML-Daten nun als Graphabbild verfügbar sind, können weitere Maßnahmen durchgeführt werden, um eine effiziente Auswertung von optimalen Strecken zwischen zwei CityGML-Verkehrsräumen in der Graphdatenbank zu ermöglichen. Dazu gehört unter anderem die Abbildungsstruktur, welche mehrere Beziehungen zwischen den einzelnen Vorgänger- und Nachfolgerknoten der TrafficSpaces verwendet. Hierzu wird eine einzige, neue Verbindung hinzugefügt, welche jeweils zwei TrafficSpaces direkt miteinander verbindet. Dadurch können die später angebrachten Gewichte zur Berechnung der optimalen Route eindeutig den jeweiligen Verbindungen zwischen zwei TrafficSpaces zugeordnet werden. Abbildung 3 veranschaulicht diesen Umstand.

Neben den Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen besteht die Notwendigkeit, benachbarte Fahrspuren mittels Spurwechsel zu verbinden, um eine realistische Nutzung des Verkehrsraums zu modellieren. Zwei benachbarte Spuren werden einander mittels der vorhandenen generischen Informationen des OpenDRIVE-Standards unter Verwendung der Spur-, Segment- und Abschnitt-IDs zugeordnet. Um diesen Prozess effizienter zu gestalten, werden die Spuren nur sektionsweise geladen und benachbarte Spuren miteinander verbunden. Dadurch entfallen unnötige Vergleiche zwischen Straßenabschnitten anderer Sektionen.

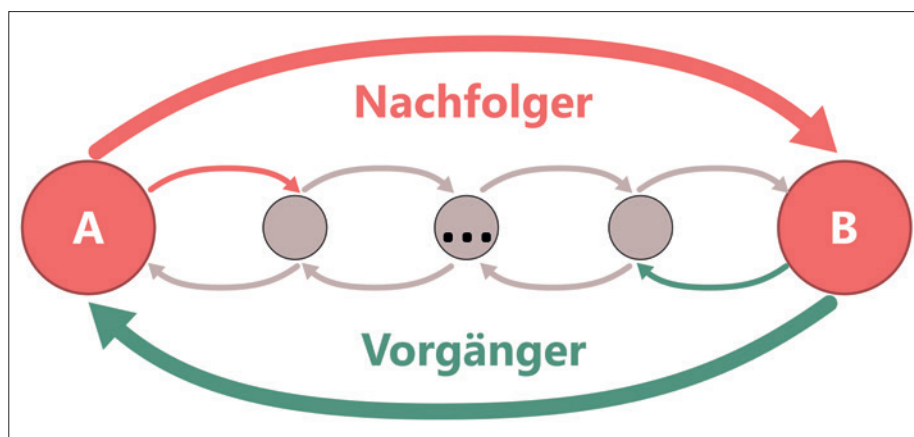


Abbildung 3: Einführen jeweils einer einzigen Vorgänger- und Nachfolgerverbindung zwischen TrafficSpace A und TrafficSpace B in der Graphdatenbank

Abschließend sollen die verschiedenen Transportarten miteinander gekoppelt werden, um Routen unter Verwendung mehrerer Fortbewegungsarten zu realisieren. In der Arbeit wurde die Interaktion von Fußgänger- und Automobilnavigation untersucht. Eine Übertragbarkeit auf eine Fahrradnutzung wurde separat im „Hamburg“-Datensatz nachgewiesen. Aufgrund der geringen Anzahl dedizierter Fahrradwege wurde die Fahrradnavigation jedoch nicht näher betrachtet. Für die Kombination von Fußgänger- und Automobilnetzwerken wurden Parkplätze als typische Orte zum Wechseln der Fortbewegungsart gewählt. Gefundene Parkplätze im Datensatz wurden mittels einer weiteren Beziehung zum Wechsel auf einen Parkplatz und von einem Parkplatz mit benachbarten Fußwegen und Verkehrsflächen verbunden. Dadurch konnten die Fußgänger- und Automobilnetzwerke miteinander verbunden werden.

Nach Fertigstellung des gemeinsamen Netzwerks besteht die Aufgabe, geeignete Gewichte für die Beziehungen zwischen den TrafficSpace-Knoten festzulegen. Diese werden im Anschluss von Kürzesten-Routen-Algorithmen genutzt, um optimale Pfade zwischen zwei TrafficSpace-Objekten zu berechnen. Hierfür wurden zum einen Gewichte nach Distanz, Zeit, Geschwindigkeit und Breite verwendet, zum anderen Strafwerte eingeführt, die einen regelmäßigen Wechsel zwischen Parkflächen verhindern. Dadurch wird unterbunden, dass Autos – oder Fußgänger – auf einen Parkplatz wechseln, um dort eine „kürzere“ Strecke zurückzulegen, ohne die Fortbewegungsart zu wechseln.

Die benötigten Informationen zur Berechnung der Gewichte wurden aus den in CityGML vorhandenen Geometrien und semantischen Attributen bezogen. Die Länge und Breite von Segmenten wurde mittels der Geometrie berechnet, Geschwindigkeiten aufgrund der Zugehörigkeit zu Straße oder Fußweg festgelegt und damit Fahrzeiten abgeleitet. Für die Ermittlung der Geschwindigkeiten wurden bei Fahrspuren zudem verfügbare Verkehrsschilder herangezogen, um Geschwindigkeitsbegrenzungen zu berücksichtigen. Für die Fußgänger wurde ein einheitlicher Wert von 5 km/h und für Fahrräder eine Geschwindigkeit von 15 km/h festgelegt. Prinzipiell können diese Werte beliebig bestimmt und die Gewichte somit angepasst werden. Die Berechnung und Festlegung der Gewichte ist ein Aspekt, bei dem die vielen geometrischen und semantischen Informationen des CityGML-Standards von Vorteil sind.

Neben den hier dargestellten Gewichten könnten weitere Verfeinerungen, zum Beispiel durch die Berücksichtigung von Steigung oder Ampelanlagen bei der Berechnung der Gewichte, realitätsnähere Ergebnisse liefern.

APOC (Awesome Procedures On Cypher) ist eine Erweiterung der Graphdatenbank Neo4j, welche weitere Prozeduren und Funktionen zur Analyse von Graphen erlauben. Nach dem Hinzufügen der Gewichte wurde der in der Neo4j-APOC-Erweiterung implementierte Dijkstra-Algorithmus verwendet, um die kürzesten Pfade zu ermitteln (Neo4j Inc. 2025b). Der Dijkstra-Algorithmus erlaubt das Ermitteln einer optimalen Route durch einen Graphen von

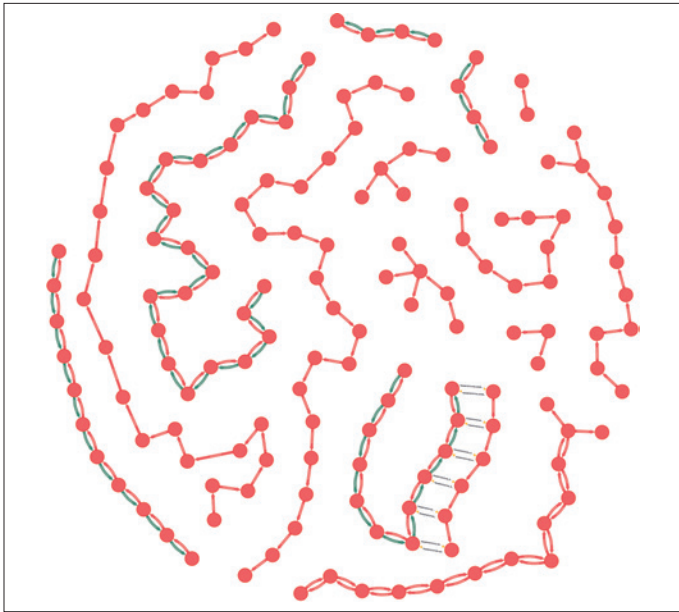


Abbildung 4: Auszug aus der Graphdatenbank: Darstellung im Neo4j-Browser nicht georeferenziert, TrafficSpaces (rote Knoten), Vorgänger (grün) und Nachfolgerbeziehungen (rot)

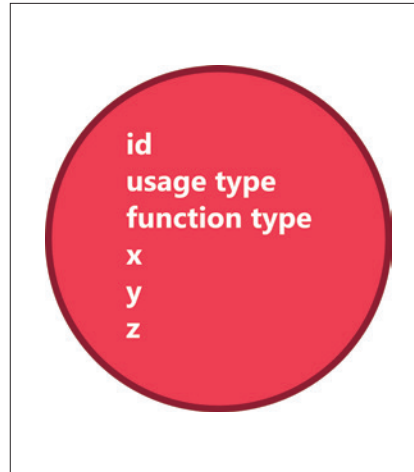


Abbildung 7: Attribute pro TrafficSpace: ID, Nutzungstyp, Funktionstyp, Koordinatenwerte (x, y, z)

einem Startknoten zu allen anderen Knoten im Graphen. Somit eignet sich der Dijkstra-Algorithmus dazu, den Pfad mit der kürzesten Strecke zwischen zwei Knoten zu ermitteln, vorausgesetzt, dass das gewählte Gewicht die Distanz zwischen Knoten darstellt (Dijkstra 1959).

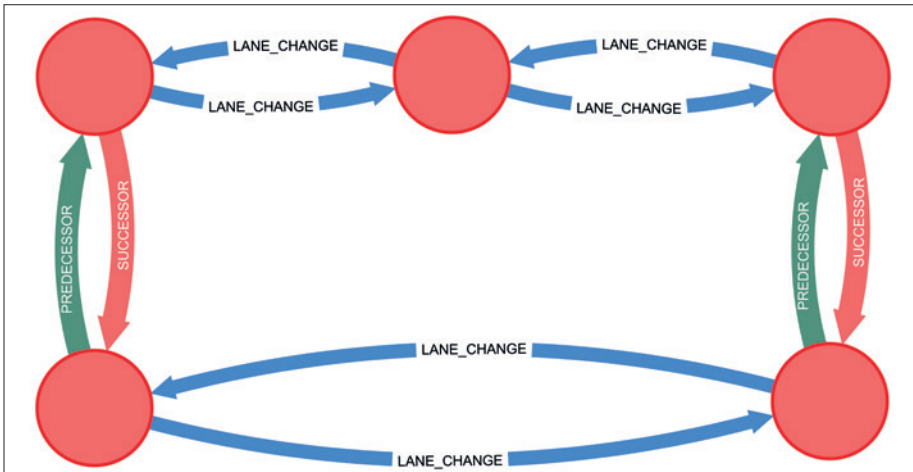


Abbildung 5: Benachbarte TrafficSpaces (rote Knoten) verbunden mittels LANE_CHANGE-Beziehung (blaue Pfeile)

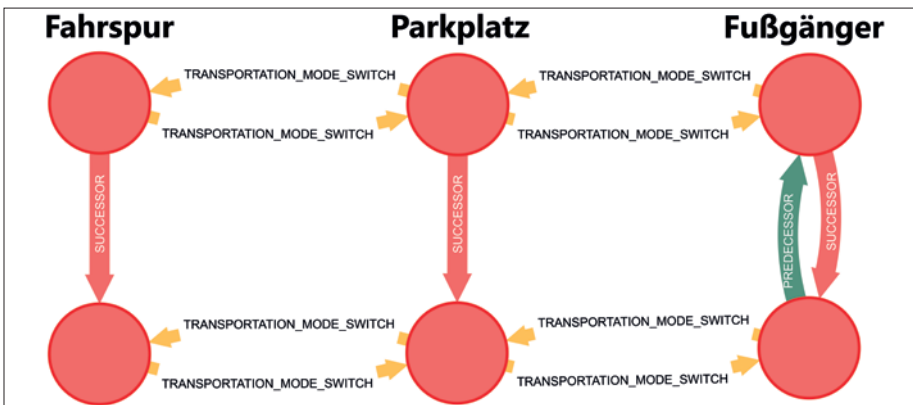


Abbildung 6: Darstellung der Verkehrsraumverknüpfungen in der Graphdarstellung von Neo4j. Dies erlaubt einen Transportartwechsel, z. B. von einem Automobil auf der Fahrspur über den Parkplatz in der Mitte zum Fußgänger (TrafficSpace-Knoten: rote Kreise; Fortbewegungsartwechsel: gelb, Nachfolgerbeziehungen: rot, Vorgängerbeziehung: grün).

3 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der vorgestellten Methode zeigen, wie multimodale Routenanalysen in CityGML unter Verwendung von Graphdatenbanken umgesetzt werden können. Insbesondere die Nutzung des Parkhauses eröffnet neue Möglichkeiten zur Analyse von Routen im Innen- und Außenraum sowie unter Berücksichtigung verschiedener Fortbewegungsarten.

Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt der erzeugten Graphstruktur in der Graphdatenbank Neo4j. Der Auszug zeigt eine Auswahl von 150 TrafficSpaces im Neo4j-Browser. Diese Darstellung ist nicht georeferenziert und führt aufgrund der geringen Anzahl an Knoten zu einer fragmentierten Darstellung der Netzwerke. Die roten Knoten stellen TrafficSpaces dar. Mittels der Nachfolgerbeziehung (SUCCESSOR) – dargestellt durch die roten Pfeile – und der Vorgängerbeziehungen (PREDECESSOR) – dargestellt durch die grünen Pfeile – werden die Verkehrsräume miteinander verbunden. Die Gesamtheit dieser verknüpften TrafficSpaces spannt ein erstes Transportnetzwerk auf. Dieses Netzwerk wird um weitere Verbindungen erweitert, indem benachbarte Spuren mittels Spurwechselverbindungen (LANE_CHANGE) – dargestellt durch die blauen Pfeile – verknüpft werden, siehe Abbildung 5. Abschließend werden Fußgänger- und Fahrzeugnetzwerke miteinander gekoppelt, indem Parkplätze als Verbindungselement zwischen diesen eingesetzt



Abbildung 8: Routenergebnisse (rot) und genutzte Parkhaus-TrafficSpaces (türkis) aus der kürzesten-Pfade-Suche in Neo4j, dargestellt in Cesium (mit Cesium OpenStreetMap Buildings)

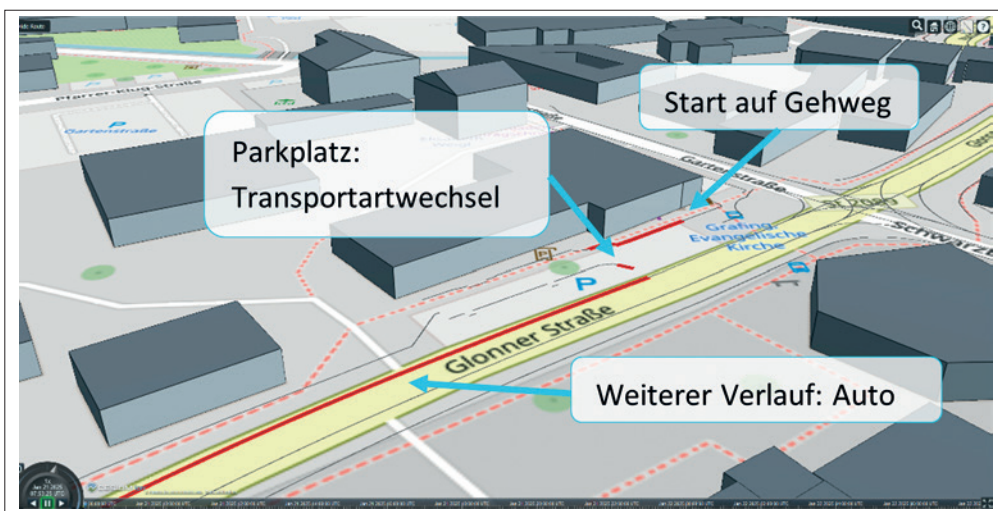


Abbildung 9: Routenergebnis (rot) in Cesium, Start auf Gehweg, Wechsel über Parkplatz (kurzes rotes Segment) zur Fahrspur; Abfolge von oben nach unten, visualisiert in Cesium (mit Cesium OpenStreetMap Buildings)

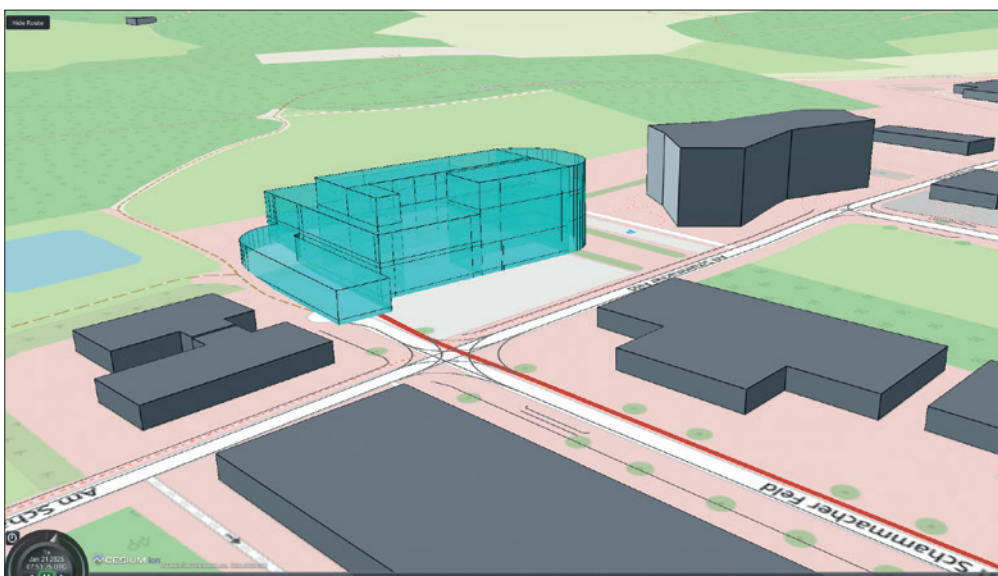


Abbildung 10: Routenergebnis (rot) und genutzte Parkhaus-TrafficSpaces (türkis) zum Ziel (Parkplatz im Parkhaus), visualisiert in Cesium (mit Cesium OpenStreetMap Buildings)

werden. Diese „Switch“-Knoten sind an die „Switch“-Punkte von Liu angelehnt (Liu 2011). Die gelben Pfeile stellen den Transportartwechsel (TRANSPORTATION_MODE_SWITCH) dar. In Abbildung 6 wird somit ein Wechsel vom Fahrzeugnetzwerk links über Parkplatzverkehrsräume in der Mitte zum Fußweg auf der rechten Seite ermöglicht. Zur Unterscheidung der verschiedenen Nutzungsarten und -typen werden jedem TrafficSpace-Knoten zusätzlich Attribute hinzugefügt. Diese können exemplarisch in Abbildung 7 gesehen werden.

Der in der Graphdatenbank aufbereitete Datensatz hat abschließend eine Größe von 2,74 GB und beinhaltet 2959033 Knoten sowie 2967659 Beziehungen, davon sind 9118 TrafficSpace-Knoten. Im Vergleich zum CityGML-Datensatz im GML-Format hat sich die Speichergröße etwa verflünffacht. Dies ist zum Teil auf Systemdateien von Neo4j, aber auch auf die Indexstruktur zur effizienten Abfrage zurückzuführen.

Zur Visualisierung der Ergebnisse wird der virtuelle 3D-Globus Cesium verwendet. Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen Routenergebnisse des Ansatzes für den Testdatensatz von Grafing bei München. Die bestimmte Route im Netzwerk (rot) wird zusammen mit dem Netzwerk (grau) und der Parkgarage (türkis) sowie weiteren 3D-Gebäudemodellen (Cesium OpenStreetMap Buildings) in Cesium visualisiert (Cesium GS, Inc. 2025). Die Laufzeit zur Ermittlung der hier dargestellten Route beträgt zwischen 6 ms und 50 ms. Bei den Laufzeiten zur Routenberechnung werden im Testdatensatz in der Regel Werte zwischen 10 ms und 20 ms erreicht.

4 DISKUSSION

Die Ergebnisse konnten die gemeinsame Analyse verschiedener Fortbewegungsarten im Innen- und Außenraum zeigen, um eine optimale Route zwischen verschiedenen

Verkehrsräumen zu bestimmen. OpenDRIVE fokussiert sich hauptsächlich auf die Elemente zur Automobilnavigation. Fuß- und Fahrradwege entlang der Straße können in OpenDRIVE modelliert werden. Eine kombinierte Nutzung von Verkehrsräumen in einem Gebäude ist jedoch nicht möglich.

Der CityGML-Standard bietet hier den Vorteil einer gemeinsamen Modellierung von Gebäuden und Verkehrsinfrastruktur, die ebenfalls für verschiedene Transportarten vorliegt. Dies bringt den Vorteil, dass Routennetze verschiedener Fortbewegungsarten in einem Datenmodell repräsentiert und anschließend ausgewertet werden können. Besonders die Fortführung von Transportinfrastrukturelementen in Gebäuden ermöglicht die Modellierung und Auswertung komplexer Netzwerkstrukturen.

Dabei wurden alle Elemente zunächst im CityGML-Datenmodell modelliert und anschließend für die Routenberechnung in die Graphdatenbank überführt und optimiert. Die Ergebnisse der Aufbereitung, insbesondere die erzeugten Gewichte der Vorgänger-, Nachfolger-, Spurwechsel- und Transportwechsel-Beziehungen werden derzeit nur in der Graphdatenbank gespeichert. Die Gewichte sowie die zusätzlich erzeugten Beziehungen werden aktuell nicht im ursprünglichen CityGML-Datensatz übernommen. Dadurch muss entweder die Erzeugung dieser Elemente beim Austausch der CityGML-Daten erneut durchgeführt oder die erzeugte Datenbank selbst geteilt werden. Eine Umsetzung zur Integration der Gewichte und Beziehungen in CityGML wäre zum Beispiel via generische Attribute und city-object relations möglich.

Aktuelle Herausforderungen bei der Skalierung dieses Ansatzes sind die sehr geringe Verfügbarkeit nutzbarer Daten von Verkehrsinfrastrukturen im Außenraum sowie detaillierter Innenraummodelle mit vorhandener Vorgänger- und Nachfolgerverknüpfung. Dies ist allerdings auch durch die Neuheit der aktuellen Version 3.0 von CityGML begründet. Ein weiterer relevanter Aspekt für die Skalierbarkeit der vorgestellten Methode ist die Datengröße. Aufgrund der deutlichen Steigerung der Graphrepräsentation im Vergleich zum ursprünglichen CityGML-Datensatz bleibt abzusehen, wie deutlich größere Datenmengen die entwickelte Methode beeinflussen.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Das vorgestellte Verfahren konnte nachweisen, dass das aktualisierte Transportation Module von CityGML 3.0 geeignet ist, um darauf aufbauend multimodale Transportnetzwerke zu modellie-

ren, welche sowohl Innen- als auch Außenräume umfassen. Eine Abbildung des CityGML-Datenmodells auf die Graphdatenbank Neo4j erlaubte nach weiteren Vorverarbeitungsschritten kürzeste-Pfade-Analysen zur Bestimmung optimaler Routen im Transportnetzwerk. Dabei wurden sowohl die kombinierte Nutzung mehrerer Transportarten als auch Strecken über Straßen und in Gebäuden getestet. Insbesondere wurde gezeigt, wie eine kombinierte Route zur Navigation von einem Fußweg über eine Parkplatzfläche zu einem Parkplatz in einem Parkhausgebäude geführt wurde.

Das erzeugte multimodale Netzwerk liegt derzeit nur in der Graphdatenbank vor. Die Gewichtungsfaktoren und zusätzlichen Verbindungen werden allerdings nicht zur Anreicherung des ursprünglichen CityGML-Datensatzes genutzt. Für weitere Untersuchungen könnte es jedoch von Vorteil sein, diese Informationen in die ursprünglichen CityGML-Daten zu integrieren.

Des Weiteren stellen die hier vorgestellten Transportarten nur einen Ausschnitt der verfügbaren Fortbewegungsarten dar. Weitere Transportarten (inklusive Wasserwege und Gleise) sind in CityGML modellierbar und können ebenfalls in diesem multimodalen Konzept aufgenommen werden. Eine Integration von zeitabhängigen Routen, welche typischerweise bei öffentlichem Nah- und Fernverkehr gegeben sind, bleibt ebenfalls zu untersuchen.

Aufgrund der geringen Verfügbarkeit von CityGML-Daten, die derzeit verwendet werden können, besteht ein weiterer wichtiger Schritt darin, automatisierte Prozesse zu entwickeln, um zur Navigation geeignete Modelle aus bestehenden Daten abzuleiten. Aufgrund der bereits erheblichen Speicheranforderungen für das vergleichsweise kleine Verkehrsnetzwerk ist es zwingend notwendig, die Skalierbarkeit des Ansatzes in zukünftigen Arbeiten zu untersuchen.

Weitere Einsatzbereiche des entwickelten Verfahrens könnten sich zudem auf spezielle Nutzeranforderungen, wie zum Beispiel Rollstuhlnavigation unter Berücksichtigung von Bordsteinkantenhöhen konzentrieren. An Nutzervorlieben angepasste Routen, zum Beispiel mit möglichst geringer Steigung und minimalen Höhenunterschieden auf der Route oder möglichst viel Schatten entlang der Strecke, könnten ebenfalls untersucht werden.

Hinweis

Das Projekt wurde ohne externe Förderung am Lehrstuhl für Geoinformatik der Technischen Universität München durchgeführt.

Literatur

Asam e. V. (2024): ASAM OpenDRIVE. <https://www.asam.net/standards/detail/opendrive> (01/2025).

Beil, C.; Kutzner, T.; Schwab, B.; Kolbe, T. H. (2022): Road2CityGML3. <https://tum-gis.github.io/road2citygml3> (01/2025).

Beil, C.; Ruhdorfer, R.; Coduro, T.; Kolbe, T. H. (2020): Detailed Streetspace Modelling for Multiple Applications: Discussions on the Proposed CityGML 3.0 Transportation Model. In: ISPRS International Journal of Geo-Information 9 (10), 603. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100603>.

Cesium GS, Inc. (2025): Cesium: The Platform for 3D Geospatial. <https://cesium.com> (01/2025).

Dijkstra, E. W. (1959): A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. In: Numerische Mathematik (1959), S. 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>.

Kolbe, T. H.; Kutzner, T.; Smyth, C. S.; Roensdorf, C. (2023): CityGML | OGC. <https://www.ogc.org/standards/citygml> (01/2025).

Liu, L. (2011): Data Model and Algorithms for Multimodal Route Planning with Transportation Networks. https://www.researchgate.net/publication/49940710_Data_model_and_algorithms_for_multimodal_route_planning_with_transportation_networks (01/2025).

Neo4j, Inc. (2025a): Neo4j Graph Database & Analytics – The Leader in Graph Databases, Graph Database & Analytics. <https://neo4j.com> (01/2025).

Neo4j, Inc. (2025b): Awesome Procedures On Cypher (APOC) – Neo4j Labs. <https://neo4j.com/labs/apoc> (01/2025).

Nguyen, S. H.; Kolbe, T. H. (2023): Identification and Interpretation of Change Patterns in Semantic 3D City Models. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography – Recent Advances in 3D Geoinformation Science (Proceedings of the 18th 3D GeoInfo Conference). Springer, Berlin/Heidelberg. <https://github.com/tum-gis/citymodel-compare> (01/2025).

Nguyen, S. H.; Yao, Z.; Kolbe, T. H. (2018): Spatio-semantic comparison of large 3D City models in CityGML Using a graph database. In: gis.Science 3/2018, S. 85–100.

Olbrich, F. (2023): Multimodal Navigation Applications for CityGML 3.0 using a Graph Database. <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1730736> (01/2025).

Ruhdorfer, R.; Sindram, M.; Willenborg B. (2018): Coupling of traffic simulations and semantic 3D City models. In: gis.Science 3/2018, S. 101–109.

Safe Software Inc. (2025): Products. Safe Software. <https://www.safe.com/products> (01/2025).

Schuldt, K.; Hellweg, N.; Dieck, M.; Rittenbach, J.; Sternberg, H. (2022): Eine BIM-basierte Geodatenbank zur Nutzung in der Indoor-Navigation. In: gis.Science 3/2022, S. 109–116.

Schwab, B.; Beil, C.; Kolbe, T. H. (2023): r:trän (v1.3.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7702313> (01/2025).



Technikwissen punktgenau:

Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich

- ▶ Buch ist für Studierende und Anwender außerhalb der Geodäsie eine verständliche Einführung sowie praxisnaher Leitfaden
- ▶ Vermittelt sowohl Grundlagen als auch aktuelle Entwicklungen und Trends
- ▶ Anschauliche Darstellung mit vielen Abbildungen und zahlreichen Beispielen
- ▶ Ermöglicht so eine eigenständige Umsetzung des Stoffs im Sinne eines echten Lehrbuchs

Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten. Sowohl das E-Book als auch das Kombiangebot (Buch + E-Book) sind ausschließlich auf www.vde-verlag.de erhältlich.



5., neu bearb. und erw. Auflage 2024
388 Seiten

36,- € (Buch/E-Book)
50,40 € (Kombi)

Bestellen Sie jetzt: (030) 34 80 01-222 oder www.vde-verlag.de/buecher/537746

