

Klose, Markus et al.

Article — Published Version

Eine skalierbare Plattform zur intermodalen Erreichbarkeitsanalyse im öffentlichen Verkehr unter Einbeziehung von Shared Mobility

HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik

Provided in Cooperation with:

Springer Nature

Suggested Citation: Klose, Markus et al. (2025) : Eine skalierbare Plattform zur intermodalen Erreichbarkeitsanalyse im öffentlichen Verkehr unter Einbeziehung von Shared Mobility, HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, ISSN 2198-2775, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Vol. 62, Iss. 4, pp. 799-816, <https://doi.org/10.1365/s40702-025-01189-1>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/330618>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>



Eine skalierbare Plattform zur intermodalen Erreichbarkeitsanalyse im öffentlichen Verkehr unter Einbeziehung von Shared Mobility

Markus Klose · Moritz Harnisch · Erik Schubert · Felix Heizler · Roman Tilly · Thomas Buder · Fabian Schwarzenberger · Maik Thiele

Eingegangen: 17. Januar 2025 / Angenommen: 16. Mai 2025 / Online publiziert: 1. Juli 2025
© The Author(s) 2025

Zusammenfassung Die Integration fahrplan- und nachfragebasierter Mobilitätsangebote stellt eine zentrale Herausforderung für die Analyse und Planung intermodaler Verkehrssysteme dar. Dieser Beitrag präsentiert eine skalierbare Plattform, die Daten aus dem öffentlichen Verkehr, wie Bus und Bahn, mit modernen Shared-Mobility-Diensten, wie Leihfahrrädern, Carsharing und E-Scootern, verbindet. Ziel ist die Entwicklung einer holistischen Datenarchitektur, die eine umfassende Analyse der Erreichbarkeit ermöglicht. Erreichbarkeit beschreibt in diesem Kontext, wie gut Personen von einem bestimmten Ort aus innerhalb einer festgelegten Zeitspanne andere Orte erreichen können. Der Ansatz umfasst die Transformation von Fahrplandaten in ein Property-Graph-Modell sowie die flexible Integration nachfragebasierter Datenformate in ein dokumentbasiertes Modell. Eine auf Isochronen basierende Metrik wird entwickelt, um regionale und überregionale Erreichbarkeiten zu bewerten. Anhand von Anwendungsfällen, darunter Infrastrukturänderungen und What-if-Analysen, wird gezeigt, wie datengetriebene Entscheidungen zur Verbesserung der Mobilität getroffen werden können.

Schlüsselwörter Intermodale Mobilität · Erreichbarkeitsmetriken · Offene Daten · Property-Graph-Modell · Datenintegration · What-if-Analysen

Markus Klose · Moritz Harnisch · Erik Schubert · Thomas Buder · Fabian Schwarzenberger ·
✉ Maik Thiele
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden, Deutschland
E-Mail: maik.thiele@htw-dresden.de

Felix Heizler · Roman Tilly
Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt, Dresden,
Deutschland

Abstract The integration of timetable-based and demand-based mobility services is a key challenge for the analysis and planning of intermodal transportation systems. This paper presents a scalable platform that combines data from public transportation, such as buses and trains, with modern shared mobility services, such as rental bikes, car sharing, and e-scooters. The aim is to develop a holistic data architecture that enables a comprehensive analysis of reachability. In this context, reachability describes how well people can reach other places from a specific location within a specified period of time. The approach includes the transformation of timetable data into a property graph model and the flexible integration of demand-based data formats into a document-based model. An isochrone-based metric will be developed to assess regional and interregional reachability. Use cases, including infrastructure changes and what-if analyses, demonstrate how data-driven decisions can be made in order to improve mobility.

Keywords Intermodal mobility · Accessibility metrics · Open data · Property graph model · Data integration · What-if analyses

1 Einleitung

In einer zunehmend vernetzten und mobilen Gesellschaft spielt die Erreichbarkeit im Sinne des Personenverkehrs eine zentrale Rolle bei der Bewertung der Standortqualität und der verkehrlichen Planung nachhaltiger Mobilitätslösungen. Offene Mobilitätsangebote, wie der öffentliche Personenverkehr (ÖPV) und moderne Sharing-Angebote, gelten als nachhaltig – sowohl in ökologischer als auch in sozialer und ökonomischer Hinsicht. Deshalb ist es von öffentlichem Interesse, ein attraktives und umfassendes Mobilitätsangebot für die deutschlandweite Nutzung bereitzustellen, das verschiedenen Nutzergruppen eine effiziente und nachhaltige Fortbewegung ermöglicht. Da sich Verkehrswissenschaftlerinnen zunehmend mit einem Anstieg von verfügbaren planungsrelevanten Datenmengen konfrontiert sehen, gewinnt der Aspekt des effizienten Managements dieser Daten als Voraussetzung für eine möglichst effektive und erfolgreiche Schaffung von Mobilitätsangeboten an Bedeutung.

Insbesondere die Verfügbarkeit und freie Bereitstellung von Mobilitätsdaten, die sowohl fahrplangebundenen als auch nachfragebasierten Angeboten entstammen, bietet eine Chance, die Verbindungen zwischen beliebigen Orten in Deutschland zu verschiedenen Tageszeiten zu analysieren. Solche Analysen sind essenziell, um eine datenbasierte Grundlage für die Verbesserung des Mobilitätsangebots zu schaffen. Dies umfasst zum einen die Planung von Fahrplänen und den Ausbau von Verkehrsinfrastrukturen und zum anderen die Bereitstellung und Integration nachfragebasierter Verkehrsmittel, um den Nutzern flexible und nahtlose Mobilitätsoptionen zu bieten. Der Umfang dieser frei verfügbaren Mobilitätsdaten stellt Anwender jedoch vor große Herausforderungen mit Hinblick auf das zugehörige Datenmanagement. Zudem muss geklärt werden, in welcher Form diese Daten potenziellen Verkehrsplanerinnen zur Verfügung gestellt werden können, um die Weiterentwicklung von Mobilitätsangeboten tatsächlich effektiv zu unterstützen.

Der hier vorgestellte Ansatz verfolgt das Ziel, eine flexible und skalierbare Plattform zu entwickeln, die als Datenbasis für Erreichbarkeitsanfragen zum intermodalen Verkehr in Deutschland dienen soll. Dabei werden neben Fahrplandaten von traditionellen öffentlichen Verkehrsmitteln, wie Straßenbahn, Bus und Zug, auch Verfügbarkeiten moderner Sharing-Dienste, wie Leihfahrräder, Carsharing oder E-Scooter, in die Plattform integriert und dort analysiert. Diese umfassende Betrachtung ermöglicht es, ein ganzheitliches Bild der intermodalen Mobilität zu gewinnen, das den tatsächlichen Mobilitätsbedürfnissen der Nutzer entspricht. Im Rahmen dieser Analysen stellen sich grundlegende Fragen nach einem geeigneten Maß für die Erreichbarkeit, das beispielsweise als Erreichbarkeitsindex pro Ort oder pro Verbindung zweier Orte definiert werden kann. Diese Metriken können dann als Entscheidungsgrundlage für die Verkehrsplanung herangezogen werden, beispielsweise zur Anpassung von Fahrplänen oder zur Identifikation von Regionen mit unzureichender Anbindung. Gleichzeitig muss jedoch untersucht werden, ob der Umfang und die Qualität der offenen Daten ausreichen, um diese komplexen Fragestellungen zufriedenstellend zu beantworten.

Bezüglich der oben genannten Anforderungen leistet diese Publikation drei wesentliche Beiträge:

- Es wird ein skalierbares Konzept entwickelt, das die Integration und Verknüpfung von Daten aus fahrplangebundenen und nachfragebasierten Mobilitätsangeboten ermöglicht. Dies umfasst sowohl traditionelle öffentliche Verkehrsmittel, wie Straßenbahn, Bus und Zug, als auch moderne Sharing-Dienste wie Leihfahrräder, Carsharing und E-Scooter.
- Es wird eine intermodale Erreichbarkeitsmetrik vorgestellt, die verschiedenste Mobilitätsangebote berücksichtigt, und die sowohl für lokale als auch überregionale Analysen geeignet ist. Ebenso wird die Vielfalt bereits existierender Metriken in der Literatur reflektiert.
- Es werden verschiedene Anwendungsfälle vorgestellt, in denen beispielhafte Erreichbarkeitsanalysen auf der entwickelten Datenarchitektur umgesetzt werden, um datenbasierte Entscheidungen in der Verkehrsplanung zu realisieren.

Aufbau der Arbeit Kapitel 2 beschreibt die Datenarchitektur zur Integration intermodaler Mobilitätsdaten. Dazu gehört die Transformation von Fahrplandaten in ein Property-Graph-Modell sowie die flexible Integration nachfragebasierter Mobilitätsdaten. Nach einem Überblick über verwandte Arbeiten und verschiedene Definitionen von Erreichbarkeit widmet sich Kapitel 3 der Entwicklung und Anwendung einer auf Isochronen basierenden Erreichbarkeitsmetrik, die für lokale und überregionale Analysen geeignet ist. In Kapitel 4 werden exemplarische Anwendungsfälle präsentiert, welche die praktische Nutzung der Plattform für datengetriebene Verkehrsplanungen und What-if-Analysen illustrieren. Abschließend wird in Kapitel 5 die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen gegeben.

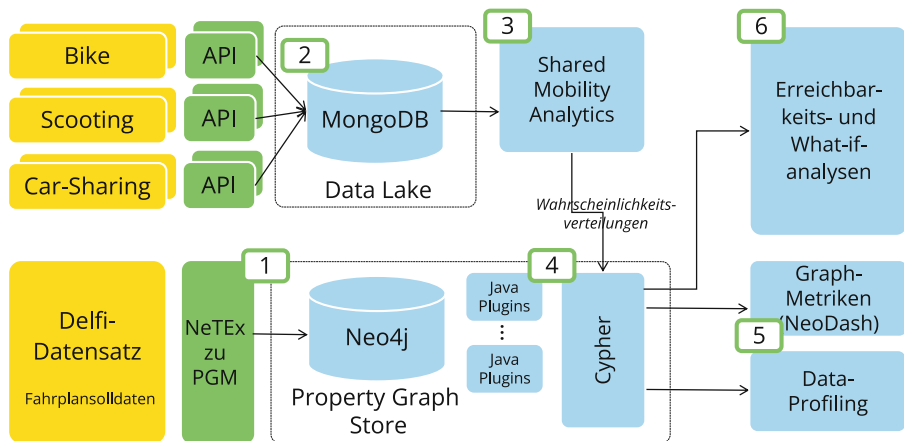


Abb. 1 Schematische Darstellung der Datenarchitektur zur Integration und Analyse intermodaler Mobilitätsdaten

2 Datenarchitektur zur Integration intermodaler Mobilitätsdaten

Die in diesem Beitrag angestrebte holistische Betrachtung fahrplan- und nachfrage-basierter Mobilitätsdienstleistungen erfordert eine gemeinsame, integrierte Datenplattform, welche schematisch in Abb. 1 dargestellt ist und im Folgenden erläutert wird.

2.1 Überführung des DELFI-Datensatzes in das Property-Graph-Modell von Neo4j

Eine zentrale Datenbasis für Fahrplansolldaten entsteht durch die Arbeit des DELFI e.V.¹, der die Fahrplansolldaten aller bundesweiten Landesauskunftssysteme aggregiert, in einem Datenpool zusammenführt und diese wöchentlich aktualisiert bereitstellt. Die Daten enthalten umfassende Informationen zu Haltestellennamen und Geokoordinaten, Fahrplänen, Anbietern, sowie Verkehrsmitteln, darunter die Deutsche Bahn und verschiedene regionale Verkehrsverbünde. Neben den genannten Informationen umfassen die Daten unter anderem Wegzeiten innerhalb von Bahnhöfen sowie Angaben zu deren Aus- und Eingängen, z. B. „Berlin Hauptbahnhof“ und „Berlin Hauptbahnhof (tief)“. Die Daten werden im XML-basierten Network Timetable Exchange (NeTeX)-Format bereitgestellt (Beck et al. 2017).

Um diese fahrplanbasierten Informationen effizient analysieren und abfragen zu können, werden die NeTeX-Daten in *Schritt 1* in ein Property-Graph-Modell überführt, in dem Haltestellen als Knoten und Verbindungen als Kanten modelliert werden. Eigenschaften von Knoten und Kanten, wie Haltestellennamen, Koordinaten von Haltestellen bzw. Typ, Abfahrtszeit und Dauer einer Verbindung, können kom-

¹ Durchgängige Elektronische Fahrgastinformation, Eigenbeschreibung auf <http://www.delfi.de>: „DELFI ist ein Kooperationsnetzwerk aller Bundesländer und weiterer Partner und schafft die technischen Voraussetzungen zur Beauskunftung länderübergreifender Reiseketten.“

pakt als Key-Value-Paare direkt an den jeweiligen Knoten und Kanten gespeichert werden. Aufgrund des hohen Detaillierungsgrads der NeTEx-Daten ist es erforderlich, Knoten mit identischen Namen zu deduplizieren (z. B. „Berlin Hbf“). Darüber hinaus müssen Relationen mit hoher Kardinalität, die in NeTEx häufig durch Verweise dargestellt werden, für die Verwendung in der Graphdatenbank entpackt und redundant abgelegt werden. Um die Anzahl der Kanten in stark frequentierten Gebieten zu reduzieren, werden Fahrten als JSON-Strings direkt an den Kanten gespeichert. Der Import des Graphen in die Neo4j-Datenbank erfolgt über die Erstellung von CSV-Dateien, die mithilfe der LOAD CSV-Funktion von Cypher eingelesen werden. Dabei minimieren MERGE- und UNWIND-Statements die Abfragekosten und ermöglichen einen effizienten Datenimport. Der Graph besteht aus etwa 308.000 Haltestellen (bis auf wenige Ausnahmen allesamt in Deutschland) und 765.000 Kanten, d. h. Direktverbindungen zwischen zwei Haltestellen.

2.2 Integration der Shared-Mobility-Daten

Nachfragebasierte Verkehrsmittel unterscheiden sich fundamental von fahrplanbasierten Verkehrsmitteln. Während die fahrplanbasierten Verkehrsmittel in der Regel einem Fahrplan folgen, ist die Verfügbarkeit von Shared-Mobility-Angeboten nicht deterministisch, sofern diese überhaupt am betreffenden Ort bereitstehen. Für die Verfügbarkeit ist ebenso relevant, wie weit das Fahrzeug vom aktuellen Standort eines Reisenden und von eventuellen Zwischenhalten entfernt ist. Es ist auch zu beachten, ob das Shared-Mobility-Fahrzeug am Zielort oder an eventuellen Zwischenhalten abgestellt werden darf. Aufgrund der flexiblen und nicht vorhersehbaren Bewegung der nachfragebasierten Verkehrsmittel ist deren Integration in den Property Graph aus *Schritt 1* nicht sinnvoll. Dennoch müssen diese für weiterführende Analysen erfasst und an einem zentralen Ort zusammengeführt werden. Da die einzelnen Shared-Mobility-Anbieter ihre Daten in unterschiedlichen Formaten bereitstellen, wurde im Sinne einer Staging Area (Kimball und Caserta 2004) ein schemaflexibles dokumentbasiertes Datenmodell unter der Verwendung von MongoDB gewählt (*Schritt 2*). Für jeden Shared-Mobility-Anbieter wird eine eigene Collection angelegt, in der die Daten als JSON-Dokumente gespeichert werden. Jede Collection repräsentiert also die Daten eines bestimmten Shared-Mobility-Anbieters, was eine klare Trennung und dennoch flexible Handhabung der unterschiedlichen Datenformate ermöglicht.

Die in Listing 1 gezeigte JSON-Struktur dokumentiert einen Einzeldatensatz über die Verfügbarkeit von Fahrrädern des Anbieters nextbike zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Ort. Neben der automatisierten Generierung einer eindeutigen ID durch MongoDB (Feld `_id`) enthält das Dokument einen Zeitstempel (`date`), Koordinaten des Standortes im WGS84-Format (`point` bestehend aus Längengrad und Breitengrad), sowie die Anzahl verfügbarer Fahrräder (`bike_count`) an diesem Ort zum angegebenen Zeitpunkt.

Die Verwendung eines solchen schemalosen Dokumentformats erlaubt eine hohe Flexibilität bei der Erfassung weiterer Merkmale, wie z. B. Fahrzeugtyp, Ladezustand bei E-Fahrzeugen oder Tarifinformationen, sofern diese vom jeweiligen Anbieter bereitgestellt werden. Gleichzeitig lassen sich auf Basis dieser historischen

Daten Verfügbarkeitsmuster extrahieren, etwa durch Aggregationen nach Tageszeit, Wochentag oder Standortclustern.

Zur effizienten Weiterverarbeitung und Analyse werden diese Rohdaten regelmäßig in standardisierte Zwischenformate überführt, wobei insbesondere für jede Haltestelle des fahrplanbasierten ÖPV geprüft wird, wie häufig in deren Umgebung Shared-Mobility-Angebote beobachtet wurden. Dadurch können Wahrscheinlichkeitsverteilungen über die Verfügbarkeit dieser Angebote erstellt werden, die wiederum in die späteren Berechnungen der Erreichbarkeitsmetriken einfließen. So kann beispielsweise modelliert werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Reisender an einer Haltestelle innerhalb einer bestimmten Zeitspanne ein Fahrrad oder einen E-Scooter vorfindet.

Listing 1: Darstellung eines Beispieldatensatzes aus der MongoDB vom Anbieter nextbike

```

1  {
2    "_id": {
3      "$oid": "67d98754a4f193451b2dccc6"
4    },
5    "date": "2024-09-09-12:54:10",
6    "point": [
7      7.110312,
8      50.540814
9    ],
10   "bike_count": 5
11 }
```

2.3 Analyse der Shared-Mobility-Daten

In *Schritt 3* werden die verschiedenen Daten der Verfügbarkeit nachfragebasierter Verkehrsmittel zusammengefasst, analysiert, und schließlich in Verteilungen von Verfügbarkeitswahrscheinlichkeiten übersetzt. Dabei wird für die Umgebungen aller Haltestellen von fahrplanbasierten Verkehrsmitteln über Monate hinweg beobachtet, wann, wo und wieviele Shared-Mobility-Fahrzeuge der verschiedenen Anbieter verfügbar sind. Mithilfe dieser Daten werden Modelle angepasst, die in Abhängigkeit von Ort, Tageszeit und Wochentag eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Anzahl der verfügbaren Shared-Mobility-Fahrzeuge bereitstellen. Diese Analysen sollen Aufschluss darüber geben, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein bestimmtes Fahrzeug zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort verfügbar ist. Derartige Daten sind zentral für die Berechnung der Erreichbarkeitsmetriken, um abschätzen zu können, ob eine Weiterreise mit einem nachfragebasierten Verkehrsangebot nach dem Verlassen der Haltestellen möglich bzw. wahrscheinlich ist.

2.4 Abfrage der fahrplanbasierten Daten im Property-Graph

Die Abfrage der fahrplanbasierten Daten im Property-Graph-Modell (*Schritt 4*) erfolgt mittels Cypher, einer deklarativen Abfragesprache, die speziell für die Arbeit

mit Graphdatenbanken entwickelt wurde und eine einfache und ausdrucksstarke Möglichkeit bietet, Knoten und deren Beziehungen zu durchsuchen. Sie ermöglicht das Formulieren von Abfragen, die komplexe Pfade und Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Haltestellen und Fahrten innerhalb des Graphen analysieren. Zusätzlich zu Cypher wurde verschiedene Java Add-ons entwickelt, durch die die Funktionalität von Neo4j um beliebige benutzerdefinierte Operationen und Funktionen erweitert werden kann. Dies ist insbesondere nützlich, um zum einen die Daten in den Key-Value-Paaren z. B. für Verbindungsinformation anders aufzubereiten, und um zum anderem spezifische Erreichbarkeitsanfragen sowie Methoden zur Prüfung der Datenqualität umzusetzen.

2.5 Data Profiling der fahrplanbasierten Daten

Beim Data Profiling der fahrplanbasierten Daten liegt der Fokus auf der Identifikation und Analyse von Datenqualitätsproblemen, die sich auf die Erreichbarkeitsanalyse auswirken können. Die Fahrplansolldaten werden vom DELFI e.V. aus den verschiedenen Landesauskunftssystemen zu einem deutschlandweiten Datensatz integriert, wobei die Daten aus den Landesauskunftssystemen nicht auf mögliche inhaltliche Fehler überprüft werden. Da sich Fehler in den Daten auf die Ergebnisse der Erreichbarkeitsanalysen auswirken, werden Data-Profiling-Abfragen durchgeführt, um Datenqualitätsprobleme aufzudecken. Diese Abfragen werden mithilfe von Cypher sowie den zuvor erwähnten Java-Add-ons umgesetzt. Ein häufiges Problem sind beispielsweise falsche Koordinaten von Haltestellen – in einigen Fällen existieren Haltestellenkoordinaten außerhalb Deutschlands. Ein weiteres Beispiel sind falsch georeferenzierte Haltestellen, wodurch Orte miteinander verbunden werden, zwischen denen keine reale Verkehrsverbindung besteht. Diese und andere Datenqualitätsprobleme werden in *Schritt 5* im Rahmen des Data Profilings systematisch erfasst und analysiert, um die Qualität des integrierten Datensatzes zu verbessern.

2.6 Erreichbarkeits- und What-if-Analysen

Den Endnutzern wird optional ein webbasiertes Werkzeug zur Verfügung gestellt (*Schritt 6*), das mithilfe einer Kartenansicht die Erreichbarkeit beliebiger Standorte in Deutschland ermittelt. Die konkreten Erreichbarkeitsmetriken, die dafür verwendet werden, sind in Kapitel 3 beschrieben. Nutzer können Standorte über die Kartenansicht auswählen und eine Analyse zur Erreichbarkeit durchführen. Zusätzlich ermöglicht das Werkzeug What-if-Analysen, bei denen Nutzer durch das Hinzufügen oder Entfernen von Fahrplanverbindungen oder Shared-Mobility-Angeboten die Auswirkungen solcher Änderungen auf die Erreichbarkeit untersuchen können. Dies bietet eine interaktive und flexible Möglichkeit, die potenziellen Effekte von Veränderungen im Mobilitätsangebot besser zu verstehen und zu bewerten.

2.7 Skalierbarkeit und Flexibilität der Datenarchitektur

Die Skalierbarkeit der vorgeschlagenen Lösung wird durch die Kombination einer Graph- und einer Dokumentdatenbank gewährleistet. Sowohl Neo4j als auch Mon-

goDB sind bekannt für ihre Fähigkeit, große Datenmengen effizient zu verarbeiten und dynamisch zu skalieren, da sie sowohl horizontal als auch vertikal erweitert werden können. MongoDB unterstützt dabei die horizontale Skalierbarkeit durch Sharding, bei dem Daten automatisch über mehrere Knoten verteilt werden. Dies ermöglicht es, große Datenmengen effizient zu speichern und Abfragen parallel zu verarbeiten. Neo4j ermöglicht insbesondere durch Read-Scale-Out mit Causal Clustering eine horizontale Skalierbarkeit bei leseintensiven Workloads, indem Leseoperationen auf mehrere Follower-Knoten verteilt werden, während der Leader-Knoten Schreiboperationen koordiniert. Dies entlastet den Hauptknoten und sorgt für eine höhere Leistung bei parallelen Abfragen. Zusätzlich erlaubt die flexible Integration unterschiedlicher Datenquellen sowie die Nutzung standardisierter Formate eine einfache Erweiterung der Plattform um neue Mobilitätsdienste oder zusätzliche Datenquellen, ohne dass die bestehende Architektur angepasst werden muss.

3 Erreichbarkeitsmetriken für den intermodalen Verkehr

Erreichbarkeitsmetriken sind zentrale Instrumente, um die Zugänglichkeit von Orten zu analysieren und Mobilitätsangebote zu bewerten. In Abschn. 3.1 wird zunächst ein Überblick über Erreichbarkeitskonzepte in der Literatur gegeben, bevor in dem sich daran anschließenden Abschn. 3.2 elementare Anforderungen an eine Erreichbarkeitsmetrik im intermodalen Verkehr beschrieben werden. In Abschn. 3.3 wird dann eine konkrete Metrik vorgestellt, die auf Isochronen basiert, und sowohl Flächen- als auch Distanzmetriken integriert, um eine umfassende Analyse der Erreichbarkeiten zu ermöglichen und somit die in Abschn. 3.2 vorgestellten Anforderungen zu erfüllen.

3.1 Erreichbarkeitskonzepte in der Literatur

In der Literatur sind im viele verschiedene Ansätze entwickelt worden, die unterschiedliche Aspekte von Erreichbarkeit fokussieren, und die sich im Wesentlichen in vier verschiedene Kategorien einteilen lassen (siehe z.B. Alam et al. (2010), Higgins et al. (2022)): Kumulative Opportunitätsmetriken messen, wie viele Ziele innerhalb eines bestimmten Zeit- oder Kostenrahmens erreichbar sind. Sie setzen klare Schwellenwerte, beispielsweise eine maximale Reisezeit, um Erreichbarkeit zu definieren. Studien wie Papa and Bertolini (2015) oder Farber and Fu (2017) zeigen die Anwendung dieser Methode, die oft in städtischen Kontexten für die Analyse von Arbeitsplatz- oder Servicezugänglichkeit genutzt wird. Gravitationsbasierte Metriken gewichten, inspiriert von der Gravitationstheorie, die Erreichbarkeit eines Ziels basierend auf dessen Entfernung und Attraktivität. Dabei sinkt der Einfluss eines Ziels auf die Erreichbarkeitsbewertung mit zunehmender Reisezeit oder Distanz, wodurch nahegelegene und leichter zugängliche Orte bevorzugt berücksichtigt werden. In Yang et al. (2019) und Ding et al. (2018) wird diese darüber hinaus durch topologische Analysen öffentlicher Verkehrsmittel erweitert. Utility-basierte Metriken bewerten die Erreichbarkeit unter Einbeziehung individueller Präferenzen und Nutzenfunktionen und berücksichtigen subjektive Präferenzen von Reisenden.

Sie berücksichtigen unterschiedliche Verkehrsmittel und Modalitäten, wie in Nassir et al. (2016) oder Guzman et al. (2023) beschrieben. Hierbei wird die wahrgenommene Qualität von Verbindungen zentral in die Analyse einbezogen. Location-basierte Metriken (Tong Zhang and He, 2021) bewerten die Erreichbarkeit aus der Perspektive eines Startpunkts. Sie sind besonders nützlich, um Netzwerkeffekte und die Struktur des Verkehrssystems zu untersuchen. Die Primal-Dual-Metrik in Cui and Levinson (2020) kombiniert sowohl die Dichte erreichbarer Ziele (Primal) als auch die Schwierigkeit der Erreichbarkeit entfernter Ziele (Dual) und verbindet somit kumulative und gravitationsbasierte Methoden.

Isochronenbasierte Metriken definieren räumliche Gebiete, die innerhalb bestimmter Reisezeiten erreicht werden können und ermöglichen die Visualisierung von Erreichbarkeitsmustern und deren zeitliche Entwicklung. Beispielsweise werden in Anderson et al. (2013) Erreichbarkeiten im 10-Minuten-Takt analysiert, um zeitliche Unterschiede in der Netzwerkkonnektivität aufzuzeigen. Der in dieser Publikation vorgestellte isochronenbasierte Ansatz ist in Teilen ähnlich zur Metrik in Djurhuus et al. (2015), wird allerdings um die maximale Distanz innerhalb der Isochronenfläche und die Hinzunahme von Shared-Mobility-Angeboten erweitert.

Jede dieser Metriken bringt spezifische Stärken und Schwächen mit sich, die je nach Kontext und Anwendungszweck sorgfältig abzuwägen sind. Für den Anwendungskontext der Erreichbarkeitsanalysen im intermodalen Verkehr wurde eine auf Isochronen basierende Metrik gewählt und bewusst auf die Integration von nutzenbasierten Ansätzen und Point-of-Interest-Daten verzichtet. Die für die Berechnung des Maßes genutzten „Opportunities“ sind vielmehr die von einem Fahrgast erreichbaren Quadratkilometer innerhalb einer vorgegebenen Reisezeit.

Das Thema Visualisierung von Erreichbarkeit insbesondere im städteplanerischen Kontext wird auch in Pajares et al. (2022) adressiert. Hauptziel ist hier die Entwicklung eines nutzerfreundlichen Tools, in dem verschiedene Datenquellen zusammengeführt und visualisiert werden können, um insbesondere Stadtplanern die Möglichkeit zu geben, typische Fragen der Stadtentwicklung (insbesondere unter dem Stichwort „15-Minuten-Stadt“) zu beantworten.

3.2 Anforderungen

Die vorliegenden Daten (Haltestellen- und Verbindungsdaten aus Sollfahrplänen) eignen sich für die Berechnung einer kumulativen Opportunitätsmetrik, die im Sinne einer guten Visualisierbarkeit als Isochronenfläche dargestellt werden soll, um eine Brücke zwischen dem Aspekt des Datenmanagements auf der einen und der verkehrsplanerischen Verwendung dieser Metrik auf der anderen Seite zu schlagen. Die sich ergebende Maßzahl soll als Attribut an einen Knoten im Property-Graph-Modell (also an eine Haltestelle, und nicht an einen beliebigen Ort auf der Landkarte) angefügt werden können. Die Berechnung des Maßes soll sich zunächst ausschließlich auf Verkehrsverbindungen, die von diesem Knoten ausgehen, beziehen und nicht von zusätzlichen Datenquellen wie z. B. Points of Interest abhängen, um eine gewisse Allgemeingültigkeit sicherzustellen. Das Maß lässt sich damit als Beantwortung der folgenden Frage verstehen: Wie weit kommt ein Fahrgast von einer konkreten Starthaltestelle innerhalb einer fest vorgegebenen maximalen Reisezeit?

Zusammengefasst kommen wir zu folgenden konkreten Anforderungen:

- *Unidirektionalität*: Das Maß soll ausschließlich von der Starthaltestelle abhängen und keine spezifische Relation zwischen der Start- und einer fest gewählten Zielhaltestelle berücksichtigen. Diese Anforderung gewährleistet eine allgemeingültige Berechnung für beliebige (Start-)Haltestellen.
- *Offene Daten*: Die Berechnung soll ausschließlich auf öffentlich verfügbaren Fahrplan- und Geodaten basieren, sodass keine zusätzlichen Datensätze wie beispielsweise Point-of-Interest-Daten oder Bevölkerungsdichten erforderlich sind. Das Maß konzentriert sich damit auf die Bewertung der Anbindung durch öffentliche Verkehrsmittel und Shared-Mobility-Angebote, verzichtet jedoch auf eine individuelle Gewichtung einzelner Orte, um eine hohe Allgemeingültigkeit der Analyse sicherzustellen.
- *Effiziente Berechnung*: Das Maß soll so gestaltet sein, dass es auch bei einer großen Anzahl von Datenpunkten durch eine effiziente Berechnung eine schnelle und zuverlässige Durchführung von Analysen ermöglicht.
- *Grafische Darstellung*: Das Erreichbarkeitsmaß soll grafisch darstellbar und interpretierbar sein, damit Anwender ein intuitives Verständnis für die zugrundeliegenden Analysen und die erzielten Ergebnisse entwickeln können.
- *Ausgewogenheit*: Das Maß soll ein ausgewogenes Gleichgewicht zwischen der Bewertung von regionalem Nahverkehr und überregionaler Verkehrsanbindung bieten. Idealerweise ermöglicht es eine flexible Regulierung dieser beiden Aspekte durch die Möglichkeit einer Gewichtungsanpassung, um unterschiedliche Szenarien und Bedürfnisse abzudecken.

Um den oben genannten Anforderungen gerecht zu werden, wird ein isochronen-basiertes Maß gewählt, das sowohl Flächen- als auch Distanzmetriken integriert. Die Modellierung dieses Konzepts basiert auf der Annahme, dass ein Fahrgast seine Reise an einer beliebig gewählten Haltestelle des ÖPV zu einem festgelegten Startzeitpunkt beginnt, im ersten Schritt ein öffentliches Verkehrsmittel nutzt, um dann zu einer innerhalb einer festgelegten maximalen Reisezeit erreichbaren Zielhaltestelle zu gelangen. Nach dem Verlassen der Zielhaltestelle kann die noch verbleibende Reisezeit genutzt werden, um zu Fuß weiterzugehen oder Shared-Mobility-Angebote zu nutzen. Alle auf diese Weise in der vorgegebenen maximalen Reisezeit durch einen Fahrgast erreichbaren Orte werden zur *Isochrone* zusammengefasst. Die durch diese Isochrone begrenzte Fläche entspricht dann allen Punkten auf der Karte, die mit einer Reisezeit von höchstens der festgelegten maximalen Reisezeit erreicht werden können. In manchen Fällen kann dies dazu führen, dass die Isochronenfläche nicht zusammenhängend ist, weil beispielsweise Haltestellen entlang einer sehr schnellen Zugverbindung weit voneinander entfernt sind (siehe Beispiel in Abb. 2). In die Bewertung der Starthaltestelle wird sowohl der Inhalt der Isochronenfläche als auch der maximale Abstand zweier Punkte auf der Isochrone einbezogen. Dabei repräsentiert die Fläche eher ein Maß für die Erreichbarkeit im Nahverkehr, wohingegen die maximale Distanz eher auf den überregionalen Verkehr fokussiert. Auf diese Weise wird eine ausgewogene Bewertung von regionalen und überregionalen Verbindungen gewährleistet. Die Details zu dieser Metrik werden im nächsten Abschnitt besprochen.

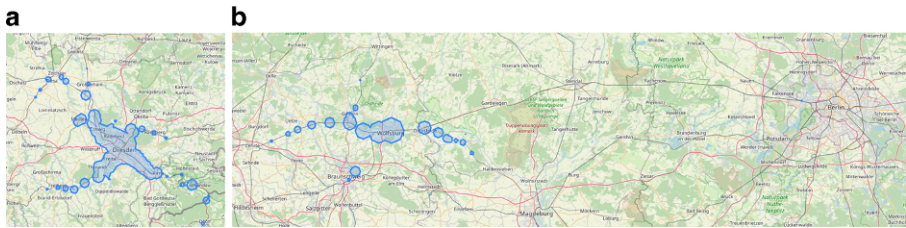


Abb. 2 Erreichbarkeit verschiedener Hauptbahnhöfe (Schienenverkehr) am 23.07.2022 um 14:00 Uhr. (Quelle der Karten: OpenStreetMap contributors (2025)). **a** 60-Minuten-Isochrone um Dresden Hbf, **b** 60-Minuten-Isochrone um Wolfsburg Hbf

3.3 Isochronenbasierte Erreichbarkeitsmetrik

Zum besseren Verständnis soll die Berechnung des Erreichbarkeitsmaßes im Folgenden explizit beschrieben werden. Dabei nehmen wir an, dass sich Fahrgäste identisch verhalten, also insbesondere Shared-Mobility-Angebote nutzen, wenn sie verfügbar sind.

Zunächst wird eine Starthaltestelle sowie ein Abfahrtsdatum mit Uhrzeit definiert, gefolgt von der Festlegung einer maximalen Reisezeit $t_{\max}$. Die Berechnung des Erreichbarkeitsmaßes bezieht sich dann auf diese festen Parameter. Anschließend werden alle Haltestellen bestimmt, die von der Starthaltestelle innerhalb von $t_{\max}$ mit dem ÖPV erreicht werden können. Für jede dieser erreichbaren Haltestellen wird entsprechend der verbleibenden Zeit ($t_{\max}$ minus Reisezeit bis zur Haltestelle) ermittelt, wie weit man sich von dort aus noch zu Fuß bzw. unter Verwendung von Shared-Mobility-Angeboten (Leihfahrräder, Leihroller) fortbewegen kann. Um der Unsicherheit in der Verfügbarkeit von Shared-Mobility-Angeboten Rechnung zu tragen, gehen diese nur im Sinne des Erwartungswerts entsprechend der Verfügbarkeitswahrscheinlichkeiten ein, sodass sich eine mittlere Entfernung von d_{rest} Metern ergibt, die noch zurückgelegt werden kann.

3.3.1 Beispiel

An Haltestelle „Schlossallee“ stehen nach Ankunft noch 10 Minuten Restzeit zur Verfügung. Zu Fuß (mit 6 km/h) kann in dieser Zeit eine Distanz von 1000 m zurückgelegt werden. Mit einem Fahrrad (mit 18 km/h) legt man in dieser Zeit 3000 m zurück. Ist das Fahrrad mit Wahrscheinlichkeit 0,8 verfügbar, so ergibt sich ein Erwartungswert:

$$d_{\text{rest}} = 0,8 \cdot 3000 \text{ m} + 0,2 \cdot 1000 \text{ m} = 2600 \text{ m}.$$

Gemäß dieser Vorgehensweise gehören alle Orte mit einem Abstand von d_{rest} zur Ausstiegshaltestelle zur Isochronenfläche. Um eine effiziente Berechnung gewährleisten zu können, werden diese Orte mit einem Oktagon um die Ausstiegshaltestelle, dessen Umkreisradius d_{rest} Meter beträgt, approximiert.

Dies wird nun für alle Haltestellen durchgeführt, die innerhalb der vorgegeben Reisezeit $t_{\max}$ vom Ausgangsort aus erreichbar sind. Die Gesamtfläche ergibt sich

dann als Vereinigung aller von diesen Haltestellen erreichbaren Punkte, also mittels der Vereinigung aller Oktagonen um die Ausstiegshaltestellen.

Um eine passende Maßzahl zu erhalten, werden sowohl der Inhalt der Isochronenfläche als auch die maximale Luftlinienentfernung zweier Punkte in der Isochronenfläche bestimmt. Beide Werte werden normiert (mit den zum Abfahrtsdatum auf einem geografisch geeignet eingegrenzten Gebiet jeweils maximal erreichbaren Werten) und anschließend als Konvexkombination mit dem Gewicht $0 \leq \alpha \leq 1$ zu einer Maßzahl zusammengefasst. Die Anpassung dieses Parameters α ermöglicht eine individuelle Gewichtung (Ausgewogenheit) zwischen Nahverkehr (eher repräsentiert durch den Flächenanteil) und Fernverkehr (eher repräsentiert durch die maximale Distanz). Zu beachten ist weiterhin, dass die so entstandene Maßzahl von Ort, Startzeit und der Reisedauer $t_{\max}$ abhängig ist. Je nach Ziel der Analyse empfiehlt es sich, über verschiedene Startzeiten (etwa alle 5 Minuten zwischen 6 Uhr und 18 Uhr) zu mitteln, um eine von der Startzeit und damit von speziellen Abfahrtszeiten unabhängige Maßzahl zu erhalten. Ebenso kann es von Vorteil sein, die Berechnungen für verschiedene Werte von $t_{\max}$ durchzuführen und anschließend zu mitteln.

In Abb. 2 sind beispielhaft zwei Isochronenflächen um die Stationen „Dresden Hbf“ und „Wolfsburg Hbf“ für eine maximale Reisezeit von 60 Minuten dargestellt. Beide Kartenausschnitte verfügen über denselben Maßstab, um einen direkten visuellen Vergleich zu ermöglichen. Während die Fläche um „Dresden Hbf“ mit 497 km^2 deutlich größer ist als um „Wolfsburg Hbf“ ($242,12 \text{ km}^2$), fällt der Vergleich für die maximale Distanz mit $90,77$ zu $212,11 \text{ km}$ zugunsten von Wolfsburg aus, da aufgrund der guten ICE-Anbindung innerhalb von 60 Minuten sogar der Bahnhof „Berlin-Spandau“ (rechts im Bild von Abb. 2b) erreicht werden kann. Aufgrund der gleichen Gewichtung von (normierter) Fläche und (normierter) maximaler Distanz durch einen Parameterwert von $\alpha = 0,5$ ist „Wolfsburg Hbf“ gemäß der oben definierten Erreichbarkeitsmetrik mit einem Wert von $0,37$ zur gegebenen Abfahrtszeit deutlich besser erreichbar als „Dresden Hbf“ ($0,27$).

In Abb. 2 wird deutlich, dass die Isochronenfläche nicht notwendigerweise zusammenhängend ist, da sie lediglich diejenigen Punkte umfasst, die ein Fahrgast tatsächlich regulär nach Fahrplan (also ohne eine Intervention wie beispielsweise eine Notbremsung) nach Ausstieg aus dem Zug erreichen kann. Da der ICE zwischen Wolfsburg Hauptbahnhof und Berlin-Spandau (Abb. 2b) nicht hält, können zahlreiche Orte entlang der Strecke durch den Fahrgast nicht erreicht werden und sind damit kein Teil der Isochronenfläche. In Spandau wiederum verbleiben nur noch wenige Minuten der maximalen Reisezeit von 60 Minuten, um die Reise zu Fuß fortzusetzen, was zu einem verhältnismäßig kleinen Isochronenflächenanteil um den Spandauer Bahnhof herum führt.

4 Anwendungsfälle

Die Analyse mithilfe der oben definierten isochronenbasierten Metrik bietet eine anschauliche und leicht verständliche Möglichkeit, die Erreichbarkeit von Orten zu visualisieren, indem sie geografische Bereiche darstellt, die innerhalb eines definier-

ten Zeitrahmens erreichbar sind. Eine solche Visualisierung ließe sich durch die Implementierung einer grafischen Oberfläche (GUI) auf Basis eines (im besten Fall frei verfügbaren) Kartenanbieters realisieren (gemäß *Schritt 6* in Abschn. 2.6). Nach der nutzerfreundlichen Auswahl von sowohl einer Starthaltestelle als auch einer vorgegebenen maximalen Reisezeit wird die entsprechende Isochronenfläche als Overlay in der Karte angezeigt. Zusätzlich werden Berechnungsergebnisse wie der Inhalt der Isochronenfläche, die maximale Distanz und der Wert des Erreichbarkeitsmaßes für die Starthaltestelle ausgegeben. Die Abbildungen 2 und 5 sind mithilfe einer solchen selbst programmierten GUI auf Basis von OpenStreetMap (OpenStreetMap contributors, 2025) entstanden. Denkbar ist jedoch auch die Nutzung der Plattform als Datengrundlage für Erreichbarkeitsanalysen, deren Berechnungsergebnisse – nach einer entsprechenden Verknüpfung – in einer bereits existierenden GUI angezeigt werden (z. B. in WebGIS-Anwendungen wie GOAT (Pajares et al., 2022) oder in anderen etablierten Geoinformationssystemen wie ArcGIS (McCoy et al., 2001)).

Dies macht die Plattform besonders wertvoll sowohl für die Verkehrs- und Stadtplanung als auch für die Kommunikation mit der Öffentlichkeit und mit Entscheidungsträgern. Ihre Flexibilität ermöglicht die Anpassung an unterschiedliche Szenarien, beispielsweise durch die Berücksichtigung verschiedener Verkehrsmittel, Zeitgrenzen oder Tageszeiten. Dadurch eignet sie sich sowohl für die Analyse multimodaler Verkehrsnetze als auch für spezifische Planungsziele, wie die Bewertung von Arbeitsplatzerreichbarkeit oder Zugang zu Gesundheitsdiensten. Darüber hinaus unterstützt die Metrikanalyse die Identifikation von Regionen mit schlechter Verkehrsanbindung und ermöglicht so gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Infrastruktur. Mit der Integration von Echtzeitdaten kann sie zudem aktuelle Verkehrsbedingungen widerspiegeln, was die Planungsgenauigkeit weiter erhöht.

Das Modell ermöglicht die Analyse verschiedener What-if-Szenarien, um potenzielle Veränderungen der Erreichbarkeit zu bewerten. Beispielsweise kann untersucht werden, wie sich der Erreichbarkeitswert verändert, wenn eine Verbindungskante entfernt wird, etwa aufgrund von Bauarbeiten oder einer gestrichenen Verbindung. Solche Analysen helfen, Ausgleichsmaßnahmen gezielt zu planen. Ein weiteres Szenario ist das Hinzufügen neuer Verbindungskanten, beispielsweise durch eine neue Linie oder Infrastrukturmaßnahmen wie den Bau einer Bahnstrecke. Dadurch lassen sich Verbesserungen der Erreichbarkeit bewerten und strategisch umsetzen. Zudem kann die Verfügbarkeit von Shared-Mobility-Angeboten analysiert werden, etwa durch das Hinzufügen oder Entfernen von Stationen. Diese Szenarien unterstützen eine optimale Verteilung von Stationen, um die Erreichbarkeit effizient zu steigern oder zu sichern. Im Folgenden werden einige exemplarische What-if-Analysen vorgestellt, die die Einsatzmöglichkeiten des Modells veranschaulichen.

4.1 What-if-Analyse am Beispiel der Dresdner Carolabrücke

Am 11. September 2024 führte der Einsturz der Carolabrücke in Dresden zur Unterbrechung einer der zentralen Verbindungen zwischen beiden Elbseiten. Davon betroffen sind sowohl Fuß- und Radverkehr als auch Straßenbahn- und Buslinien, sowie der Autoverkehr. Um die Auswirkungen dieses Ereignisses auf Erreichbarkeiten von Dresdner Haltestellen des ÖPV zu analysieren, wurden im Property Graph

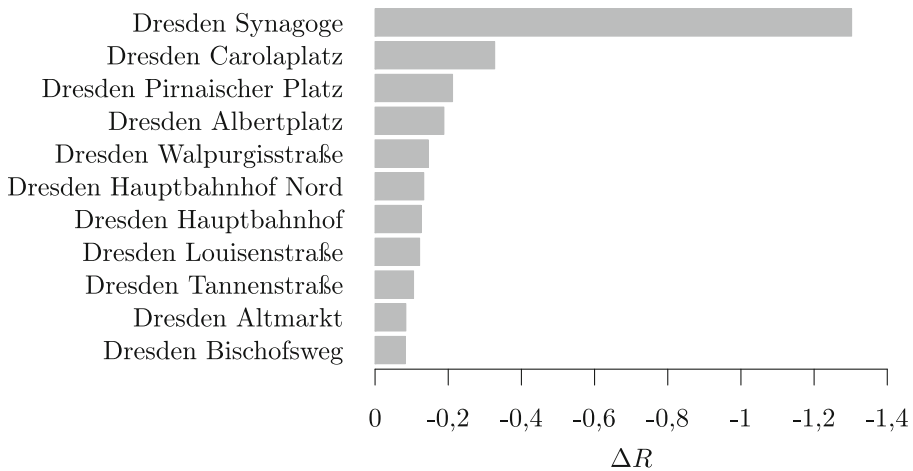


Abb. 3 Elf Haltestellen in Dresden mit der größten Reduzierung der Erreichbarkeit im Sinne des in Abschn. 3.3 definierten Maßes vor und nach dem Einsturz der Carolabrücke. Dargestellt ist die Differenz der Erreichbarkeitsmetriken (ΔR) pro Haltestelle nach und vor dem Einsturz

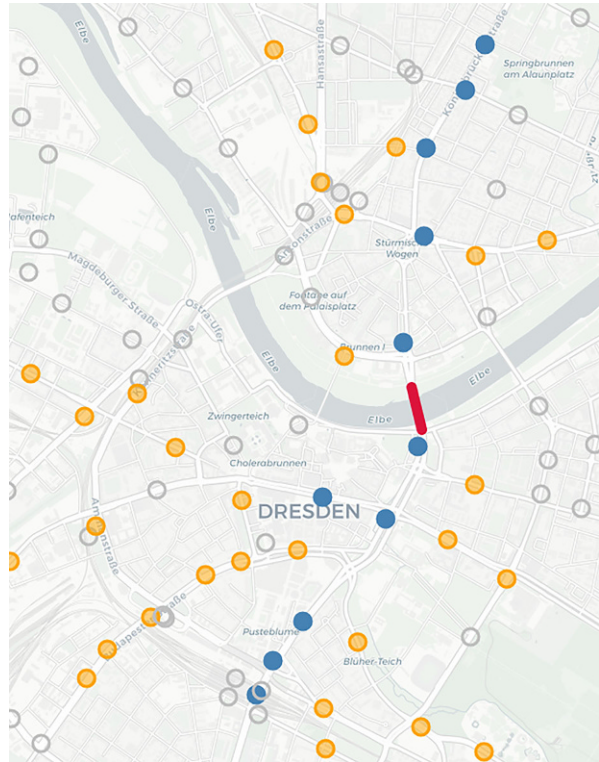
die Kanten zwischen den Haltestellen „Dresden Carolaplatz“ und „Dresden Synagoge“ gelöscht.² Diese Modifikation erlaubt es, die Auswirkungen des Ereignisses mithilfe des in Abschn. 3.3 beschriebenen Erreichbarkeitsmaßes zu untersuchen.

In Abb. 3 ist die Differenz der in Abschn. 3.3 vorgestellten Erreichbarkeitsmetrik (genauer: Erreichbarkeit ohne Brücke minus Erreichbarkeit mit Brücke) pro Haltestelle dargestellt. Die Ergebnisse in Abb. 3 zeigen, dass die Erreichbarkeit der Haltestellen in unmittelbarer Umgebung der Carolabrücke (für eine geografische Übersicht siehe rot markierte Haltestellen in Abb. 4) deutlich abnimmt, während die Erreichbarkeit von Haltestellen im erweiterten Stadtgebiet vom Einsturz nur geringfügig betroffen ist.³ In Abb. 4 ist zudem festzustellen, dass insbesondere Haltestellen derjenigen Linien betroffen sind, die vormals über die Carolabrücke geführt wurden. Obwohl diese Ergebnisse in der vorliegenden Form zunächst erwartbar erscheinen,

² Zusätzlich wurden die Kanten zwischen „Dresden Pirnaischer Platz“ und „Dresden Synagoge“ entfernt, da die Haltestelle Synagoge durch Straßenbahnen de facto nicht mehr bedient werden kann. Ebenso wurde eine direkte Busverbindung zwischen den Haltestellen „Dresden Pirnaischer Platz“ und „Dresden Albertplatz“ gelöscht.

³ Details zur Berechnung der Erreichbarkeitsmetrik in diesem Szenario: Die Berechnung der Werte der Erreichbarkeitsmetrik erfolgt für eine maximale Reisezeit $t_{\max}$ von 30 Minuten mit Fahrplandaten vom 01. April 2024 in einem Zeitraum zwischen 6 Uhr und 20 Uhr, sowohl für den Zustand mit Carolabrücke als auch mit den gelöschten Kanten wie oben beschrieben. Pro Haltestelle innerhalb einer über Dresden liegenden Boundingbox werden im 7-Minuten-Takt (um außerhalb eines 10- oder 5-Minuten-Taktfahrplans zu agieren) sowohl die Isochronenfläche als auch die maximale Distanz berechnet. Die Werte werden jeweils mit den zum Abfragezeitpunkt maximalen Werten innerhalb der Boundingbox normiert und zur Erreichbarkeitsmetrik für ein $\alpha = 0,5$ je Haltestelle und Abfragezeitpunkt zusammengefasst. Schließlich werden alle Metrikwerte je Szenario pro Haltestelle über die Zeit gemittelt (liefert pro Haltestelle einen Metrikwert nach und einen vor dem Brückeneinsturz) und voneinander subtrahiert. Diese Differenz ist in Abb. 3 abgetragen. Zu beachten ist, dass die neuen Fahrplandaten nach dem Brückeneinsturz inkl. etwaiger Umleitungen von bestehenden Linien noch nicht vorhanden sind, was sich u. U. auf fortbestehende Kanten auswirkt.

Abb. 4 Kartenausschnitt der Dresdner Innenstadt mit Carolabrücke (in rot markiert) und Haltestellen des ÖPV. In blau sind die elf vom Brückeneinsturz meistbetroffenen Haltestellen aus Abb. 3 dargestellt. Gelb markierte Haltestellen sind in geringerem Maße, grau markierte Haltestellen kaum von Erreichbarkeitsreduzierung betroffen. (Quelle der Karte: OpenStreet-Map contributors (2025))



so zeigen sie doch, dass die hier vorliegende Plattform grundsätzlich für diese Form von Untersuchung eines realistischen What-if-Szenarios geeignet ist.

4.2 What-if-Analyse am Beispiel intermodaler Verkehrsangebote

In einem weiteren Szenario wird untersucht, wie die Verfügbarkeit von Leihfahrrädern („Bikesharing“) die Erreichbarkeit beeinflusst. Ziel dieser Analyse ist es, Veränderungen der Erreichbarkeit innerhalb eines definierten Gebietes zu erfassen, die beispielsweise durch die Einführung eines Sharing-Angebots entstehen können. Abb. 5 zeigt exemplarisch die Auswirkungen einer solchen Einführung.

In Abb. 5a ist die 30-Minuten-Isochronenfläche um die Haltestelle „Dresden Postplatz“ dargestellt, wobei angenommen wird, dass die verbleibende Reisezeit nach dem Ausstieg aus dem öffentlichen Verkehrsmittel zu Fuß mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 5 km/h zurückgelegt wird. Im Vergleich dazu zeigt Abb. 5b dieselbe Ausgangssituation, jedoch wird die verbleibende Reisezeit mit einem Leihfahrrad bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 15 km/h bewältigt. Die Nutzung des Leihfahrrads vergrößert den Radius der Isochrone um die Ausstiegshaltestellen deutlich und führt sowohl zu einer größeren Isochronenfläche als auch zu einer

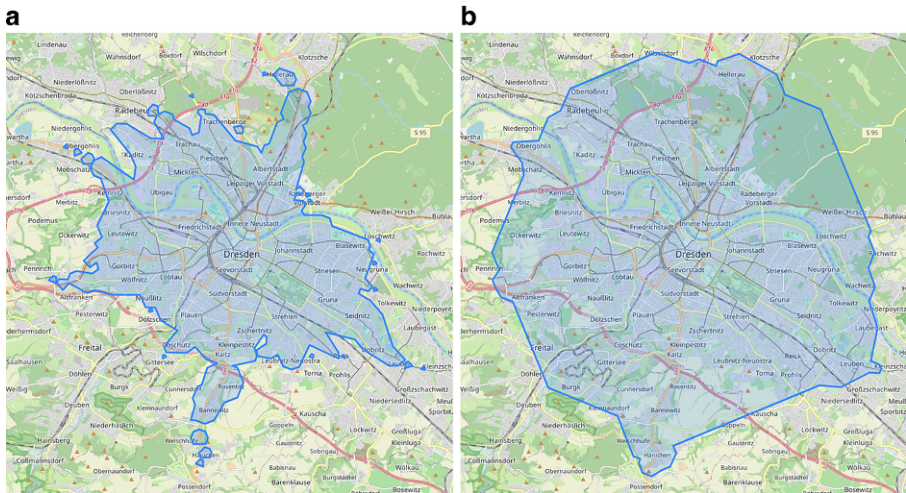


Abb. 5 Erreichbarkeit der zentralen Haltestelle „Dresden Postplatz“ am 22.07.2022 um 14:00 Uhr **a** ohne (Erreichbarkeit: 0,25) vs. **b** mit Bikesharing (Erreichbarkeit: 0,43). **a** 30-Minuten-Isochrone um Dresden Postplatz mit Fußweg, **b** 30-Minuten-Isochrone um Dresden Postplatz mit Bikesharing (Quelle der Karten: OpenStreetMap contributors (2025))

erweiterten maximalen Distanz. Im Ergebnis steigt der Erreichbarkeitswert der Haltestelle „Dresden Postplatz“ für den betrachteten Zeitpunkt von 0,25 auf 0,43.⁴

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Publikation wurde eine Datenarchitektur vorgestellt, die es ermöglicht, offen verfügbare intermodale Mobilitätsdaten in ein Property-Graph-Modell zu integrieren. Zu diesem Zweck wurden Fahrplansolldaten des ÖPV von DELFI e.V. sowie Daten von Sharing-Anbietern gesammelt und in das Property-Graph-Modell überführt. In einem weiteren Schritt wurde eine Metrik entwickelt, die Erreichbarkeiten von Haltestellen des ÖPV unter Verwendung der im Property-Graph-Modell enthaltenen Mobilitätsdaten beschreibt. In zwei Anwendungsbeispielen wurde gezeigt, dass sich die Metrik dazu eignet, um Vergleiche vor und nach einer verkehrlichen Maßnahme zu ziehen.

Zusammenfassend zeigt der vorgestellte Ansatz großes Potenzial zur datenbasierten Analyse und Optimierung der Erreichbarkeit im intermodalen Verkehr. Die flexible Datenarchitektur und das Property-Graph-Modell ermöglichen eine detaillierte Bewertung von Mobilitätsangeboten und die Durchführung vielseitiger What-if-Analysen. Dennoch sind einige Herausforderungen und Schwachstellen zu lösen, die vor allem mit der Qualität und Vollständigkeit der zugrunde liegenden Daten zusammenhängen.

⁴ In diesem Beispiel wird angenommen, dass an jeder Ausstiegshaltestelle für jeden Fahrgast ein Leihfahrrad zur Verfügung steht und auch von diesen genutzt wird.

Die Verwendung offener Daten birgt Fallstricke, insbesondere hinsichtlich ihrer Qualität und Konsistenz. Beispielsweise sind geografische Koordinaten von Haltestellen nicht immer vollständig verfügbar oder gleiche Haltestellen werden von verschiedenen Betreibern unterschiedlich benannt (dies ist insbesondere der Fall bei Bahnhöfen und den damit assoziierten Bus- bzw. Straßenbahnhaltestellen). Dies erfordert eine aufwändige Verknüpfung der Haltestellen während der Datenaufbereitung, um die Konsistenz im Property-Graph-Modell zu gewährleisten. Zudem lassen sich manche Verkehrsarten nicht ausreichend fein granular voneinander abgrenzen. Beispielsweise beinhaltet jede schienengebundene ÖPV-Verbindung ihren Betreiber, jedoch nicht immer zusätzliche Informationen darüber, ob es sich um eine Nah- oder Fernverkehrsverbindung handelt. Eine solche Unterscheidung wäre im Fall des Deutschlandtickets jedoch notwendig.

Ein weiteres Problem betrifft das unzureichend verfügbare Stammdatenmanagement, insbesondere bei der Deutschen Bahn. Die Zuordnung von Fahrplanliniendaten zu den physischen Bahnstrecken ist oft fehleranfällig. Das Entfernen von Verbindungskanten im Property-Graph-Modell, etwa infolge von baustellenbedingten Vollsperrungen, ist derzeit problematisch, da keine Streckentopografie hinterlegt ist. So müssen alle betroffenen Kanten, die Stationen auf einer gesperrten Strecke direkt miteinander verbinden, manuell entfernt werden – ein Prozess, der ohne tiefgreifendes Fachwissen kaum umsetzbar ist.

Eine mögliche Lösung könnte die Hinterlegung von STREDA-Streckennummern an den Kanten sein, um eine direkte Zuordnung von Verbindungskanten zu physischen Streckenabschnitten zu ermöglichen. Dies würde die automatisierte Verarbeitung und Anpassung des Property-Graph-Modells erheblich erleichtern und die Anwendbarkeit des Modells in solchen Szenarien deutlich verbessern.

Die genannten Herausforderungen verdeutlichen, dass weitere Arbeiten erforderlich sind, um die Datenqualität zu verbessern, die Modellintegration zu vereinfachen und die Analysemöglichkeiten zu erweitern.

Förderung Die Autoren danken dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr für die Förderung des Projektes im Rahmen der *Innovationsinitiative mFUND* (Förderkennzeichen: 01F1175A). Die Veröffentlichung dieses Artikels wird gefördert durch den Open Access-Publikationsfonds der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

References

- Alam BM, Thompson GL, Brown JR (2010) Estimating transit accessibility with an alternative method: Evidence from broward county, florida. *Transportation Res Rec J Transportation Res Board* 2144(1):62–71
- Anderson P, Levinson D, Parthasarathi P (2013) Accessibility futures. *Trans Gis* 17(5):683–705
- Beck M, Dux W, Dury G, Eckardt F, Lorenc OKP, nad Ute Siaden Ortega FS, Stober N, Thiesing G (2017) Standardised exchange of line network and timetable data with the European standard CEN-TS 16441 NeTeX. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V
- Cui M, Levinson D (2020) Primal and dual access. *Geogr Anal* 52(3):452–474
- Ding J, Zhang Y, Li L (2018) Accessibility measure of bus transit networks. *IET Intell Transport Syst* 12(7):682–688
- Djurhuus S, Hansen SH, Aadahl M, Glümer C (2015) Building a multimodal network and determining individual accessibility by public transportation. *Environ Plann B Plann Des* 43(1):210–227
- Farber S, Fu L (2017) Dynamic public transit accessibility using travel time cubes: Comparing the effects of infrastructure (dis)investments over time. *Comput Environ Urban Syst* 62:30–40
- Guzman LA, Cantillo-Garcia VA, Oviedo D, Arellana J (2023) How much is accessibility worth? utility-based accessibility to evaluate transport policies. *J Transp Geogr* 112:103683
- Higgins C, Palm M, DeJohn A, Xi L, Vaughan J, Farber S, Widener M, Miller E (2022) Calculating place-based transit accessibility: Methods, tools and algorithmic dependence. *JTLU* 15(1)
- Kimball R, Caserta J (2004) The data warehouse ETL toolkit: practical techniques for extracting, cleaning, conforming, and delivering data. Wiley
- McCoy J, Johnston K, Institute ESR (2001) Using ArcGIS spatial analyst: GIS by ESRI. Environmental Systems Research Institute Redlands
- Nassir N, Hickman M, Malekzadeh A, Irannezhad E (2016) A utility-based travel impedance measure for public transit network accessibility. *Transportation Res Part A: Policy Pract* 88:26–39
- OpenStreetMap contributors (2025) Planet dump retrieved from. <https://planet.osm.org> (<https://www.openstreetmap.org>)
- Pajares E, Jehle U, Hall J, Miramontes M, Wulforst G (2022) Assessment of the usefulness of the accessibility instrument goat for the planning practice. *J Urban Mobil* 2:100033
- Papa E, Bertolini L (2015) Accessibility and transit-oriented development in european metropolitan areas. *J Transp Geogr* 47:70–83
- Zhang TWZ, He Z (2021) Measuring positive public transit accessibility using big transit data. *Geo-spatial Inf Sci* 24(4):722–741
- Yang R, Liu Y, Liu Y, Liu H, Gan W (2019) Comprehensive public transport service accessibility index—a new approach based on degree centrality and gravity model. *Sustainability* 11(20)

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.