

Erreichbarkeitsgraphen als Werkzeug zur Visualisierung des Treibhausgasausstoßes für die Verkehrsmittel Flugzeug, Auto, Bahn und Reisebus bei der Dienstreiseplanung

Malte Christiansen¹, Jochen Wittmann¹

¹ Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Studiengang Umweltinformatik, Wilhelminenhofstraße 75A, 12459 Berlin, Germany, wittmann@htw-berlin.de

Abstract. Die Angestellten der HTW Berlin (Hochschule für Technik und Wirtschaft) besuchen Konferenzen und sind im Rahmen internationaler Projekte in aller Welt unterwegs. Eine Forschungsgruppe der HTW Berlin hat die Reisedaten des Jahres 2017 gesammelt, um die Verteilung der für die Dienstreisen gewählten Verkehrsmittel zu analysieren. Deren Rohdaten bilden die Ausgangslage für dieses Projekt, das die ausgestoßene Treibhausgasmenge der Verkehrsmittel Flugzeug, Auto, Reisebus und Zug miteinander vergleicht und visualisiert.

Ausgangswert bilden die ausgestoßenen Treibhausgase für einen Flug von Berlin nach München. Die meistgenutzte Verbindung der Angestellten im Jahre 2017. Dieser Wert bildet das Limit an Treibhausgasen, das den anderen Verkehrsmitteln zur Verfügung steht.

Die Strecke zwischen Berlin und München beträgt 528 km und stößt 10,6 kg Treibhausgase aus. Mit der gleichen Menge könnten im Auto 764 km, im Reisebus 3317 km und im Zug 2948 km zurückgelegt werden. Der Unterschied ist deutlich zu erkennen. Mit der Treibhausgasmenge, welche bei einem Flug von Berlin nach München freigesetzt wird, würde der Zug bis nach Lissabon und der Reisebus tief ins Innere von Russland (z. B. Ufa) kommen.

Ziel ist es, diese Informationen in den Prozess der Planung und Buchung von Dienstreisen zu integrieren, um bei den Beteiligten das Problembewusstsein für CO₂-sparende Verkehrsmittel zu wecken.

1 Motivation

Dienstreisen gehören für Hochschulmitglieder zum beruflichen Alltag. Zum wissenschaftlichen Austausch ist der Besuch von internationalen Konferenzen unverzichtbar. Dazu kommen Projekte mit den entsprechenden

Verpflichtungen zu Dienstreisen anlässlich von Meetings und Präsentationen. Dies gilt auch für die Angestellten an der HTW Berlin (Hochschule für Technik und Wirtschaft). Sie unternehmen Dienstreisen in alle Welt. Diese Strecken werden häufig und wie selbstverständlich mit dem Flugzeug zurückgelegt. Laut den Umweltleitlinien der HTW Berlin sollen zwar öffentliche Verkehrsmittel vorgezogen werden, allerdings gilt dies nur, wenn es wirtschaftlich vertretbar ist. (HTW-Berlin, Umweltleitlinien, 2020) (HTW-Berlin, Mobilität, 2019)

Eine Projektgruppe der HTW Berlin hat die Reisedaten des Jahres 2017 gesammelt und die Verteilung der Verkehrsmittel veranschaulicht (Fronk, Güccük, Höhne, Motuz, & Zagorski, 2019). Deren Rohdaten bilden die Ausgangslage für das vorliegende Paper.

Bei der Gegenüberstellung von verschiedenen Verkehrsmitteln wird meistens nur in den Kategorien Zeit und Kosten argumentiert. So bietet zum Beispiel der wohl am häufigsten genutzte Routenplaner von Google (Google, 2020) nur genau diese beiden Zielkriterien für eine Routenoptimierung an. Sicherlich sind Zeit und Strecke zwei wichtige und nachvollziehbare Argumente, allerdings könnte die Gegenüberstellung noch um die Auswirkungen auf Klima und Gesundheit erweitert werden, um auch die ökologische Dimension bei der Transportmittelwahl transparent zu machen.

Um Angestellten, die ihre Geschäftsreisen mit alternativen Verkehrsmitteln zurücklegen, eine Argumentationshilfe an die Hand zu geben, möchte dieses Projekt anhand einer Visualisierung auf Kartenbasis den Unterschied zwischen Flugzeug einerseits und seinen Alternativen beim Faktor Treibhausgase andererseits darstellen. Als zum Fliegen alternative Verkehrsmittel wurden das

Auto, der Reisebus und der Zug gewählt. Bei denen es sich um gängige und leicht verfügbare Verkehrsmittel handelt.

Ziel ist es, Informationen über diese Alternativen in den Prozess der Planung und Buchung von Dienstreisen zu integrieren, um bei den Beteiligten das Problembewusstsein für CO₂-sparende Mobilität zu wecken.

In den folgenden Abschnitten wird daher zunächst kurz das Visualisierungsverfahren der Erreichbarkeitsgraphen selbst erklärt. Darauf folgt die Vorgehensweise zur Datenauswahl und -integration sowie die Möglichkeiten und Probleme der Nutzung der entsprechenden Tools unter ArcMap. Dabei wird auch auf die Randbedingung der Studie eingegangen, besonders auf die Beschränkung auf open-source Datenmaterial. Erste Resultate und eine Diskussion der Schwierigkeiten bei der Durchführung beschließen das Paper.

2 Methode

Als Grundlage für das angewandte Visualisierungsverfahren dienen Erreichbarkeitsgraphen. Erreichbarkeitsgraphen werden in der Kartografie angewandt, um darzustellen, welches Gebiet bei vorgegebener Distanz von einem gegebenen Punkt aus erreicht werden kann. Zur Demonstration zeigt Abbildung 1 als Beispiel die älteste bekannte Darstellung eines Erreichbarkeitsgraphen. Ausgehend von London als zentralem Punkt und Ausgangspunkt für die Entfernungsmessung zeigt sie die Reisezeit in die verschiedenen Regionen der Welt. Dabei wird ausgehend von London berechnet, wie viel Zeit auf einem gegebenen Wegenetz benötigt wird, die entsprechende Stelle auf dem Globus zu erreichen. Dargestellt ist dies in der historischen Karte durch in gewisser Weise aufeinander aufbauende, farblich gestaffelte Darstellungsschichten. Der dunkelgrüne Bereich wird am schnellsten erreicht, gefolgt von einem hellgelben Ring und so weiter. (Galton, 2020)

Auch heute noch wird diese Technik angewandt, um zu visualisieren, welche Orte innerhalb einer gegebenen Zeit erreicht werden können. In dieser Arbeit wird als Parameter für die Bestimmung der Ausdehnung der Erreichbarkeitszonen jedoch nicht das Attribut „Zeit“ angegeben vielmehr sollen die für die Reise benötigte Emissionsmenge an Treibhausgas zugrunde liegen. Dazu soll zunächst eine Obergrenze an Emissionen für die zu fah-

rende Strecke berechnet werden und anschließend angegeben und visualisiert werden, wie weit man auf einem gegebenen Wegenetz unter Einhaltung dieses Emissionsmaximums kommen kann. Der folgende Abschnitt erklärt die Vorgehensweise im Detail.

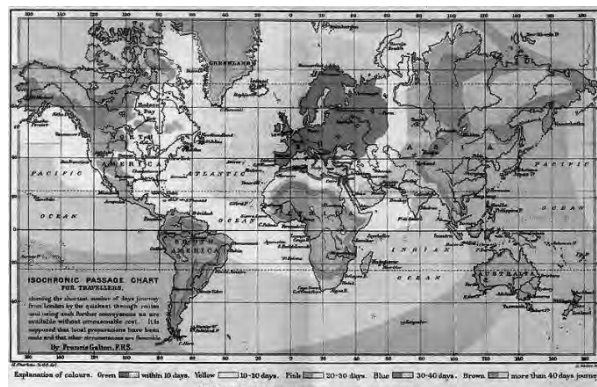


Figure 1: Die erste bekannte Erreichbarkeitskarte aus dem Jahre 1881. Sie zeigt die Reisezeit zu verschiedenen Regionen der Welt. (Galton, 2020)

3 Vorgehensweise

Nach der Veranschaulichung der Methode folgt nun die Schilderung der einzelnen Arbeitsschritte. Als Erstes wurde ein Wegenetz benötigt. Als Zweites musste der Grenzwert bzw. Maximalwert an Emissionen berechnet werden, der den Erreichbarkeitsgraphen für die Transportmittel als Limit dienen soll. Im Dritten und letzten Schritt konnten die Erreichbarkeitsgraphen dann erstellt werden.

3.1 Basisschicht erstellen

Ein Erreichbarkeitsgraf berechnet die mögliche Strecke anhand eines gegebenen Wegenetzes. Dieses Projekt vergleicht die Flugstrecke mit den Verkehrsmitteln Auto, Reisebus und Zug, sodass zwei Wegenetze benötigt werden. Einmal ein Straßennetz für Auto und Reisebus und einmal ein Schienennetz für den Zug.

Als Basis dienen Daten des OpenStreetMap-Projektes, die von den Downloadservern der Geofabrik bezogen wurde (Geofabrik, 2019). Dabei wurden die europäischen Länder und Regionen als Shape-Files heruntergeladen. Aus diesen Shape-files wurden die für das Projekt benötigten Linienfeatures herausgesucht. Als Orientierung dienten die Wiki-Seiten des OpenStreetMap-Projektes.

- Für das Straßennetz wurde der Key **"highway"** mit den Werten „motorway“, „motorway_link“,

“trunk“, “trunk_link“, “primary“, “primary_link“, “secondary“, „secondary_link“, „tertiary“, „tertiary_link“, “unclassified“ verwendet.

- Für das Schienennetz wurde der Key "railway" mit dem Wert „rail“ verwendet.

Ziel dabei war, bewusst auch niederrangige Verkehrswege aufzunehmen, aber andererseits dennoch die Datenmenge auf eine handhabbare Größe zu reduzieren. Die Auswahl der hier angeführten Attributwerte ist für diesen Prototypen im Sinne einer Machbarkeitsstudie sicher praktikabel. Für die Integration in das Zielsystem, das den gesamten Dienstreiseplanungsprozess umfassen soll, muss allerdings noch geprüft werden, ob sich die Menge der notwendigen Werte nicht weiterhin reduzieren lässt, ohne wesentliche Abstriche in der Genauigkeit der Ergebniskarte zu erzeugen. So könnte es sinnvoll sein, das zugrundeliegende Wegenetz in Abhängigkeit vom gewünschten Maßstab der Zielkarte zu skalieren: Bei einer weiteren Reise werden kleinste Wegeverbindungen sicherlich weniger relevant für das Endergebnis sein als bei einer kürzeren Strecke.

Nachdem die Datenmenge deutlich geschrumpft war, konnten die Länder und Regionen zu einer Karte zusammengefügt und in einer Geodatabase gespeichert werden, um die weitere Verarbeitung zu erleichtern.

3.2 Berechnung der CO2 Faktoren

Für jedes gewählte Verkehrsmittel wurde ein Grenzwert berechnet. Dieser Wert berechnet sich aus dem Ausgangswert und dem jeweiligen Verbrauch pro Pkm (Personenkilometer). Als Ausgangswert wird die ausgestoßene Menge Treibhausgase für einen Flug von Berlin nach München definiert. Dies war die meistgenutzte Verbindung der HTW-Angestellten im Jahre 2017 (Fronk, Güccük, Höhne, Motuz, & Zagorski, 2019). Die Flugstrecke von Berlin nach München beträgt 528 km. Der Tabelle 1 wird die entsprechende Treibhausgasmenge pro Pkm entnommen und miteinander verrechnet.

Eine Person stößt demnach 10,6 kg Treibhausgase auf einem Flug von Berlin nach München aus. Ausgehend von diesem Wert konnte nun berechnet werden, welche Entfernung andere Transportmittel mit dem durch den Flugverkehr vorgegebenen Emissionsmaximum zurücklegen könnten.

Tabelle 1 enthält die entsprechend berechneten Distanzen, die als Grenzwert für das jeweilige Verkehrsmittel

eingetragen wurden. Basis waren dabei die inzwischen allgemein anerkannten durchschnittlichen Emissionen gemäß der Zusammenstellung des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt, 2020). Die Verwendung dieser Durchschnittswerte wird in einem folgenden Abschnitt diskutiert werden.

Tabelle 1: Durchschnittliche Emissionen der Verkehrsmittel im Jahre 2017. (Umweltbundesamt, 2020)

Verkehrsmittel	Treibhausgas (g/Pkm)	Auslastung	Distanz (km)
Flugzeug	201	82 %	528
Auto	139	1,5 Pers. pro PKW	764
Reisebus	32	60 %	3317
Zug (Fernverkehr)	36	56 %	2948

3.3 Distanzgraf erstellen

Nach der Berechnung der Grenzwerte für die erreichbare Distanz und der erfolgreichen Erstellung des Streckennetzes, konnte damit begonnen werden die Distanzgraf zu berechnen. Dazu wurde die Erweiterung „ArcGis Network Analyst“ von ArcGis verwendet.

Der „ArcGis Network Analyst“ benötigt ein Netzwerk-Dataset, das aus miteinander verbundenen Kanten (Linien) und Verbindungsknoten (Punkten) besteht. In diesem Projekt wird dazu einmal das Straßennetz und einmal das Schienennetz in ein Netzwerk-Dataset umgewandelt, um danach eine Netzwerkanalyse durchführen zu können.

Bei der Analyse können, wie bereits geschrieben, zeitliche Faktoren sowie Distanzen angegeben werden. Dieses Projekt arbeitet mit vorgegebenen Distanzen. Als Distanz wird für das jeweilige Verkehrsmittel der Wert in der Spalte Distanz in Tabelle 1 entnommen.

Aufgrund von der erheblichen Datenmenge konnten in Anbetracht der zur Verfügung stehenden Zielplattform, keine Polygone für den Reisebus und den Zug erstellt werden. Diese wurden nachträglich mittels des Tools „Feature in Polygon“ aus den Liniennetzen erzeugt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Erreichbarkeitsgraphen

Die Abbildungen 2, 3 und 4 stellen den jeweiligen Erreichbarkeitsgraphen für die Verkehrsmittel Auto, Reisebus und Zug dar. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen insbesondere, dass sich die mögliche Wegstrecke stark erweitert, wenn für die Reise der Reisebus oder der Zug gewählt wird. Dagegen fällt der Unterschied zwischen PKW und Flugzeug erstaunlich gering aus. (Abb. 2)

Während des Projektes gab es einige Faktoren, die die Qualität der Visualisierung wesentlich beeinflusst haben. Das war zum einen die bereits genannte Beschränkung in der Rechenleistung, andererseits die Qualität des zugrundeliegenden Wegenetzes, sowie schließlich auch die verwendeten pauschalierten Treibhausgaswerte. Auf diese Punkte soll im Folgenden eingegangen werden.

4.2 Problem Rechenleistung

Die genutzten Rechner stießen an die Grenzen ihrer Berechnungsmöglichkeiten für den „Network Analysten“. Es war nicht in vertretbarer Zeit möglich, ein Polygon für den Zug und den Reisebus zu berechnen. Die Berechnung eines Erreichbarkeitsgraphen wurde auf einen Standard-PC nach etwa 36 Stunden Rechenzeit abgebrochen. Stattdessen musste ein Umweg über die berechneten Linien gegangen werden, was eine potenzielle Fehlerquelle ist, da bei dieser Vorgehensweise einige Bereiche nicht korrekt dargestellt werden. Das betrifft zum Beispiel Bereiche in Norwegen und Schweden.

Tatsächlich liegen aber in den nicht berücksichtigten Zwischenräumen zwischen den durch das Liniennetz erreichbaren Punkten ja gerade keine Verkehrswege, die es ermöglichen würden, in diese Zwischenräume vorzudringen. Die Polygonbildung glättet lediglich den Rand des Ergebnisses der Erreichbarkeitsrechnung. Besonders in Bezug auf die Genauigkeitsanforderungen des Prototypen stellt dies keine wesentliche Einschränkung dar.

4.3 Problem Basis-Geodatendaten

Das Ausgangsmaterial basiert auf Ländern, die Geofabrik dem europäischen Raum zuordnet. So werden Georgien, Russland (der nicht europäische Teil) und die Türkei zu Europa zugerechnet, Aserbaidschan oder Kasachstan jedoch nicht. Diese Grenzziehung durch die Geofabrik ist dabei nicht ganz klar und wird auch auf den Seiten des Anbieters nicht näher erläutert (Geofabrik, 2019).

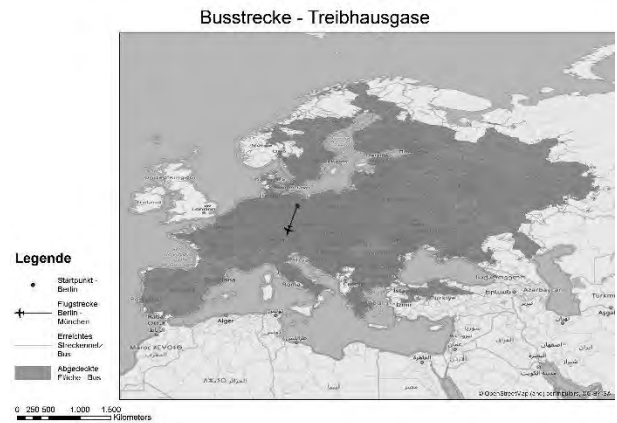


Figure 2: Erreichbarkeitsgraf für einen PKW, wenn 10,6 kg Treibhausgase zur Verfügung stehen.

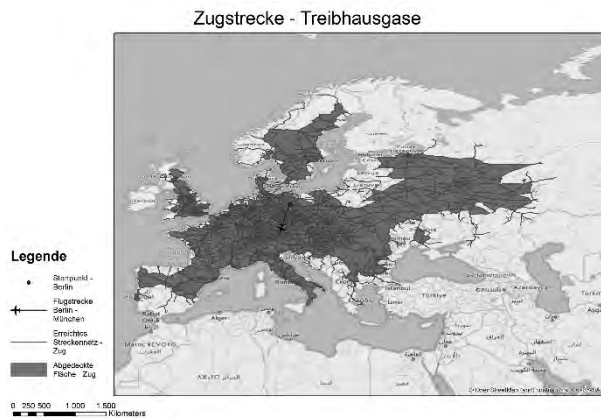


Figure 3: Erreichbarkeitsgraf für einen Reisebus, wenn 10,6 kg Treibhausgase zur Verfügung stehen



Figure 4: Erreichbarkeitsgraf für einen Zug, wenn 10,6 kg Treibhausgase zur Verfügung stehen.

Die Auswahl der hier berücksichtigten Länder erscheint somit recht willkürlich. Bei nachfolgenden Anwendungen sollten daher die ungefähr benötigten Reichweiten vorab abgeschätzt werden und als Richtwert dienen, welche Länder bei der Erstellung der Basisschicht berücksichtigt werden sollten.

Ein auffälliger Unterschied zwischen Abbildung 3 und 4 ist, dass es eine Verbindung zwischen Frankreich und Großbritannien für das Schienennetz gibt, aber nicht für das Straßennetz. Sodass die Reisebuskarte nicht die theoretisch mögliche Strecke bis nach Großbritannien abbildet. Ursache hierfür ist, dass der Reisebus nur mittels des Zuges den Tunnel oder mittels einer Fähre den Kanal durch-/überqueren könnte. Der Reisebus muss selbst auf andere Verkehrsmittel ausweichen. Da keine Straße den Ärmelkanal durchquert, kann der „Network Analyst“ diese Strecke nicht ohne Weiteres berücksichtigen. Hier könnte man im Einzelfall durch eine individuelle Nachbearbeitung des Streckennetzes abhelfen, ein Aufwand der für den Prototypen nicht getrieben wurde.

4.4 Problem Emissionswerte für die jeweiligen Verkehrsmittel

Die gewählten Werte beruhen auf Durchschnittswerten herausgegeben vom Umweltbundesamt. Die tatsächlich ausgestoßene Menge an Treibhausgasen für einen Flug zwischen Berlin und München könnte höher sein, weil während des Starts und der Landung tendenziell mehr Treibhausgase ausgestoßen werden, als wenn die Reiseflughöhe erreicht ist. Daher haben Kurzstreckenflüge (unter 750 km) im Schnitt einen höheren Treibhausgasausstoß als Langstreckenflüge. Bei der Tabelle des Umweltbundesamtes ist allerdings nur ein Wert für das Verkehrsmittel Flugzeug angegeben. (Umweltbundesamt, 2020) Bei der Übertragung auf sämtliche Dienstreisen sollte daher unbedingt eine entsprechende Differenzierung gemäß der Länge des Fluges bzw. gemäß einer detaillierteren Klassifizierung des Fluges vorgenommen werden. Für die Machbarkeitsstudie des hier vorgestellten Prototyps wurde zunächst auf diese Präzisierung verzichtet, zumal bei den Reisen der Datenbasis auch nicht abgefragt wurde, ob es sich bei der geflogenen Verbindung um einen Direktflug mit oder ohne Zwischenlandung handelte.

Des Weiteren kann die Auslastung eines PKWs bei

einer tatsächlichen Dienstreise höher sein, als die hier angegebenen 1,5 Personen pro PKW. Die Reichweite des Fahrzeugs erhöht sich, umso mehr Personen im Fahrzeug sitzen. Dies ist allerdings eine Information, die im betrachteten Use-Case bei der Reiseplanung einer konkreten Dienstreise durchaus zur Verfügung steht und als zusätzlicher Parameter vom Benutzer abgefragt werden könnte. Damit kann dann ein für die aktuell untersuchte Dienstreise spezifischer Emissions-Wert und damit eine spezifische potenzielle Reichweite leicht ermittelt werden.

5 Fazit und Ausblick

Trotz der genannten Einschränkungen ist der Unterschied der möglichen Strecke zwischen Flugzeug und anderen Verkehrsmitteln, speziell zum Reisebus und Zug, deutlich zu erkennen. Mit der Treibhausgasmenge, welche bei einem Flug von Berlin nach München freigesetzt wird, würde der Zug bis nach Lissabon und der Reisebus bis weit hinter Moskau ins Innere von Russland kommen. Dieses Projekt möchte niemanden dazu auffordern, statt mit dem Flugzeug nach München, lieber mit dem Bus nach Lissabon zu fahren. Allerdings haben erste Präsentationen im Rahmen der Hochschule gezeigt, dass diese Art der Visualisierung durchaus das Problembewusstsein fördert, indem es anschaulich aufzeigt, welches Einsparpotenzial an Treibhausgasen bei dem Verzicht auf Flugreisen vorhanden ist.

Im Weiteren ist daher geplant, eine im Funktionsumfang reduzierte, jedoch für die jeweils aktuell zu planende Dienstreise individuell parametrisierbare Version zu erstellen und diese Version standardmäßig bei jeder Beantragung einer Flugreise zur Verfügung zu stellen.

6 Literaturverzeichnis

- Fronk, M., Güccük, A., Höhne, M., Motuz, A., & Zagorski, A. (2019). Erfassung und Auswertung der mit Dienstreisen verbundenen Umweltauswirkungen der HTW Berlin. In J. Wittmann, *Simulation in den Umwelt- und Geowissenschaften, Workshop Kassel 2019* (S. 15-26). Shaker: Aachen.
- Galton, F. (31. 03. 2020). *Wikipedia*. Von https://en.wikipedia.org/wiki/File:Isochronic_Passage_Chart_Francis_Galton_1881.jpg abgerufen

- Geofabrik. (09.. 07. 2019). *OpenStreetMap Europe*. Von <https://download.geofabrik.de/europe.html>. abgerufen
- HTW-Berlin. (09.. 07. 2019). *Mobilität*. Von [htw-berlin.de/einrichtungen/zentrale-hochschulverwaltung/technische-dienste/organisation-atd/umweltmanagement/aktivitaeten-und-tipps/mobilitaet/](https://www.htw-berlin.de/einrichtungen/zentrale-hochschulverwaltung/technische-dienste/organisation-atd/umweltmanagement/aktivitaeten-und-tipps/mobilitaet/) abgerufen
- HTW-Berlin. (31.. 03. 2020). *Umweltleitlinien*. Von https://www.htw-berlin.de/fileadmin/HTW/Zentral/ZHV_IQM_-_Qualitaetsmanagement/08_Umweltleitlinien_final.pdf. abgerufen
- Umweltbundesamt. (31.. 03. 2020). *Emissionsdaten*. Von <https://web.archive.org/web/20190718134549/https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten> abgerufen