

Bachelorarbeit

Ermittlung von ÖV-Fahrzeiten anhand der Streckengeometrie – eine GIS-Analyse

Florian Woller

florian.woller@hotmail.com

Matr.Nr. 11775777

Datum: 19.02.2022

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es mittels einer GIS-Analyse die theoretisch mögliche Fahrzeit einer Linie des öffentlichen Verkehrs in Wien zu ermitteln. Basis der zu entwickelnden Methode bilden die Streckeninformationsdaten des 59A, der aufgrund der verfügbaren Sekundärdaten als Untersuchungsobjekt gewählt wurde. Es wurden unterschiedliche Lösungswege zur Aufbereitung der GIS-Daten entwickelt und getestet. In der anschließenden Berechnung der theoretisch möglichen Fahrzeit lieferten zwei Lösungswege aussichtsreiche Ergebnisse. Die anhand der Streckeninformationsdaten ermittelten Fahrzeiten weichen teilweise nur minimal von den tatsächlichen Fahrplänen ab. Die Resultate bestätigen die Funktionalität der entwickelten Methode, die somit als Referenz für die Analyse weiterer Linien dienen kann. Auch die Frage wie sich flächendeckende Tempo-30-Zonen auf den öffentlichen Verkehr auswirken, kann mit der entwickelten Methode beantwortet werden. Im Falle des 59A würde eine Ausweisung von flächendeckenden Tempo-30-Zonen eine 10%ige Steigerung der Fahrzeit (ca. 2 Minuten) nach sich ziehen. Es ist anzunehmen, dass es möglich wäre diese Verzögerung durch Begleitmaßnahmen auszugleichen.

1 Einleitung

Die Einrichtung weitreichender Tempo-30-Zonen in Wien könnte vielschichtige Vorteile mit sich bringen. Die Wahrscheinlichkeit tödlicher Unfälle im Straßenverkehr ist bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h um ein Vielfaches geringer als bei 50 km/h [International Transport Forum (2018)]. Auch die vom motorisierten Individualverkehr verursachte Lärmbelastung nimmt mit einer Geschwindigkeitsreduktion in der Regel ab [Umweltbundesamt (2016)]. Zu guter Letzt kann die Ausweisung von Tempo-30-Zonen eine Verbesserung der Luftqualität, sowie eine Reduktion der CO₂-Emissionen mit sich bringen, wenngleich diese potenziellen Verbesserungen auch stark von Faktoren wie dem Fahrverhalten abhängen und eine solche Generalisierung mit Vorsicht zu betrachten ist [Topp (2014)].

Trotz der genannten Vorteile einer solchen Geschwindigkeitsreduktion gibt es Organisationen und Interessensgruppen, die sich aus unterschiedlichen Gründen gegen die Ausweisung weiterer Tempo-30-Zonen in Wien aussprechen. Zu den Gegnern gehören mitunter auch die Wiener Linien. Der öffentliche Verkehrsbetreiber hat in der Vergangenheit bei unterschiedlichen Initia-

tiven zur Ausweisung von Tempo-30-Zonen Befürchtungen geäußert, dass solche Maßnahmen den öffentlichen Verkehr einbremsen würden. Darunter leiden würden einerseits die Fahrgäste aufgrund längerer Fahrzeiten und andererseits die Wiener Linien selbst, da die Fahrpläne nur mit enormem Mehraufwand eingehalten werden könnten [Die Presse (2014); Fernsebner-Kokert (2012)].

2 Problemstellung & Forschungsfrage

Im Zuge mehrerer Bachelorarbeiten wurden bereits Versuche unternommen die Befürchtungen der Wiener Linien zu überprüfen [Stroh (2015); Glansegg (2016); Meusburger (2016); Sesar (2018)]. Die Untersuchungen erfolgten bei diesen Arbeiten in der Regel durch den Einsatz von GPS-Geräten, mit welchen Fahrzeiten und Geschwindigkeiten ausgewählter Linien gemessen wurden. Die Daten dieser Arbeiten zeigen, dass bei den analysierten Bus- und Straßenbahnlinien durch eine flächendeckende Geschwindigkeitsreduktion auf 30 km/h zwar Zeitverluste entstehen würden, allerdings bewegen sich diese Zeitverluste in einer Größenordnung, dass diese durch Begleitmaßnahmen entlang der Strecken wieder ausgeglichen und die ursprünglichen Fahrpläne weiterhin eingehalten werden könnten. Die Befürchtungen der Wiener Linien sind einerseits also nicht vollkommen unbegründet, andererseits erscheinen die Probleme, die eine solche Geschwindigkeitsreduktion mit sich bringen würden, nicht unüberwindbar.

Da sich die Daten der vorliegenden Bachelorarbeiten nur auf einige Bus- und Straßenbahnlinien beziehen, kann keine allgemein gültige Aussage zu den Auswirkungen einer flächendeckenden Tempo-30-Regelung auf Busse und Straßenbahnen in Wien getroffen werden. Das liegt mitunter an stark divergierenden Geschwindigkeitsprofilen einzelner Linien. Die Straßenbahnlinie 26 fährt beispielsweise auf knapp 30% ihres Weges 30 km/h oder schneller. Die Straßenbahnlinie 37 hingegen erreicht nur auf knapp 10% ihres Weges eine solch hohe Geschwindigkeit [Stroh (2015)]. Aufgrund dieser Differenzen wären die Linien 26 und 37 von einer flächendeckenden Reduktion der erlaubten Höchstgeschwindigkeit unterschiedlich stark betroffen.

Wie an den Geschwindigkeitsprofilen der Straßenbahnlinien 26 und 37 erkennbar, bringen die im Zuge der genannten Bachelorarbeiten durchgeführten GPS-Messungen den Vorteil mit sich, dass die gesammelten Daten einzelne Linien sehr genau abbilden. Allerdings sind solche Messungen zeitintensiv und es stellt sich somit die Frage nach einer Analysemethode, die ohne GPS-Messungen auskommt. Deshalb wird im Zuge dieser Arbeit nach einer GIS-basierten Lösung gesucht, um die Auswirkungen einer flächendeckenden Geschwindigkeitsbegrenzung auf 30 km/h zu analysieren. Grundlage für die GIS-Analyse bilden öffentlich zur Verfügung stehende Daten zur Streckengeometrie einzelner Linien, zu deren Haltstellen, sowie zu den geltenden Geschwindigkeitsbeschränkungen entlang der Strecke. Im Zuge der GIS-Analyse sollen die theoretisch möglichen Fahrzeiten berechnet und dadurch aufgezeigt werden an welchen Punkten eine Geschwindigkeit von 30 km/h überhaupt überschritten werden kann. Das Ergebnis dieser Berechnungen kann zur Verifizierung mit den Fahrplänen der Wiener Linien und den bereits gesammelten GPS-Daten verglichen werden. Die beschriebene Analyse wird durch die folgende Forschungsfrage angeleitet:

Wie können mittels einer GIS-Analyse die theoretisch möglichen Fahrzeiten von öffentlichen Verkehrsmitteln in Wien anhand der Streckengeometrie möglichst automatisiert ermittelt werden?

3 Methodik

Da es keine etablierte Vorgehensweise zur Durchführung einer solchen GIS-Analyse gibt, ist die Methodenentwicklung als Teil dieser Arbeit zu verstehen. Zur Entwicklung und Verifizierung

der Methode wird in einem ersten Schritt eine solche GIS-basierte Lösung für eine Linie gesucht. Die Hintergründe der Wahl dieser Linie sind im folgenden Abschnitt beschrieben. Um die Übertragbarkeit der Methode zu garantieren, liegt ein besonderes Augenmerk darauf die einzelnen Arbeitsschritte aufzuzeichnen. Um den Aufwand für die Analyse weiterer Linien gering zu halten, wird außerdem darauf Wert gelegt, dass die Arbeitsschritte weitestgehend automatisiert durchgeführt werden können. Die Bearbeitung der Geodaten erfolgt mit der Geoinformationssoftware ArcGIS Pro.

3.1 Wahl der zu analysierenden Linie

Von den in Wien eingesetzten öffentlichen Verkehrsmitteln, eignen sich Busse und Straßenbahnen für das im Rahmen dieser Bachelorarbeit geplante Unterfangen. U-Bahnen wurden als gänzlich vom Straßenverkehr getrennt geführte Verkehrsmittel nicht in Betracht gezogen. Somit lag die erste Entscheidung darin, ob eine Bus- oder eine Straßenbahnlinie das Analyseobjekt darstellt.

Sowohl Straßenbahnen als auch Busse verkehren im Straßenverkehr und haben sich in der Regel daher an die geltenden Geschwindigkeitsbeschränkungen zu halten. Allerdings gibt es bei Straßenbahnlinien einige Aspekte, die die geplante GIS-Analyse erschweren würden. Beispielsweise gibt es Straßenbahnlinien, die auf gewissen Abschnitten einen vom Straßenverkehr getrennten Gleiskörper haben oder gar unterirdisch verlaufen. Darüber hinaus gibt es Regelungen, wie eine Maximalgeschwindigkeit bei der Überfahrt von Weichen und Schienenkreuzungen. Da diese Faktoren die Komplexität der GIS-Analyse steigern, wurde eine Buslinie als Untersuchungsobjekt gewählt.

Letztendlich erwies sich der 59A als das geeignetste Untersuchungsobjekt. Hintergrund dieser Wahl sind die verfügbaren empirischen Daten, die im Zuge einer Bachelorarbeit gesammelt wurden [Meusburger (2016)]. Wie bereits erläutert dienen diese empirischen Daten, neben den Fahrplänen der Wiener Linien, der Verifizierung des Ergebnisses der GIS-Analyse.

3.2 Grundlagendaten

Zur Ermittlung der theoretisch möglichen Fahrzeit einer Buslinie und den Auswirkungen einer flächendeckenden Tempo-30-Regelung sind Geodaten zur Streckengeometrie, zu den Haltestellen der Linie, sowie zu den geltenden Geschwindigkeitsbeschränkungen unentbehrlich. Ampeln sind für öffentliche Busse zwar auch ein Faktor, der die Fahrzeit beeinflusst, allerdings kann man keine generelle Aussage dazu treffen bei welchen Ampeln ein Bus stehen bleiben muss und bei welchen nicht. Deshalb werden die Standorte von Ampelanlagen entlang der Strecke, die zwar auch als Geodaten öffentlich verfügbar wären, in dieser Analyse nicht berücksichtigt. Die Datenquellen sind im Anhang zu finden.

Für die Geschwindigkeitsbeschränkungen wurde der von der Stadt Wien zur Verfügung gestellte Geodatenatz zu Tempo-30-Zonen herangezogen. Für jene Bereiche, die in dieser Datensatz nicht abdeckt, gilt die allgemein gültige Geschwindigkeitsbeschränkung von 50 km/h. Andere Geschwindigkeitsbeschränkungen kommen auf der Strecke des 59A nicht vor. Sollte dies bei anderen Linien der Fall sein, beispielsweise in Begegnungszonen, ist dies zusätzlich zu berücksichtigen.

Bei den Geodaten zur Streckengeometrie und den Haltestellen gibt es unterschiedliche Datenquellen, die jeweils Vor- und Nachteile mit sich bringen. Da diese Daten zentral für die Ermittlung der theoretisch möglichen Fahrzeiten sind, folgt eine kurze Beschreibung der unterschiedlichen Datenbestände, sowie eine Begründung, wieso der gewählte Datensatz gegenüber den anderen zu bevorzugen ist.

Als Entscheidungsgrundlage dienen die folgenden Anforderungen an die Daten. Die weitgehende Erfüllung dieser Anforderungen ermöglicht die späteren Berechnungen und ist wesentlich für die weiteren Arbeitsschritte.

- Die Daten sind öffentlich zugänglich und leicht zu beschaffen.
- Die Geodaten zur Streckengeometrie und zu den Haltestellen geben möglichst exakt die Wirklichkeit wieder.
- Die beiden Fahrtrichtungen der ÖV-Linie können getrennt voneinander betrachtet werden. Das heißt, dass sowohl für die Streckengeometrie als auch für die Haltestellen voneinander getrennte Geodaten existieren bzw. sich die Daten zu den beiden Fahrtrichtungen voneinander trennen lassen, selbst wenn die Standorte – beispielsweise von Haltestellen oder Streckenabschnitten – ident sind.

3.2.1 Öffentliches Verkehrsnetz Linien & Haltestellen

Diese von den Wiener Linien öffentlich zur Verfügung gestellten Daten setzen sich aus einem Liniendatensatz und einem Punktdatensatz zusammen, die jeweils das gesamte Netz der Wiener Linien umfassen. Zur Beschaffung der Geodaten einer einzelnen Linie bedarf es einer Operation zum Herausfiltern der gesuchten Informationen. Nach dem Herausfiltern wird ersichtlich, dass der Datensatz die Anforderung, dass die beiden Fahrtrichtungen getrennt voneinander betrachtet werden können, nicht erfüllt. Denn es gibt je Fahrtrichtung keine eigene Polylinie mit eindeutigen Anfangs- und Endpunkt. Es wäre möglich das gewünschte Ergebnis durch das manuelle Zusammenfügen einzelner Teilsegmente zu erreichen. Das konterkariert allerdings das Ziel einer weitgehend automatisierten Analyse.

Darüber hinaus zeigt der Abgleich mit Luftbilddaten, dass die Linie dieses Datensatzes teilweise stark von der tatsächlichen Route des Buses abweicht (siehe **Abb. 1**). Hinsichtlich der Haltestellen erfüllt dieser Datensatz alle genannten Anforderungen. Die Punktdaten sind im Gegensatz zur Streckengeometrie äußerst exakt und je Fahrtrichtung getrennt voneinander verfügbar.

3.2.2 Fahrplandaten GTFS

Auch der zweite Datensatz wird von den Wiener Linien selbst zur Verfügung gestellt. Der zentrale Unterschied zum ersten Datensatz ist das Format. GTFS steht für General Transit Feed Specification und ist ein Austauschformat, das die Integration von ÖPNV-Fahrplänen in Google Maps ermöglicht. Aufgrund des Formats ist ein zusätzlicher Arbeitsschritt notwendig. Und zwar müssen die Daten mithilfe des entsprechenden Geoprocessing-Tools so konvertiert werden, dass die Darstellung in ArcGIS Pro möglich wird.

Der GTFS-Datensatz umfasst das gesamte Netz der Wiener Linien in Form eines Punktdatensatzes und eines Liniendatensatzes. Das Herausfiltern der Streckeninformation funktioniert problemlos über die Attributinformatoren. Die Haltestellen enthalten allerdings keine Informationen zu den Linien, die die jeweilige Haltestelle anfahren. Dementsprechend müssen die Haltestellen bei diesem Datensatz manuell ausgewählt und herausgefiltert werden.

Hinsichtlich der Genauigkeit der Streckengeometrie und der Position der Haltestellen zeigt sich bei den GTFS-Daten ein besseres Resultat als beim ersten Datensatz. Allerdings sind weiterhin einige offensichtliche Abweichungen von der tatsächlichen Route zu erkennen (siehe **Abb. 1**). Zur Trennung der beiden Fahrtrichtungen sind abermals manuelle Arbeitsschritte erforderlich. Durch die geringere Anzahl an Teilsegmenten fällt jedoch auch der hierfür notwendige Aufwand geringer aus als beim ersten Datensatz.



Abb. 1: Vergleich der Grundlagendaten am Kreisverkehr Aßmayergasse in Meidling

3.2.3 Open Street Map (OSM)

Nachdem beide Datensätze, die von den Wiener Linien zur Verfügung gestellt werden, die genannten Anforderungen nicht vollends erfüllen, wurden auch OSM-Daten in den Vergleich mitbezogen. Im Gegensatz zu den anderen beiden Datensätzen, werden die OSM-Daten nicht vom Betreiber der Linien aufbereitet. Bei Open Street Map handelt es sich um eine Geodatenplattform, die von den Nutzer:innen der Plattform gemeinschaftlich betrieben wird. Die dort zu findenden Geodaten sind benutzer:innengeneriert und werden auch von eben diesen Nutzer:innen gewartet und aktuell gehalten.

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten Geodaten aus Open Street Map zu extrahieren. Auf der Website von Open Street Map können Daten exportiert werden, die im Nachhinein mit einer Geoinformationssoftware gefiltert werden können. Eine weitere Möglichkeit bietet das Unternehmen Geofabrik, das in regelmäßigen Abständen ein Abbild aller OSM-Daten erstellt und diese nach Ländern gegliedert als Download zur Verfügung stellt. Ein solches Abbild von Österreich ist allerdings sehr umfassend und es wäre abermals notwendig die Daten anschließend zu filtern.

Deshalb wurde zur Datenbeschaffung die Website overpass-turbo.eu gewählt, mit der es möglich ist die OSM-Daten bereits vor dem Download zu filtern und nur die gewünschten Daten – in diesem Fall die Streckengeometrie und die Haltestellen des 59A – herunterzuladen. Die folgende Abfrage wurde hierfür verwendet:

```
[out:json][timeout:25];
(
  node["network"="VOR"]["ref"="59A"]["route"="bus"]({{bbox}});
  way["network"="VOR"]["ref"="59A"]["route"="bus"]({{bbox}});
  relation["network"="VOR"]["ref"="59A"]["route"="bus"]({{bbox}});
);
```

```
);
out body;
>;
out skel qt;
```

Die Website bietet unter dem Menüpunkt „Wizard“ einen Abfrageassistenten, der bei der Erstellung solcher Abfragen unterstützt. Die Eingabe des Befehls „network=VOR and ref=59A and route=bus“ in den Abfrageassistenten resultiert in der oben angeführten Abfrage. Um eine andere Buslinie herauszufiltern ist der Ausdruck entsprechend anzupassen. Bei Straßenbahnlinien ist zusätzlich der letzte Ausdruck auf „route=tram“ zu ändern.

Hinsichtlich der Genauigkeit der Daten zeigt sich nach dem Herunterladen, Konvertieren und Importieren in die Geoinformationssoftware, dass die OSM-Geodaten die Route des 59A im Vergleich mit den anderen Datensätzen am akkuratesten wiedergeben (siehe **Abb. 1**). Bei näherer Betrachtung zeigt sich allerdings auch, dass die OSM-Daten vor den weiteren Arbeitsschritten in geringem Ausmaß bereinigt werden müssen. Hintergrund dafür sind die in **Abb. 2** ersichtlichen Fehler, dass einzelne Haltestellen doppelt oder deren Wartebereiche als Linien parallel zur Streckenführung verortet sind.

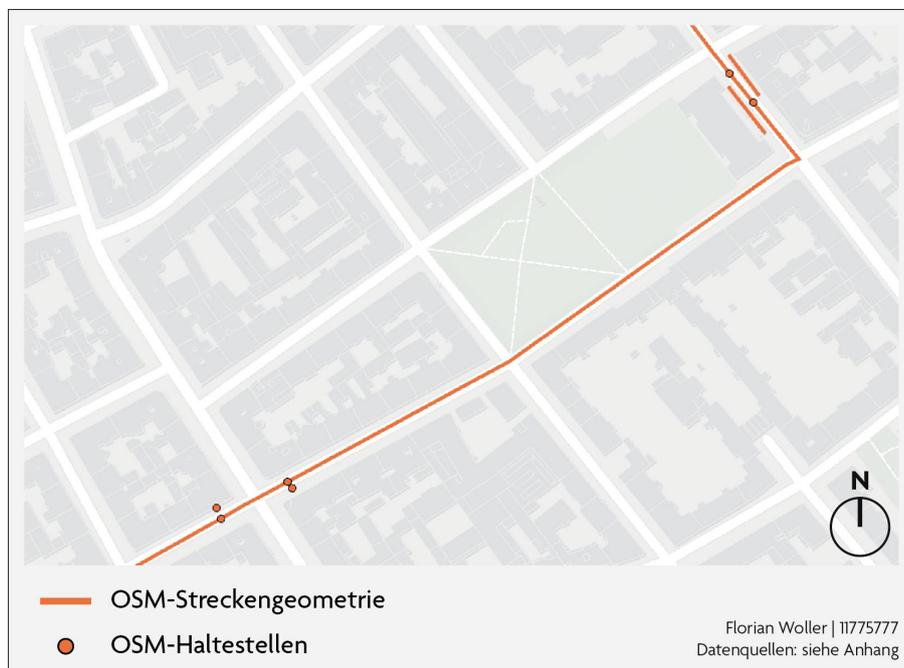


Abb. 2: Ausschnitt der OSM-Daten beim Bacherpark

Die letzte Anforderung an die Ausgangsdaten, die besagt, dass die getrennte Betrachtung der beiden Fahrtrichtungen möglich sein soll, erfüllt der OSM-Datensatz im Gegensatz zu den anderen beiden Datensätzen beinahe. Die Streckenführungen der beiden Fahrtrichtungen können ohne aufwändige manuelle Eingriffe aufgrund der verfügbaren Attributinformationen mit einer simplen Geoprocessing-Operation voneinander getrennt werden. Für die Haltestellen hingegen sind keine Informationen hinterlegt zu welcher Fahrtrichtung diese gehören. Deshalb bedarf es für die Haltestellen eines manuellen Eingriffs.

Da die Anforderung der getrennten Betrachtung der beiden Fahrtrichtungen teilweise erfüllt ist und aufgrund der Genauigkeit der Daten ist der OSM-Datensatz, trotz der in **Abb. 2** ersichtlichen Fehler, den anderen beiden Datensätzen gegenüber zu bevorzugen. Die weiteren beschriebenen Arbeitsschritte wurden folglich mit den OSM-Daten durchgeführt.

3.3 Aufbereitung der Daten für die Berechnung

In einem ersten Schritt ging es darum die Streckengeometrien der beiden Fahrrichtungen voneinander zu trennen. Das erfolgte mittels des Geoprocessing-Tools „Split by Attributes“. Anschließend wurden die Linien jeweils an ihren Scheitelpunkten in Teilsegmente unterteilt („Split Line at Vertices“), um die in **Abb. 2** ersichtlichen Fehler zu korrigieren. Das Entfernen der als Linien parallel zur Streckenführung dargestellten Wartestellenbereiche erfolgte manuell. Abschließend wurden die Teilsegmente wieder zusammengefügt.

Auch hinsichtlich des Punktdatensatzes war ein manueller Eingriff notwendig. Die ebenso in **Abb. 2** erkennbaren doppelt verorteten Haltestellen wurde mittels des Bearbeitungswerkzeugs gelöscht. Anschließend wurden die Haltestellen auf je eine eigene Datenebene für die beiden Fahrrichtungen aufgeteilt. Das Resultat der Bereinigung sind je ein Punkt- und ein Liniendatensatz für die beiden Fahrrichtungen.

Mit der Bereinigung allein ist die Aufbereitung der Daten für die weiteren Berechnungen aber noch nicht getan. Denn es gab Streckenabschnitte, wo die Daten die Wirklichkeit noch nicht in einem zufriedenstellenden Ausmaß widerspiegelten. Das war speziell bei Kreuzungen der Fall. Wie in **Abb. 3** ersichtlich war die Linienführung an Kreuzungen teilweise nicht abgerundet. Obwohl die Wahl bereits auf die OSM-Daten gefallen ist, sind in der Abbildung auch die anderen beiden Grundlagendaten dargestellt, um zu zeigen, dass dies bei allen drei Datensätzen der Fall war. Eine solche Linienführung ist nicht realitätsnah, da ein Bus einen gewissen Radius benötigt, um solch einen Richtungswechsel durchzuführen.

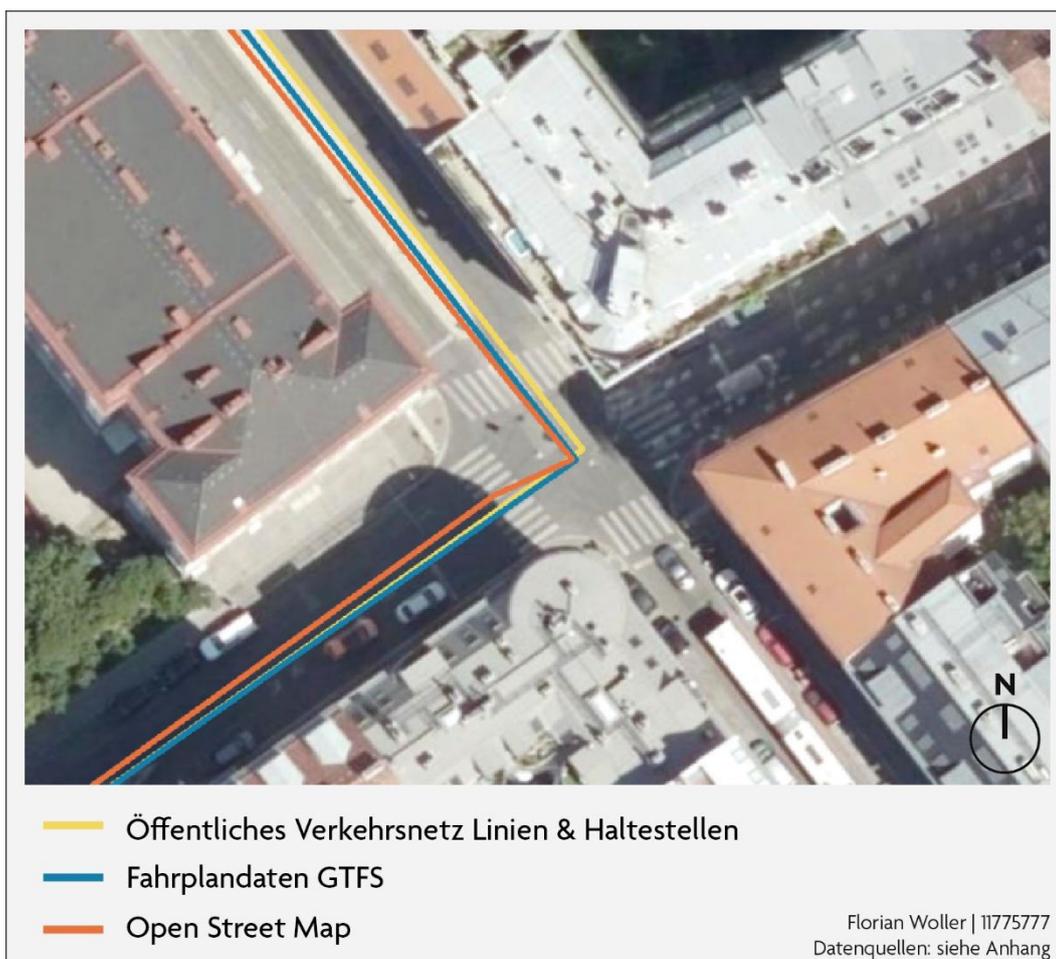


Abb. 3: Vergleich der Grundlagendaten bei der Haltestelle Bacherplatz

Darüber hinaus galt es noch die Daten in eine Form zu bringen, die die Berechnung der theoretisch möglichen Fahrzeiten ermöglicht. Das Ziel war die Linie in Segmente zu unterteilen und

für jedes einzelne Segment Parameter wie die Anfangs- und Endgeschwindigkeit oder die Fahrzeit zu berechnen. Dabei zu berücksichtigen sind die Haltestellen, die geltenden Geschwindigkeitsbeschränkungen, sowie die notwendigen Geschwindigkeitsreduktionen in Kurven. Da ArcGIS Pro eine breite Palette an Werkzeugen bietet, um Daten aufzubereiten, war es im Vorhinein nicht möglich festzustellen, welche Werkzeuge sich am besten dafür eignen die Daten in die gewünschte Form zu bringen.

Aus diesem Grund wurden, wie bereits beim vorangegangenen Arbeitsschritt, Anforderungen an die Aufbereitung der Daten für die Berechnung definiert. Die folgenden Anforderungen wurden an den Liniendatensatz gestellt, um die Berechnung der theoretisch möglichen Fahrzeiten durchführen zu können:

- Die Linie soll nach der Aufbereitung der tatsächlichen Linienführung möglichst exakt entsprechen. Streckenabschnitte, wo dies bislang nicht der Fall war, sollen entsprechend verbessert werden.
- Die Linie soll aus einer angemessenen Anzahl an Teilsegmenten bestehen. Es braucht genug Teilsegmente, um die Genauigkeit der Linie zu gewährleisten, aber nicht so viele, dass die einzelnen Teilsegmente sehr kurz sind.
- Bei den Kurven muss es sich um Kreisbögen handeln, die für eine weitere Berechnung geeignet sind. Das heißt, dass Parameter wie die Länge des Segments und der Kurvenradius bekannt sein müssen.
- Die Anordnung der Teilsegmente muss der tatsächlichen Reihenfolge von Anfangs- bis Endstation entsprechen.

Da der Punktdatensatz in der bereinigten Form bereits weitestgehend für die weiteren Arbeitsschritte geeignet war, wurden für diesen keine weiteren Anforderungen definiert. Die generelle Anforderung, dass die Arbeitsschritte weitestgehend automatisiert durchgeführt werden können, kommt weiterhin zu tragen.

Da die unterschiedlichen Geoprocessing-Werkzeuge divergierende Resultate liefern und sich die Plausibilität der späteren Berechnungen in Vorhinein nicht einschätzen lässt, wurden drei unterschiedliche Lösungswege (L1, L2, L3) getestet, die folgend erläutert werden. Die drei Lösungswege basieren auf zahlreichen Versuchen die Daten unter Berücksichtigung der oben genannten Anforderungen für die Berechnungen aufzubereiten. Hinsichtlich dieser Versuche sei angemerkt, dass Kombinationen von unterschiedlichen Werkzeugen in der Regel zu schlechteren Ergebnissen geführt haben als einzelne Werkzeuge für sich selbst. Aus diesem Grund mögen die drei Lösungswege vergleichsweise simpel wirken.

Die Arbeitsschritte der drei Lösungswege wurden jeweils für beide Fahrtrichtungen angewandt. Anschließend an die Erläuterung der drei Lösungswege werden Arbeitsschritte beschrieben, die bei allen drei Herangehensweisen durchgeführt wurden, wie die Verschneidung des Liniendatensatzes mit den Haltestellen und mit den Tempo-30-Zonen.

3.3.1 L1 –Simplify by Straight Lines and Circular Arcs

Dieses Werkzeug vereinfacht die Ausgangsdaten unter Verwendung von Geraden und Kreisbögen und macht damit im Prinzip genau das, was durch die Datenaufbereitung erreicht werden soll. Die Parameter des Werkzeugzugs wurden wie folgt angepasst. Um ein genaues Ergebnis zu erhalten, wurde der maximal zulässige Versatz auf 0,5 Meter festgelegt. Als Bezugspunkt für den maximal zulässigen Versatz wurden die Teilsegmente anstatt der Scheitelpunkte gewählt. Die Anpassung der weiteren Parameter dieses Tools führten nicht zu einer erkennbaren Verbesserung des Ergebnisses. Deshalb wurden die Standardeinstellungen bei diesen Parametern nicht angepasst.

Die Operation liefert eine Linie, die aus Geraden und Kreisbögen, die sich für die weiteren Berechnungen eignen, besteht. Obwohl dieses Ergebnis hinsichtlich der Anforderungen bereits weitgehend zufriedenstellend ist, weist das Resultat auch einige Ungenauigkeiten auf. Es ist bei-

spielsweise nicht möglich zu steuern, an welchen Stellen durch das Werkzeug Geraden bzw. Kreisbögen eingesetzt werden. Das ist insofern suboptimal, dass Situationen wie jene in **Abb. 3**, wo zwei Geraden aufeinandertreffen nicht verbessert werden. Im Idealfall würde in solchen Bereichen zwischen den Geraden ein Kreisbogen ergänzt werden. Leider bietet das Werkzeug diese Möglichkeit allerdings nicht. Trotz dieses Problems liefert L1 ein Ergebnis das sich, aufgrund der weitgehenden Erfüllung der Anforderungen, für die weiteren Bearbeitungsschritte eignet.

3.3.2 L2 – Simplify Line

Der zweite Lösungsweg basiert auf dem Geoprocessing-Werkzeug „Simplify Line“. Das Ziel dieses Lösungsweges war eine so starke Vereinfachung der Linie, dass diese ausschließlich aus Geraden besteht. Die Idee war in der späteren Berechnung die Winkel zwischen den Geraden zu ermitteln und für unterschiedliche Winkel unterschiedliche Kurvenradien anzunehmen. Diese Vorgehensweise bringt Vor- und Nachteile mit sich. Einerseits könnte damit das Problem gelöst werden, dass es, wie bei L1 beschrieben, in der Aufbereitung der Daten nicht möglich ist zu definieren wo Kurven sind, was dazu führt, dass Situationen wie in **Abb. 3** ersichtlich im Zuge der Datenaufbereitung nicht verbessert werden können. Dieses Problem könnte bei L2 in der Berechnung behoben werden. Andererseits jedoch entspricht das nicht den vorab definierten Anforderungen, die späteren Berechnungen würden zunehmend kompliziert werden und es wäre notwendig weitere Annahmen bezüglich der Kurven zu treffen. Da die Nachteile überwiegen wurde dieser Lösungsweg gegenüber den anderen hintangestellt. Aufgrund der plausiblen Ergebnisse, die im Zuge der anderen beiden Lösungswege ermittelt wurden, wurde dieser Lösungsweg letztendlich nicht durchexerziert. Folgend trotzdem eine kurze Beschreibung des Geoprocessing-Werkzeugs und den angewandten Parametern.

Das Tool „Simplify Line“ bietet unterschiedliche Algorithmen zur Vereinfachung einer Linie. Nach Erprobung der unterschiedlichen Algorithmen wurde der Douglas-Peucker-Algorithmus, der kritische Punkte entlang der Linie bewahrt, zur Aufbereitung der Daten gewählt. Diese Entscheidung beruht darauf, dass es bei ÖV-Linien kritische Punkte gibt, die durch die Vereinfachung nicht wegfallen dürfen. Kurvenbereiche hingegen sollen, wie oben beschrieben, vereinfacht werden. Um die Genauigkeit der Linie trotzdem zu bewahren, wurde die Operation mit einer geringen Vereinfachungstoleranz von 2,5 Metern durchgeführt. Das Resultat dieser Vorgehensweise ist eine weitgehend akkurate Linie, die aufgrund der Vereinfachung der Kurven aus weniger Teilsegmenten besteht als das bei den anderen Lösungswegen der Fall ist.

3.3.3 L3 – manuelles Nachzeichnen der Linie

Bei L3 wurde durch das manuelle Nachzeichnen der Linie probiert die für das Aufbereiten der Daten formulierten Anforderungen bestmöglich zu erfüllen. Hierbei wurden Geraden und Kreisbögen verwendet. Durch das manuelle Nachzeichnen entspricht L3 nicht der Grundanforderung, dass die Arbeitsschritte weitgehend automatisiert durchgeführt werden sollen. Aufgrund des zeitlichen Ressourcenaufwands dieses Lösungsweges ist die Übertragbarkeit beispielsweise auf das gesamte Busnetz Wiens nicht gewährleistet. Trotzdem erfüllt dieser Lösungsweg einen gewissen Zweck.

L1 liefert, mit Ausnahme der nicht-abgerundeten Kurven, ein Ergebnis, das sich für die weiteren Berechnungen eignet. Die im Zuge von L3 gezeichnete Linie, welche anhand der OSM-Luftbilddaten und einer abgerundeten Version der Buslinie erstellt wurde, probiert dieses Problem zu beheben und dient dementsprechend als Vergleichswert für L1. Vor diesem Hintergrund kann vorab der Berechnungen folgende Annahme bezüglich der Resultate getroffen werden: Bei L1 werden die Winkel von zwei aufeinandertreffenden Geraden nicht in der Berechnung berücksichtigt. Selbst wenn es sich hierbei um einen rechten oder spitzen Winkel handelt, ist es für den imaginären Bus, der die Teilsegmente in der Berechnung nacheinander abfährt, als ob an der besagten Stelle keine Richtungsänderung stattfindet. Deshalb gibt es für den imaginären Bus

auch keinen Grund seine Geschwindigkeit zu reduzieren. Bei L3 hingegen wurden an solchen Stellen manuell Kreisbögen ergänzt, die dazu führen, dass der imaginäre Bus seine Geschwindigkeit reduzieren muss. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die im Zuge von L3 ermittelte Fahrzeit höher sein wird als jene von L1. Die Überprüfung dieser Annahme dient auch der Verifizierung der Korrektheit der Berechnungsmethode. Bevor die Fahrzeiten berechnet werden können, braucht es allerdings noch einige Arbeitsschritte, die auf alle drei Lösungswege zutreffen.

3.3.4 Verschneidung mit Haltestellen & Tempo-30-Zonen

In der Ausgangsform enthält der Liniendatensatz keine Information, die angibt wo entlang der Linie die Haltestellen liegen bzw. in welchen Bereichen bereits eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 30 km/h in Kraft ist. Durch die Betrachtung der unterschiedlichen Datenebenen in einer Geoinformationssoftware lässt sich dies einfach erkennen, aber die Informationen müssen so miteinander verschnitten werden, dass der Liniendatensatz diese Zusatzinformationen enthält, um bei den späteren Berechnungen jene Bereiche oder Punkte definieren zu können, wo der Bus die Geschwindigkeit reduzieren oder anhalten muss. Zur Verschneidung der Datenebenen wurden die folgenden Arbeitsschritte vorgenommen.

1. Split Line at Point

Dieses Werkzeug unterteilt den Liniendatensatz an ausgewählten Punkten – in diesem Fall die Haltestellen aus dem Punktdatensatz. Abhängig von den vorangegangenen Methoden und der Genauigkeit der daraus resultierenden Linie, wurde ein Suchradius zwischen einem und vier Metern gewählt. Da die Reihenfolge der Teilsegmente nach Anwendung dieses Werkzeug fehlerhaft sein kann, muss eine Abfolge an Befehlen durchgeführt werden, um die Reihenfolge wiederherzustellen.

2. Dissolve

Dieser Befehl fügt die Teilsegmente wieder zu einer Linie zusammen. Es gäbe für diesen Schritt alternative Werkzeuge, die dasselbe Resultat liefern würden.

3. Split Line at Vertices

Der Liniendatensatz wird an allen Scheitelpunkten in Teilsegmente unterteilt. Die richtige Reihenfolge der Teilsegmente ist damit wiederhergestellt.

4. Calculate Field

Es wird ein neues Feld in der Attributtabelle des Liniendatensatzes aus Arbeitsschritt 3 berechnet. Das neue Feld zeigt je Teilsegment welche Distanz seit dem Ausgangspunkt zurückgelegt wurde, also die kumulierte Distanz. Für die Berechnung wird die vom Werkzeug vordefinierte Funktion „Accumulate Value“ verwendet.

5. Snap

Die Haltestellen werden mittels dieses Werkzeuges einem Scheitelpunkt des Liniendatensatzes zugeordnet. Um die Ausgangsdaten nicht zu verändern, wird mit einer Kopie des Punktdatensatzes gearbeitet. In den Parametern wird als Typ Scheitelpunkt und als Radius jener aus Arbeitsschritt 1 gewählt.

6. Spatial Join

Die Informationen des Linien- und des Punktdatensatzes werden miteinander verschnitten. Als Ziel-Feature ist der Punktdatensatz anzugeben. Jeder Punkt soll mit einem Teilsegment verschnitten werden (Join one to one). Als Zuordnungsoption ist „Intersect“ zu wählen. Ein Radius muss bei dieser Operation nicht angegeben werden. Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes ist ein Punktdatensatz mit der Information bei welcher kumulierten Distanz die jeweilige Haltestelle liegt. Die Aufbereitung des Punktdatensatz ist mit diesem Arbeitsschritt abgeschlossen und der Datensatz kann für die weiteren Berechnungen exportiert werden.

7. Vorbereitung der Daten zu den geltenden Geschwindigkeitsbeschränkungen

- a. Dissolve
Die Ausgangsdaten der Stadt Wien zu Tempo-30-Zonen werden mittels „Dissolve“ zu einem Polygon zusammengefügt. Als Gegenstück zu den Tempo-30-Zonen dient ein Polygon das ganz Wien umfasst, beispielsweise durch das Zusammenfügen der Verwaltungsgrenzen. Die Information der allgemein gültigen Geschwindigkeitsbeschränkung (50 km/h) wird bei diesem Polygon in der Attributtabelle ergänzt.
 - b. Union
Die Polygone aus dem vorangegangenen Arbeitsschritt werden mittels „Union“ zusammengefügt. Davor ist darauf zu achten, dass beide Datenebenen ein Feld enthalten, das die jeweilig gültige Geschwindigkeitsbeschränkung enthält. Idealerweise haben diese Felder dieselbe Bezeichnung. Resultat der Operation ist eine Datenebene mit zwei Polygonen, je eines für die Tempo-30- und die Tempo-50-Zonen.
 - c. Dissolve
Zur Bereinigung der Attributtabelle wird ein weiteres Mal der Befehl „Dissolve“ durchgeführt. Hierbei soll nach dem Feld, das die gültige Geschwindigkeitsbeschränkung enthält, zusammengefügt werden.
 - d. Polygon to Line
Das Polygon aus Arbeitsschritt 7a, das die Tempo-30-Zonen in Wien darstellt, wird in Linien umgewandelt. Dieser Liniendatensatz dient der Ermittlung der Schnittpunkte von Tempo-30-Zonen und der Streckengeometrie des Busses.
8. Intersect
Der aktuellste Datensatz zur Streckengeometrie (Arbeitsschritt 4) wird mit dem Tempo-30-Liniendatensatz (Arbeitsschritt 7d) verschnitten. Ergebnis dieser Operation soll ein Punktdatensatz sein, was in den Parametern der Operation entsprechend anzugeben ist.
 9. Split Line at Point
Der Datensatz zur Streckengeometrie, der auch bei Arbeitsschritt 8 verwendet wurde, wird nun an jenen Punkten unterteilt, wo ein Übergang von einer Tempo-30-Zone in eine Tempo-50-Zone oder vice versa liegt (Punktdatensatz aus Arbeitsschritt 8). Vorsorglich kann ein Suchradius von 0,5 Metern angegeben werden. Durch die Anwendung dieses Werkzeugs kann die Reihenfolge der Teilsegmente abermals fehlerhaft sein. Die folgenden beiden Arbeitsschritte dienen der Richtigstellung.
 10. Dissolve
Die Teilsegmente werden zu einer Linie zusammengefügt.
 11. Split Line at Vertices
Der Liniendatensatz wird an allen Scheitelpunkten in Teilsegmente unterteilt. Die richtige Reihenfolge ist damit wiederhergestellt.
 12. Intersect
Der Liniendatensatz aus Arbeitsschritt 11 wird mit dem Polygondatensatz aus Arbeitsschritt 7c verschnitten. Dadurch wird die Information der Geschwindigkeitsbeschränkung an den Liniendatensatz angefügt.
 13. Calculate Field
Da durch die Richtigstellung der Reihenfolge der Teilsegmente das Feld zur kumulierten Distanz verloren gegangen ist, muss dieser Arbeitsschritt an dieser Stelle nochmal wiederholt werden.
 14. Enable COGO
Durch diese Operation werden dem Liniendatensatz einige Felder hinzugefügt. Diese Felder enthalten Informationen zu den einzelnen Teilsegmente, die zur weiteren Be-

rechnung gebraucht werden. Dazu gehören beispielsweise Radius, Bogenlänge oder Richtung. Das Werkzeug berechnet diese Werte allerdings nicht selbstständig.

15. Update COGO

Durch diesen abschließenden Arbeitsschritt werden die neuen Felder befüllt. Es handelt sich hierbei um kein Geoprocessing-Werkzeug. Stattdessen ist dieser Befehl unter den Bearbeitungswerkzeugen (Registerkarte Edit) zu finden.

Nach Durchführung des letzten Arbeitsschrittes kann nun auch der Liniendatensatz gespeichert und für die weiteren Berechnungen exportiert werden.

3.4 Ermittlung der theoretisch möglichen Fahrzeit

Für die Berechnungen wurden die aus der Geoinformationssoftware exportierten Tabellen in ein Tabellenkalkulationsprogramm (Microsoft Excel) übertragen. In einem ersten Arbeitsschritt wurde ein SVERWEIS durchgeführt, um zu ermitteln nach welchen Teilsegmenten eine Haltestelle liegt. Hierbei wurden die kumulierten Distanzen aus den beiden Datensätzen miteinander verglichen. Die kumulierte Distanz je Teilsegment bzw. je Haltestelle wurde bereits bei den vorangegangenen Arbeitsschritten berechnet. Um etwaige Rundungsfehler, die sich dadurch ausdrücken, dass nicht alle Haltestellen einem Teilsegment zugeordnet werden, zu beheben, können die kumulierten Distanzen vor dem SVERWEIS noch gerundet werden. Darüber hinaus ist bei diesem Arbeitsschritt darauf zu achten, dass die Ausgangshaltestelle nicht fälschlicherweise dem ersten Teilsegment zugeordnet wird. Diese Haltestelle liegt am Anfang des ersten Teilsegments und hat demnach nicht zur Folge, dass der Bus hier anhalten muss. Bei den anderen Haltestellen, die jeweils am Ende ihres Teilsegments liegen, ist das jedoch schon der Fall.

Da für die folgenden Arbeitsschritte nicht alle Informationen aus den Datensätzen benötigt werden, empfiehlt es sich die notwendigen Informationen in ein separates Tabellenblatt zu übertragen. Benötigt werden die IDs der Segmente, die auch deren Reihenfolge widerspiegeln, die Länge der Segmente, ein etwaiger Kurvenradius, die soeben ermittelte Information, ob nach dem jeweiligen Segment eine Haltestelle liegt, und die erlaubte Höchstgeschwindigkeit (in m/s). All diese Daten sollten in den Datensätzen vorhanden sein. Zusätzlich braucht es ein Feld, in dem die Beschleunigung des Fahrzeuges vermerkt wird. Im Zuge dieser Arbeit wurde für den Bus eine positive bzw. eine negative Beschleunigung von 1 m/s^2 bzw. -1 m/s^2 angenommen. Außerdem wird angenommen, dass der Bus versucht die Fahrzeit zu minimieren. Das heißt, dass der Bus immer so schnell wie möglich auf die Höchstgeschwindigkeit beschleunigt und diese Geschwindigkeit so lang wie möglich hält.

3.4.1 Ermittlung der Höchst-, Anfangs- & Endgeschwindigkeit je Segment

Da der Bus die Kurven in der Regel nicht mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h bzw. 50 km/h bewältigen kann, gilt es in einem ersten Schritt die Höchstgeschwindigkeit in Kurven zu ermitteln. Das erfolgt auf Basis des Kurvenradien. Die maximal mögliche Kurvengeschwindigkeit wurde durch Anwendung der folgenden Formel ermittelt.

$$\text{Kurvengeschwindigkeit} = \sqrt{(\text{Kurvenradius} \times 0,75)} \quad (1)$$

Durch das Bilden des Minimums aus der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der Kurvengeschwindigkeit je Segment ergibt sich eine neue Höchstgeschwindigkeit, die zur Ermittlung der ersten vorläufigen Anfangs- und Endgeschwindigkeit je Segment herangezogen werden kann. Die Anfangsgeschwindigkeit des ersten Segments muss 0 betragen. Ab dem zweiten Segment kann als Anfangsgeschwindigkeit die Endgeschwindigkeit des vorangegangenen Segments übernommen werden. Die Endgeschwindigkeit ergibt sich einerseits aus der Information, ob sich am Ende des Segments eine Haltestelle befindet. In diesem Fall beträgt die Endgeschwindigkeit 0. Andererseits ergibt sich die Endgeschwindigkeit aus der neu ermittelten Höchstge-

schwindigkeit des aktuellen und des folgenden Teilsegments, denn wenn die Höchstgeschwindigkeit des Folgesegments niedriger ist als die des aktuellen Segments, muss der Bremsvorgang bereits auf dem aktuellen Segment stattfinden.

Da die ermittelten Anfangs- und Endgeschwindigkeiten die Längen der jeweiligen Segmente nicht berücksichtigen, liegen bei diesen Werten noch Fehler vor, die es anzupassen gilt. Hinsichtlich der Länge der Teilsegmente stellt sich die Frage, ob der Bus unter Berücksichtigung der Beschleunigung (1 m/s^2) die Höchstgeschwindigkeit auf der Länge des Segments überhaupt erreichen kann. Falls dem nicht so ist – das Teilsegment also zu kurz ist um beispielsweise den Bus von 0 auf 50 km/h zu beschleunigen – muss die Endgeschwindigkeit des Teilsegments nach unten angepasst werden und der Beschleunigungsvorgang auf dem nächsten Segment fortgesetzt werden. Dementsprechend nimmt eine solche Anpassung auch Einfluss auf die Anfangsgeschwindigkeiten. Für diese, wie auch für die nachfolgend geschilderte Anpassung, wurde als Basis die folgende Formel verwendet, die gemäß dem gesuchten Wert umgeformt wurde.

$$\text{Beschleunigung} = \frac{\text{Endgeschwindigkeit}^2 - \text{Anfangsgeschwindigkeit}^2}{2 \times \text{Weg}} \quad (2)$$

Zur Ermittlung der maximal möglichen Endgeschwindigkeit je Segment wurde in die Formel eingesetzt. Anschließend wurde das Minimum aus diesem Ergebnis, der ersten ermittelten Endgeschwindigkeit und der Höchstgeschwindigkeit (die sich wiederum aus Geschwindigkeitsbeschränkung und Kurvengeschwindigkeit ergibt) gebildet. Die dadurch ermittelte angepasste Endgeschwindigkeit je Segment stellt gleichzeitig auch die neue Anfangsgeschwindigkeit des jeweiligen Folgesegments dar.

Analog zur Überlegung, ob sich die Beschleunigung auf der Länge des Segments ausgeht, stellt sich dieselbe Frage betreffend der Bremsphase. Im Fall, dass das Segment zu kurz ist, um von der Anfangsgeschwindigkeit auf die Endgeschwindigkeit abzubremesen, ist die Anfangsgeschwindigkeit nach unten anzupassen. Das bedeutet wiederum, dass der Bremsvorgang bereits auf dem vorangegangenen Segment begonnen werden muss und beeinflusst somit die Endgeschwindigkeit des vorangegangenen Segments. Durch Einsetzen in die oben angeführte Formel wird die maximale Anfangsgeschwindigkeit, von der der Bus unter Berücksichtigung der Länge des Segments auf die Endgeschwindigkeit abbremesen kann, berechnet. In der Berechnung wird die bereits angepasste Endgeschwindigkeit aus dem vorangegangenen Arbeitsschritt verwendet. Die angepasste Anfangsgeschwindigkeit wird durch das Bilden des Minimums aus der eben berechneten maximalen Anfangsgeschwindigkeit, der zuletzt ermittelten Anfangsgeschwindigkeit aus dem vorangegangenen Arbeitsschritt, sowie der Höchstgeschwindigkeit bestimmt. Auch die Endgeschwindigkeit muss aus dem oben dargestellten Grund angepasst werden. Das Minimum aus der zuletzt ermittelten Endgeschwindigkeit und der neuen angepassten Anfangsgeschwindigkeit stellt die neue Endgeschwindigkeit dar.

Im Zuge der geschilderten Anpassungen wurden die vorläufigen ersten Anfangs- und Endgeschwindigkeiten je zweimal angepasst. Trotzdem können die Werte weiterhin fehlerhaft sein. Denn wenn mehrere sehr kurze Teilsegmente aufeinanderfolgen und der imaginäre Bus auf diesen Teilsegmenten beschleunigen oder abbremesen muss, kann es sein, dass sich der Beschleunigungs- bzw. Bremsvorgang über mehr als zwei Teilsegmente erstreckt. Durch die oben beschriebenen Anpassungen wurden allerdings lediglich die benachbarten Segmente angepasst. Zur Richtigstellung der Anfangs- und Endgeschwindigkeiten von Sequenzen, in denen mehrere kurze Segmente aufeinanderfolgen, müssen die beschriebenen Anpassungen noch weitere Male durchgeführt werden, wobei immer mit den jeweils zuletzt ermittelten Anfangs- und Endgeschwindigkeiten weitergerechnet werden muss. In der Berechnung der theoretisch möglichen Fahrzeit des 59A war es notwendig die beschleunigungs- und bremsseitige Anpassung der Anfangs- und Endgeschwindigkeiten je fünfmal durchzuführen. Vorsorglich wurde eine sechste Abfolge der Anpassungen ergänzt. Mit den daraus resultierenden Anfangs- und Endgeschwin-

digkeiten können in einem weiteren Schritt der Beschleunigungs- und Bremsweg, sowie der Weg der konstanten Fahrt je Segment berechnet werden. Aus diesen Werten ergeben sich abschließend die Fahrzeiten.

3.4.2 Ermittlung der Distanzen je Segment und Phase

Bevor die Distanzen ermittelt werden können, ist die Frage zu klären welche Phasen der Bus je Segment absolvieren muss. Mit Phasen sind hierbei die Beschleunigungs-, die Bremsphase, sowie die Phase der konstanten Fahrt gemeint. Zur Beantwortung dieser Fragen wurde unterschiedliche Bedingungen miteinander verknüpft.

Eine Bremsphase gibt es, wenn die folgenden Bedingungen auf einem Segment erfüllt sind:

- Die Endgeschwindigkeit muss kleiner als die Anfangsgeschwindigkeit oder die Höchstgeschwindigkeit sein.
- Gleichzeitig darf die maximal mögliche Endgeschwindigkeit (die im Zuge der letzten beschleunigungsseitigen Anpassung ermittelt wurde) nicht kleiner sein als die Höchstgeschwindigkeit. Wenn dies der Fall ist, handelt es sich nämlich um ein Segment, das für den Bus zu kurz ist, um auf die Höchstgeschwindigkeit zu beschleunigen. Solche Segmente erfüllen die erste Bedingung, obwohl es keine Bremsphase gibt. Durch die zweite Bedingung wird dies korrigiert.

Nach der Feststellung, ob es je Segment eine Bremsphase gibt oder nicht, wurde durch das Einsetzen in die bereits bekannte Formel (2) der Bremsweg berechnet. Dabei zu beachten ist, dass als Anfangsgeschwindigkeit das Minimum aus Höchstgeschwindigkeit, der maximal mögliche Endgeschwindigkeit und der maximal möglichen Anfangsgeschwindigkeit eingesetzt wird. So wird sichergestellt, dass eine etwaige Beschleunigungsphase, sowie die Anpassungen aufgrund der Länge des Segments berücksichtigt werden. Der resultierende Bremsweg mag nach dieser Berechnung in Einzelfällen noch fehlerhaft sein. Die Korrektur etwaiger Fehler wird anschließend noch geschildert.

In einem zweiten Schritt wurde geklärt, ob es eine Beschleunigungsphase gibt. Hinsichtlich dieser Frage wurde mit Ausschlusskriterien gearbeitet, die wie folgt lauten:

- Es gibt keine Beschleunigungsphase, wenn der soeben ermittelte Bremsweg größer-gleich der Länge des Segments ist oder wenn die Anfangsgeschwindigkeit der Höchstgeschwindigkeit entspricht. Die Formulierung des ersten Teils der Ausschlusskriterien ist so gewählt, um etwaige Fehler bei der Berechnung des Bremsweges zu berücksichtigen.

Nun wurde abermals in die bekannte Formel (2) eingesetzt, um den Beschleunigungsweg zu berechnen. Es ist wiederum zu beachten, dass der korrekte Wert für die Endgeschwindigkeit verwendet wird. Dieser ergibt sich aus dem Minimum aus der Höchstgeschwindigkeit und der maximal möglichen Endgeschwindigkeit.

Abschließend wurde überprüft, ob es zwischen Beschleunigungs- und Bremsphase außerdem noch eine Phase der konstanten Fahrt gibt. Da die Beschleunigungs- und Bremswege bereits bekannt waren, gestaltet sich die Ermittlung einfach:

- Es gibt eine Phase der konstanten Fahrt, wenn die Summe aus Beschleunigungs- und Bremsweg kleiner ist als die Länge des Segments.

Die Differenz zwischen der Länge des Segments und der Summe des Beschleunigungs- und Bremsweges ergibt die Distanz der konstanten Fahrt. Somit sind alle Distanzen bekannt. Zur Überprüfung der Distanzen können die drei ermittelten Werte nun mit der Länge des Segments verglichen werden. Aufgrund eines Umstandes, der auch die bereits erwähnten Fehler in der Ermittlung der Bremswege verursacht, kann diese Probe in Einzelfällen fehlerhaft ausfallen. Dem ist so, wenn es auf einem Segment eine Beschleunigungs- und eine Bremsphase, aber keine Phase der konstanten Fahrt gibt. Denn in diesem Fall wird eine Verschneidung der beiden Phasen notwendig, um jenen Punkt entlang des Segments zu finden an dem der Bus die Beschleuni-

gungsphase abbrechen und die Bremsphase einleiten muss. Auch diese Berechnung kann mit der bereits bekannten Formel (2) durchgeführt werden, wobei diesmal zusätzlich zur Umformung noch eine Substitution erforderlich ist. In einer der beiden Formeln wird die Weg-Variable so substituiert, dass sie sich mithilfe des Weges aus der anderen Formel ausdrücken lässt. Während also in der einen Formel eine unbekannte Variable den Weg ausdrückt, wird in der zweiten Formel der Weg durch die Länge des Segments abzüglich des (unbekannten) Weges aus der anderen Formel ausgedrückt.

Die Formeln für Beschleunigungs- und Bremsweg werden dann nach der Endgeschwindigkeit des Beschleunigungsweges bzw. der Anfangsgeschwindigkeit des Bremsweges umgeformt, da diese beiden Werte ident sein müssen. Nach Gegenüberstellung der beiden Formeln kann nun so umgeformt werden, dass der Weg berechnet werden kann. Abhängig von der Vorgehensweise bei der Substitution handelt es sich hierbei um den Beschleunigungs- oder den Bremsweg.

Im Zuge der Berechnung des 59A wurde zuerst der korrigierte Beschleunigungsweg ermittelt. Aus diesem lässt sich die Endgeschwindigkeit der Beschleunigungsphase berechnen, die gleichzeitig die Anfangsgeschwindigkeit des Bremsweges darstellt. Abschließend kann nun auch der korrigierte Bremsweg ermittelt werden. Mit der Korrektur der Brems- und Beschleunigungsweg ist die Ermittlung der Distanzen je Segment und Phase abgeschlossen. Es liegen nun alle Werte zur Berechnung der theoretisch möglichen Fahrzeit vor.

3.4.3 Ermittlung der Fahrzeit je Segment und Phase

Zur Ermittlung der Fahrzeit je Segment und Phase kamen die folgenden beiden Formeln zur Anwendung:

$$\text{Zeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Geschwindigkeit}} \quad (3)$$

$$\text{Zeit} = \frac{\text{Endgeschwindigkeit} - \text{Anfangsgeschwindigkeit}}{\text{Beschleunigung}} \quad (4)$$

Formel (3) kam bei den Phasen der konstanten Fahrt zum Einsatz. Formel (4) diente der Berechnung der Beschleunigungs- und der Bremszeit. Die Beschleunigung im Nenner der Formel kann dabei positive und negative Werte annehmen. Es ist bei allen Formeln darauf Bedacht zu nehmen, dass die richtigen Werte eingesetzt werden. In Phasen der konstanten Fahrt wird als Geschwindigkeit die eingangs ermittelte Höchstgeschwindigkeit eingesetzt. Bei den Beschleunigungs- und Bremszeiten ist speziell darauf zu achten, dass etwaige korrigierte Werte verwendet werden und dass sich die Anfangs- und Endgeschwindigkeit in Formel (4) auf die jeweilige Beschleunigungs- bzw. Bremsphase bezieht und nicht auf das gesamte Segment. Vorsorglich können diese Geschwindigkeiten vorab der Ermittlung der Fahrzeiten nochmal berechnet werden. Durch die Summierung der drei Phasen von allen Teilsegmenten kann somit abschließend die theoretisch mögliche Fahrzeit ermittelt werden.

3.5 Limitationen der & Anmerkungen zur Methodik

Hinsichtlich der geschilderten Vorgehensweise von der Wahl der zu analysierenden Linie bis zur Ermittlung der theoretisch möglichen Fahrzeit gibt es einige Limitationen und Anmerkungen, die im Sinne der Vollständigkeit folglich zusammengefasst sind.

In der Aufbereitung der Daten wurden unterschiedliche Geoprocessing-Werkzeuge bzw. deren Kombination getestet. Obwohl diese Versuche nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis geführt haben, sollen sie hier Erwähnung finden. „Smooth Line“ ist ein Werkzeug zum Glätten bzw. Weichzeichnen von Linien. Prinzipiell würde sich dieses Tool deshalb für die Aufbereitung

der Daten und speziell zum Glätten von Kurven eignen. Das Tool kommt in keinem der drei Lösungswege zur Anwendung, da die beiden Algorithmen, die zur Auswahl stehen, die Linie so verändern, dass eine Berechnung der theoretisch möglichen Fahrzeit nicht möglich wäre. Das liegt daran, dass für die resultierenden Kreisbögen der Kurvenradius nicht ermittelt werden kann. Um die Vorteile des Werkzeugs „Smooth Line“ in die Lösungswege zu integrieren wurde die Kombination mit dem Werkzeug „Simplify by Straight Lines and Circular Arcs“, das in Kreisbögen resultiert, die eine weitere Berechnung ermöglichen, getestet. Allerdings lässt sich das Tool „Simplify by Straight Lines and Circular Arcs“ nach dem Glätten der Linie mittels „Smooth Line“ nicht mehr anwenden.

ArcGIS Pro bietet mit unterschiedlichen Erweiterungen eine breite Palette an Werkzeugen für unterschiedliche Anwendungen. Das sogenannte „Network Analyst Tool“ ist einer Erweiterung, die der Planung von Routen dient und beispielsweise in der Logistik zum Einsatz kommt. Die Erweiterung ermöglicht, ausgehend von einem Anfangspunkt und unter Berücksichtigung von Punkten, die angefahren werden müssen, die Ermittlung einer optimalen Route. Alternativ zur beschriebenen Vorgehensweise würde sich das „Network Analyst Tool“ potenziell auch für die Ermittlung der Fahrzeit einer Buslinie eignen.

Auch hinsichtlich der Grundlagendaten gibt es mit den Daten der Graphenintegrations-Plattform (GIP) eine potenziell geeignete Alternative zu den verwendeten Daten. Die Plattform ist eine Sammlung multimodaler Verkehrsgraphen für ganz Österreich. Die Daten, die öffentlich zur Verfügung gestellt werden, umfassen dadurch mitunter auch die Verkehrsgraphen des öffentlichen Verkehrs, was eine potenzielle Eignung für das beschriebene Unterfangen bedeutet.

Die abschließende Anmerkung betrifft die Kurvenradien, die durch die Lösungswege zustande kommen und die damit auch der Berechnung der theoretisch möglichen Fahrzeit dienen. Die technischen Fahrzeugdaten, also die Länge beziehungsweise die Wendigkeit des Busses, wurde in der Aufbereitung der Daten nicht berücksichtigt. Das liegt daran, dass die Lösungswege eine Berücksichtigung nicht ermöglichen und dass es keine Informationen der Wiener Linien darüber gibt nach welchen Kriterien welche Fahrzeugtyp auf einer Route zum Einsatz kommen.

4 Ergebnisse

Hinsichtlich der Ergebnisse gibt es unterschiedliche interessante Facetten, die es zu betrachten gilt. Da die Entwicklung einer Methode zur Berechnung der Fahrzeit eines öffentlichen Verkehrsmittels anhand der Streckengeometrie ein zentrales Ziel dieser Arbeit darstellt, geht es folgend in einem ersten Schritt darum, ob die im letzten Kapitel beschriebene Methode plausible Ergebnisse liefert. Dazu gehört einerseits ein Vergleich der beiden durchexerzierten Lösungswege (L1 und L3), sowie andererseits ein Abgleich mit Sekundärdaten [Meusburger (2016)] und dem Fahrplan der Wiener Linien. Abschließend gilt es außerdem noch auf die Frage der Auswirkung von flächendeckenden Tempo-30-Zonen einzugehen und darzulegen welche Verzögerungen eine solche Geschwindigkeitsreduktion beim 59A zur Folge hätte.

4.1 Vergleich der Lösungswege

Im Zuge der Erläuterung der Methode wurde die Annahme getroffen, dass die Ergebnisse von L3 höher ausfallen müssten als jene von L1. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei L1 nicht alle Richtungsänderungen durch Kreisbögen ersetzt wurden und es in diesen Bereichen folglich nicht zu einer Geschwindigkeitsreduktion kommt, obwohl eigentlich eine Richtungsänderung stattfindet. Die in **Tab. 1** präsentierten Daten bestätigen diese Annahme. L3 liefert bei der Berechnung der Fahrzeit in Richtung Meidling ein um 6% höheres Ergebnis als L1. In Richtung Oper fällt die ermittelte Fahrzeit von L3 um 8% höher aus als jene von L1.

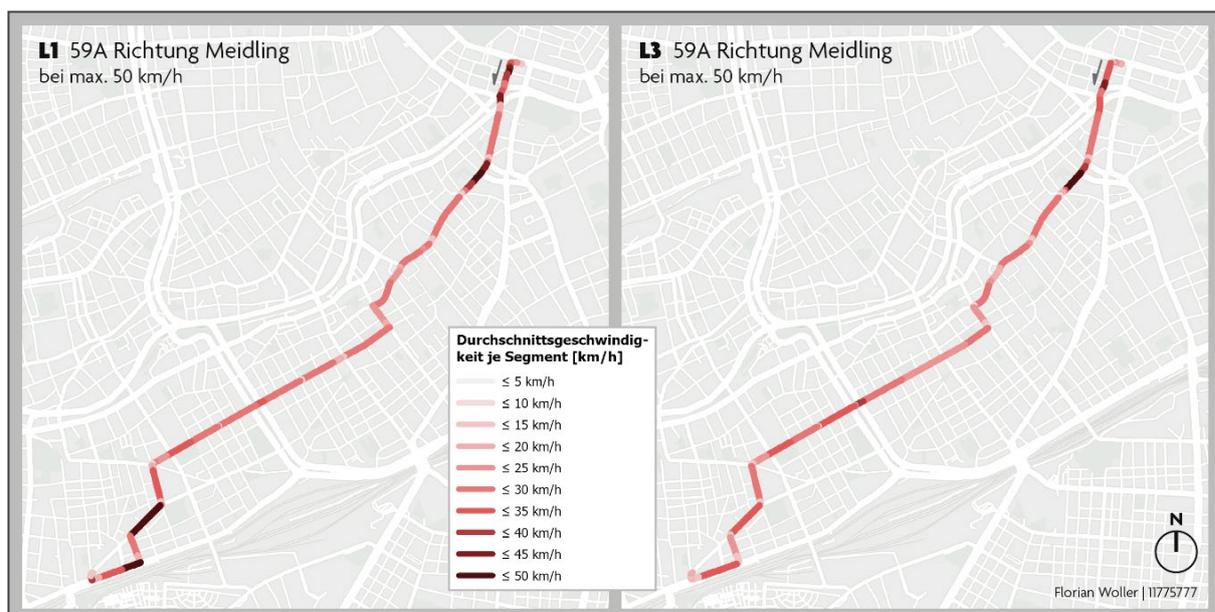
Tab. 1: reine Fahrzeit [mm:ss] bei max. 50 km/h

	Richtung Meidling	Richtung Oper
Lösungsweg 1 (L1)	10:41	10:20
Lösungsweg 3 (L3)	11:20	11:10

Zur Visualisierung der ermittelten Fahrzeiten der beiden Lösungswege werden diese anhand der Durchschnittsgeschwindigkeit je Segment in **Abb. 4** gegenübergestellt. Dadurch wird ersichtlich in welchen Bereichen L1 von einer höheren Geschwindigkeit ausgeht als L3. Dies scheint direkt im ersten Abschnitt der Strecke der Fall zu sein. In der genaueren Betrachtung zeigt sich allerdings, dass die Darstellung in diesem Abschnitt täuscht. Bei L1 wurde die Linie im ersten Abschnitt in eine größere Anzahl und folglich kürzere Segmente unterteilt als bei L3. Dadurch fällt die Durchschnittsgeschwindigkeit bei einigen Segmenten höher aus als jene bei den längeren Segmenten von L3. Insgesamt kommt der imaginäre Bus aber bei beiden Lösungswege nach 53 Sekunden bei der ersten Haltestelle an.

Nach der ersten Haltestelle folgt ein langer Abschnitt in dem kaum Unterschiede zwischen den beiden Lösungswege erkennbar sind. Das liegt daran, dass die beiden Lösungswege in diesem Abschnitt sehr ähnliche Ergebnisse ermitteln. Laut L3 braucht der Bus auf knapp über 8 Minuten Fahrzeit nur um etwa 10 Sekunden länger als laut den Berechnungen von L1. Der Unterschied ist hier, wie auch im letzten Abschnitt, wo die Unterschiede deutlich erkennbar sind, auf die unterschiedliche Genauigkeit der beiden Lösungswege bei Richtungsänderungen zurückzuführen.

Bei den letzten vier Richtungsänderungen vor der Endstation, sowie auf den dazwischenliegenden Geraden – eine Distanz von etwa 800 m – verliert der Bus laut L3 im Vergleich zu L1 27 Sekunden. Dementsprechend höher sind die im Zuge von L1 ermittelten und in **Abb. 4** dargestellten Durchschnittsgeschwindigkeiten je Segment. Hintergrund ist wie bereits angedeutet das Fehlen von Kreisbögen bei Richtungsänderungen. Im Falle von L1 sind lediglich die in diesem Abschnitt liegenden Haltestelle ein Grund zum Abbremsen bzw. zum Anhalten. Zwischen den Haltestellen wird bei L1 ohne Berücksichtigung der Richtungsänderungen, aufgrund der fehlenden Kreisbögen, soweit möglich auf die Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h beschleunigt. L3 hingegen sieht in den Kurven eine niedrigere Geschwindigkeit vor. Aufgrund dessen liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit je Segment in diesem Bereich nie über 35 km/h.

**Abb. 4:** 59A Richtung Meidling: Vergleich von L1 und L3 bei max. 50 km/h

Da die im Zuge von L3 erstellte Linie die Realität akkurater widerspiegelt als jene von L1, ist anzunehmen, dass auch die berechnete Fahrzeit näher an die tatsächliche Fahrzeit herankommt. Demgegenüber steht der Umstand, dass L1 jener Lösungsweg ist, der weitgehend automatisiert funktioniert, während für L3 ein manuelles Nachzeichnen der Linie notwendig war.

4.2 Vergleich mit GPS-Daten & Fahrplänen

Zur weiteren Überprüfung der Plausibilität können die berechneten Fahrzeiten mit den Fahrplänen der Wiener Linien und mit GPS-Daten, die im Zuge einer Bachelorarbeit erhoben wurden [Meusburger (2016)], verglichen werden. Dabei müssen gewisse Annahmen getroffen werden. Das liegt daran, dass die im vorangegangenen Kapitel geschilderten Lösungswege gewisse Aspekte, die die Fahrzeit eines Linienbusses beeinflussen, nicht berücksichtigen. Dazu gehören Stehzeiten in Haltestellen oder bei Ampeln, sowie verkehrsbedingte Verzögerungen. Für diese Stehzeiten könnten einerseits separate Annahmen getroffen werden, wie bspw., dass die Stehzeit in Haltestellen durchschnittlich 30 Sekunden beträgt, oder andererseits eine gesamtheitliche Annahme, die nicht nach den Hintergründen der Verzögerung unterscheidet. Aufgrund der Verfügbarkeit der Daten wurde die zweite Vorgehensweise gewählt. Somit setzt sich die Gesamtfahrzeit im folgenden Vergleich mit den GPS-Daten und den Fahrplänen der Wiener Linien, wie auch in **Tab. 2** und **Tab. 3** ersichtlich, aus der ermittelten Fahrzeit, sowie einer anteilhaft berechneten Stehzeit zusammen – eine Unterscheidung nach Art der Verzögerung kann aufgrund der gesamtheitlichen Annahme nicht erfolgen. Eine weitere Annahme, die zwar bereits bei einem vorangegangenen Arbeitsschritt getroffen wurde, hier aber nochmal erwähnt sei, ist die Beschleunigung des Busses von 1 m/s^2 beim Beschleunigen und -1 m/s^2 beim Abbremsen.

Wie man anhand **Tab. 2** und **Tab. 3** erkennen kann, machen die Fahrpläne der Wiener Linien bis auf die Gesamtfahrzeit, die lediglich auf die Minute genau angegeben ist, keine weiteren Angaben. Die GPS-Messungen ergaben in beiden Fahrtrichtungen eine höhere Fahrzeit als die offiziellen Fahrpläne. Für die GPS-Daten wurden insgesamt 60 Messungen an drei unterschiedlichen Tagen durchgeführt. An zwei der drei Tagen kam es zu Verzögerungen aufgrund einer Baustelle, was ein Mitgrund für die höheren durchschnittlichen Gesamtfahrzeiten sein kann [Meusburger (2016)]. Die GPS-Daten treffen auch eine Aussage darüber, welchen Anteil der Gesamtfahrzeit der Bus stehend bzw. fahrend verbringt. Diese Werte wurden zur Berechnung der Gesamtfahrzeiten von L1 und L3 herangezogen. L1 und L3 ergeben in beiden Fahrtrichtungen im Vergleich zu den Fahrplänen und GPS-Daten niedrigere Gesamtfahrzeiten, wobei die Fahrzeiten von L1 aufgrund der bereits genannten Gründe unter jenen von L3 liegen. Die niedrigeren Ergebnisse

Tab. 2: Vergleich der berechneten Fahrzeiten mit GPS-Daten und Fahrplan (59A Richtung Oper)

59A Richtung Oper	Fahrplan [Wiener Linien (2021)]	GPS-Daten [Meusburger (2016)]	L1	L3
reine Fahrzeit [mm:ss]	n.a.	12:19	10:20	11:10
Stehzeit [%]	n.a.	44%	44% *	44% *
Stehzeit [mm:ss]	n.a.	09:41	08:07	08:47
Gesamtfahrzeit [mm:ss]	20:00	22:00	18:27	19:57

n.a. = nicht angegeben; * Annahme auf Basis von [Meusburger (2016)]

Tab. 3: Vergleich der berechneten Fahrzeiten mit GPS-Daten und Fahrplan (59A Richtung Meidling)

59A Richtung Meidling	Fahrplan [Wiener Linien (2021)]	GPS-Daten [Meusburger (2016)]	L1	L3
reine Fahrzeit [mm:ss]	n.a.	12:13	10:41	11:20
Stehzeit [%]	n.a.	45%	45% *	45% *
Stehzeit [mm:ss]	n.a.	10:00	08:45	09:16
Gesamtfahrzeit [mm:ss]	21:00	22:13	19:26	20:36

n.a. = nicht angegeben; * Annahme auf Basis von [Meusburger (2016)]

sind darauf zurückzuführen, dass der imaginäre Bus in den Ermittlungen der theoretisch möglichen Fahrzeiten die Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt maximiert und es keine Verzögerungen bspw. aufgrund des Verkehrs gibt. Gleichzeitig schließen die Berechnungen auch eine etwaige Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit aus.

Die Abweichungen von den Fahrplänen der Wiener Linien belaufen sich bei L3 lediglich auf 0,25% (3 Sekunden) bzw. 1,9% (24 Sekunden). Diese Werte sprechen für die Funktionsweise der im Zuge dieser Arbeit entwickelten Methode. Da L1 die Anforderung einer automatisierten Ermittlung der theoretisch möglichen Fahrzeit besser erfüllt als L3, stellt sich die Frage einer Kalibrierung dieses Lösungsweges, um dessen Ungenauigkeiten bei Richtungswechseln auszugleichen und gleichzeitig andere Verzögerungen des Busses mitzuberücksichtigen. Ziel der Kalibrierung ist die Annäherung der Gesamtfahrzeiten von L1 an jene der Fahrpläne der Wiener Linien. Hierfür wurde in einem ersten Schritt ermittelt um wieviel Prozent die reinen Fahrzeiten von L1 unter jenen von L3 liegen. Mittels Trial-and-Error wurde anschließend ein Wert ermittelt, mit dem die kalibrierte Gesamtfahrzeit in beide Fahrtrichtungen bestmöglich den Fahrzeiten laut Fahrplänen entspricht. Mit einer Kalibrierung der reinen Fahrzeit um +8,25% weicht die kalibrierte Gesamtfahrzeit in beide Fahrtrichtungen lediglich um je 2 Sekunden von den Fahrplänen ab (siehe **Tab. 4**).

Tab. 4: Kalibrierung von L1

L1	Richtung Meidling	Richtung Oper
reine Fahrzeit [mm:ss]	10:41	10:20
Kalibrierung (+8,25%)	11:34	11:11
Stehzeit [%]	45% *	44% *
kalibrierte Gesamtfahrzeit [mm:ss]	21:02	19:58

* Annahme auf Basis von [Meusburger (2016)]

Dieser Kalibrierungswert ist, speziell wenn es um die Übertragbarkeit auf andere ÖV-Linien geht, mit Vorsicht zu betrachten. Das gilt ebenso für die anteilhaften Stehzeiten von 44% bzw. 45%, da für diese Werte nur GPS-Messdaten des 59A herangezogen wurden. Trotz der mit dem Kalibrierungswert und den Stehzeiten verbundenen Unsicherheiten, können diese Werte Referenzen in der Berechnung von Fahrzeiten von ÖV-Linien anhand der Streckengeometrie darstellen.

4.3 Auswirkungen von flächendeckenden Tempo-30-Zonen

Um die Auswirkungen von flächendeckenden Tempo-30-Zonen entlang der Strecke des 59A zu ermitteln, wurden die in **Kap. 3.4** beschriebenen Berechnungen ein weiteres Mal durchgeführt. Dabei wurde der Parameter der zulässigen Höchstgeschwindigkeit vorab für alle Segmente auf 30 km/h gesetzt. Der nachfolgende Vergleich erfolgt anhand von L3, weil dieser Lösungsweg ohne Kalibrierung bereits weitestgehend akkurate Ergebnisse geliefert hat und dadurch ein Unsicherheitsaspekt eliminiert werden kann. Allerdings sei angemerkt, dass sich die Verzögerung bei L1 in einem ähnlichen Rahmen bewegt (ca. +11%).

Die Ergebnisse des Vergleichs von L3 bei max. 50 km/h und bei max. 30 km/h sind in **Tab. 5** ersichtlich und in **Abb. 5** visualisiert. Die Abbildungen zur anderen Fahrtrichtung, sowie zu L1 finden sich im Anhang.

Tab. 5: Vergleich der Fahrzeiten bei max. 50 km/h und max. 30 km/h (L3)

Gesamtfahrzeit [mm:ss] bei	Richtung Meidling	Richtung Oper
max. 50 km/h	20:36	19:57
max. 30 km/h	22:35	21:52
Verzögerung [mm:ss]	01:59	01:55
Verzögerung [%]	+9,6%	+9,7%

Annahme der Stehzeiten auf Basis von [Meusburger (2016)]

Bei flächendeckenden Tempo-30-Zonen würde der 59A laut L3 in beiden Fahrtrichtungen jeweils um etwa 2 Minuten langsamer sein. Das entspricht einer Verzögerung von knapp unter 10% gegenüber den aktuell geltenden Geschwindigkeitsbeschränkungen. In **Abb. 5** wird ersichtlich, wo die größten Verzögerungen zu verzeichnen wären. Das ist im ersten Abschnitt der Strecke zwischen den Stationen Oper/Karlsplatz und Preßgasse, sowie zwischen den Stationen Ein-siedlerplatz und Bahnhof Meidling/Eichenstraße der Fall. In den anderen Bereichen würde der Bus durch flächendeckende Tempo-30-Zonen kaum bis gar keine Zeit verlieren. Das liegt daran, dass der Bus schon bei den geltenden Geschwindigkeitsbeschränkungen auf lediglich 22% der Segmente, was 30% der Strecke entspricht, eine Durchschnittsgeschwindigkeit von über 30 km/h erreicht.

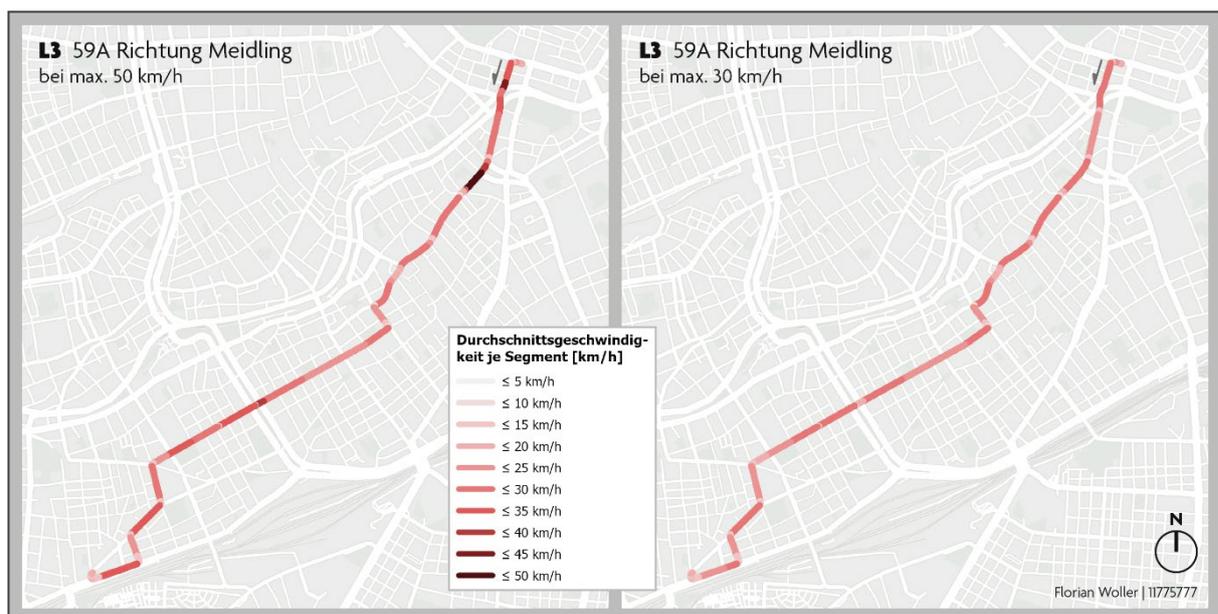


Abb. 5: 59A Richtung Meidling: Vergleich von L3 bei max. 50 km/h und max. 30 km/h

Es stellt sich abschließend die Frage, ob eine Verzögerung von etwa 2 Minuten durch Begleitmaßnahmen entlang der Strecke wettzumachen wäre. Auch die Arbeit, aus der die GPS-Daten hervorgehen, beschäftigt sich bereits mit dieser Frage [Meusburger (2016)]. In dieser wird argumentiert, dass durch Begleitmaßnahmen entlang des 59A eine Einsparung von knapp 5 Minuten möglich wäre. Maßnahmen, die zur Beschleunigung des Busses zum Einsatz kommen könnten, umfassen mitunter die folgenden:

- vom restlichen Verkehr getrennte Busspuren
- die Verlegung von Haltestellen vor Ampeln, um zu verhindern, dass der Bus gegebenenfalls zwei Mal anhalten muss
- intelligente Ampelschaltungen, die dem öffentlichen Verkehr Vorrang einräumen
- Neuordnung von Stellplätzen in engen Straßenräumen
- Errichtung von vorgezogenen Haltestellen, zur Sicherstellung einer ungehinderten Ausfahrt des Busses

Selbst für den Fall, dass es sich bei der Einschätzung der potenziell einzusparenden Zeit von knapp 5 Minuten, um eine optimistische Schätzung handelt, liegt es nahe, dass die im Zuge der vorliegenden Arbeit errechnete Verzögerung von knapp 2 Minuten, durch Begleitmaßnahmen wettzumachen wären und dass der Bus, nach der Umsetzung geeigneter Maßnahmen, auch bei einer flächendeckenden Geschwindigkeitsbeschränkung von 30 km/h den aktuellen Fahrplan einhalten könnte.

5 Conclusio

Grundlegendes Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Methode, die mittels einer GIS-Analyse die Ermittlung der theoretisch möglichen Fahrzeit von öffentlichen Verkehrsmitteln ermöglicht. Dabei sollten im Gegensatz zu vergangenen Versuchen keine GPS-Messgeräte zum Einsatz kommen, sondern lediglich die Streckeninformationsdaten herangezogen werden. Das Unterfangen war mitunter auch von der Frage motiviert, welche Verzögerungen die Ausweisung von flächendeckenden Tempo-30-Zonen mit sich bringen würden.

Die vorerst auf eine Buslinie angewandte Methode ergab plausible Ergebnisse, die für die Funktionalität der Methode, von der Beschaffung der Grundlagendaten, über die GIS-Aufbereitung der Daten, bis zur Ermittlung der theoretisch möglichen Fahrzeit, sprechen. Allerdings ist anzumerken, dass die im Laufe dieser Arbeit formulierten Anforderungen, wie beispielsweise die Möglichkeit der automatisierten Abwicklung der Arbeitsschritte, nicht immer vollends erfüllt werden konnten. In diesem Zusammenhang sind die beiden Lösungswege (L1 und L3), die zu plausiblen Ergebnissen geführt haben, zu erwähnen. L3 gibt die Strecke des 59A akkurater wieder als L1 und liefert Ergebnisse, die nur minimal von den Fahrplänen der Wiener Linien abweichen. L3 stellt damit ein starkes Argument für die Funktionalität der Methode dar. L1 hingegen ist weniger genau als L3, was einen Unsicherheitsfaktor darstellt und eine Kalibrierung erforderlich macht. Für L1 spricht der Umstand, dass dieser Lösungsweg die Anforderung einer automatisierten Durchführung der Arbeitsschritte in weiterem Maße erfüllt als L3 und sich folglich besser für die Anwendung auf weitere Linien eignet.

Trotz einiger Unsicherheiten und Annahmen, die getroffen werden müssen, liefert die entwickelte Methode plausible Ergebnisse, die sich der Realität stark annähern. Die Übertragbarkeit zumindest auf Buslinien sollte gegeben sein, wenngleich die für den 59A getroffenen Annahmen, aufgrund unterschiedlicher Streckengeometrien, Geschwindigkeitsbeschränkungen und Entfernungen zwischen Stationen, lediglich Referenzwerte für andere Linien darstellen können.

Hinsichtlich der Frage des Zeitverlusts aufgrund von flächendeckenden Tempo-30-Zonen hat sich gezeigt, dass der 59A je Fahrtrichtung etwa 2 Minuten länger brauchen würde, was einer Steigerung der Fahrzeit von etwa 10% entspricht. Es ist anzunehmen, dass sich eine solche Verzögerung mit Begleitmaßnahmen entlang der Strecke, wie beispielsweise getrennten Busspuren,

den öffentlichen Verkehr bevorzugende Ampelschaltungen oder Umorganisationen des Straßensystems ausgleichen ließe.

Literaturverzeichnis

- [1] International Transport Forum (2018): Speed and Crash Risk. Paris: International Transport Forum
- [2] Topp, Hartmut (2014): Tempo 30 auf Hauptverkehrsstraßen mit Wohnnutzung. In: Straßenverkehrstechnik, 58 (1), 23-30.
- [3] Umweltbundesamt (2016): Wirkungen von Tempo 30 an Hauptverkehrsstraßen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- [4] Die Presse (2014): Streit um Tempo 30: Wiener Linien vs. Grüne. <https://www.diepresse.com/1579833/streit-um-tempo-30-wiener-linien-vs-grune> (08.10.2021).
- [5] Fernsebner-Kokert, Bettina (2012): Tempo 30: Bezirke und Öffis wollen sich nicht ausbremsen lassen. <https://www.derstandard.at/story/1325486093092/verkehr-in-wien-tempo-30-bezirke-und-oeffis-wollen-sich-nicht-ausbremsen-lassen> (08.10.2021).
- [6] Glansegg, Bernhard (2016): Geschwindigkeitsprofil der Straßenbahnlinie 2. Bachelorarbeit. Wien: TU Wien.
- [7] Meusburger, Johannes (2016): Untersuchung des Geschwindigkeitsprofils der Buslinie 59A. Bachelorarbeit. Wien: TU Wien.
- [8] Sesar, Markus (2018): Erstellung eines Geschwindigkeitsprofils des 8. Wiener Gemeindebezirks Josefstadt. Bachelorarbeit. Wien: TU Wien.
- [9] Stroh, Alina (2015): Untersuchung des Geschwindigkeitsprofils von Bussen und Straßenbahnen in Wien. Bachelorarbeit. Wien: TU Wien.

Anhang

Datenquellen:

Tempo-30-Zonen Wien	https://www.data.gv.at/katalog/dataset/cc578bfc-66a3-4154-9543-04fdc43bb60e
Öffentliches Verkehrsnetz Linien Wien (3.2.1)	https://www.data.gv.at/katalog/dataset/36a8b9e9-909e-4605-a7ba-686ee3e1b8bf
Öffentliches Verkehrsnetz Haltestellen Wien (3.2.1)	https://www.data.gv.at/katalog/dataset/f1f6f15d-2faa-4b62-b78b-80599dd1c66e
Fahrplandaten GTFS Wien (3.2.2)	https://www.data.gv.at/katalog/dataset/ab4a73b6-1c2d-42e1-b4d9-049e04889cf0
Fahrplan des 59A (Stand: 28.10.2021)	https://www.wienerlinien.at/documents/843721/4764518/fahrplan-citybus-59a.pdf/430c7239-a51e-7ddd-50fd-fa8d1c126266?version=1.1&t=1635417119615



Abb. 6: 59A Richtung Oper: Vergleich von L1 und L3 bei max. 50 km/h



Abb. 7: 59A Richtung Oper: Vergleich von L3 bei max. 50 km/h und max. 30 km/h



Abb. 8: 59A Richtung Meidling: Vergleich von L1 bei max. 50 km/h und max. 30 km/h



Abb. 9: 59A Richtung Oper: Vergleich von L1 bei max. 50 km/h und max. 30 km/h